

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

Jonas Menon da Rosa

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTAÇÃO DE RECARGA MODO 3 PARA
VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Santa Maria, RS
2020

Jonas Menon da Rosa

DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTAÇÃO DE RECARGA MODO 3 PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

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

ORIENTADOR: Prof. Cassiano Rech

Santa Maria, RS
2020

©2020

Todos os direitos autorais reservados a Jonas Menon da Rosa. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

End. Eletr.: jonas.menonrosa@gmail.com

Jonas Menon da Rosa

DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTAÇÃO DE RECARGA MODO 3 PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

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

Aprovado em 2 de outubro de 2020:

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

Jorge Rodrigo Massing, Dr. (UFSM) (videoconferência)

Rodrigo Padilha Vieira, Dr. (UFSM) (videoconferência)

Santa Maria, RS
2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, Miguel Lemos da Rosa, a minha mãe, Neiva Salete Menon da Rosa, aos meus irmãos, André Menon da Rosa e Gabriel Menon da Rosa, e a minha namorada, Lisandra Reffatti Xavier. Cada minuto de estudos que tive foi graças a colaboração de cada um de vocês.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a minha família, por apoiar a minha decisão de realizar este curso, e sempre me incentivar a ir atrás dos meus sonhos. Também agradeço por todo o esforço feito por cada um de vocês para que eu pudesse estar aqui, e por poder dizer que tive todo o apoio que necessitei para a realização desse curso.

À minha namorada, Lisandra Reffatti Xavier, por compartilhar esse sonho comigo, e por trazer a tranquilidade, o equilíbrio, o otimismo, e a motivação que eu necessitava para que eu pudesse sempre ser o meu melhor. Os momentos mais difíceis da graduação foram superados de uma forma muito mais fácil graças a sua presença.

Ao professor Cassiano Rech, por abrir as portas da pesquisa para mim, por me dar a oportunidade de trabalhar nos assuntos que serão de maior relevância no futuro, e por todo o conhecimento e ensinamentos. Você me ajudou muito no meu desenvolvimento pessoal e profissional.

À família da minha namorada, por me darem todo o suporte que necessitei durante este período que estive longe de casa. Todos vocês estão dentro do meu coração por isso.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao GEPOC, pela oportunidade de realizar este curso, e por oferecer a infraestrutura necessária para a realização deste e de outros trabalhos.

A todos os amigos, colegas, e demais familiares, por todos os bons momentos e toda a ajuda que recebi. Ninguém faz nada sozinho, e vocês também foram importantes para que fosse possível eu conseguir a minha formação.

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTAÇÃO DE RECARGA MODO 3 PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

AUTOR: Jonas Menon da Rosa

ORIENTADOR: Cassiano Rech

A quantidade de veículos elétricos (VE's) vendidos anualmente vem crescendo exponencialmente na última década por todo o mundo, e uma das principais dúvidas dos clientes interessados em adquirir um VE é como eles podem recarregar o seu veículo em casa. Existem duas maneiras economicamente viáveis de fazer isso: uma é utilizar o carregador portátil que é fornecido pelo fabricante juntamente com o VE, e a outra é a utilizar uma estação de recarga de veículo elétrico, sendo a segunda opção a forma mais rápida entre as duas. Dessa forma, haverá um aumento na demanda por este equipamento nos próximos anos. Pensando nisto, este trabalho possui o objetivo de desenvolver uma estação de recarga de veículo elétrico adequada para ser instalada em ambiente residencial. Uma estação de recarga de veículo elétrico nada mais é do que um equipamento que fica conectado à rede elétrica da edificação, e disponibiliza energia de forma segura e confiável ao VE para que ele possa realizar a recarga das suas baterias. Seguindo as recomendações e exigências das normas internacionais foram projetados os circuitos de proteção, comunicação com o VE, e detecção do cabo de recarga. Também foi realizado o projeto de uma interface homem-máquina e de um circuito de medição do consumo de energia, ambos com o objetivo de fornecer informações da recarga ao usuário, e assim melhorar a experiência do mesmo ao utilizar a estação de recarga. Por fim, foram realizados todos os testes exigidos nas normas internacionais buscando verificar se a estação de recarga está cumprindo todas as exigências.

Palavras-chave: Veículo elétrico. Carregador de veículo elétrico. Estação de recarga de veículo elétrico.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A MODE 3 ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATION

AUTHOR: Jonas Menon da Rosa

ADVISOR: Cassiano Rech

The amount of electric vehicles (EV's) sold annually has grown exponentially over the last decade around the world, and one of the main questions for customers interested in purchasing an EV is how they can recharge their vehicles at home. There are two economically viable ways to do this: one is to use the portable charger that is provided by the manufacturer together with the VE, and the other one is to use an electric vehicle charging station, being the second option the fastest way between the two. This way, there will be an increase in demand for this equipment in the coming years. With this in mind, this work has the objective of developing an electric vehicle charging station suitable for installation in a residential environment. An electric vehicle charging station is nothing more than equipment that is connected to the building's electrical grid and makes energy available safely and reliably to the EV so that it can recharge its batteries. Following the recommendations and requirements of international standards were designed the protection circuits, communication with the EV, and detection of the recharging cable. The design of a human-machine interface and an energy consumption measurement circuit were also carried out, both to provide to the user with information on recharging and thus improving the user experience when using the charging station. Finally, all the tests required by international standards were carried out in order to verify that the recharging station is complying with all the requirements.

Keywords: Electric vehicle. Electric vehicle charger. Electric vehicle charging station.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modo 1 de recarga.	17
Figura 2.2 – Modo 2 de recarga.	18
Figura 2.3 – Modo 3 de recarga.	19
Figura 2.4 – Modo 4 de recarga.	20
Figura 2.5 – Conector SAE J1772.	23
Figura 2.6 – Conector CCS Tipo 2.	24
Figura 2.7 – Circuito piloto.	25
Figura 2.8 – Máquina de estados da recarga.	29
Figura 3.1 – Diagrama de blocos da estação.	30
Figura 3.2 – Circuito de alimentação e proteção da estação de recarga.	32
Figura 3.3 – Circuito de comando da contatora.	34
Figura 3.4 – Contatora e seu circuito de comando após a implementação.	34
Figura 3.5 – Circuito da fonte auxiliar de alimentação após a implementação.	36
Figura 3.6 – Conexão dos sensores de tensão e corrente.	37
Figura 3.7 – Fluxograma simplificado da programação utilizada.	38
Figura 3.8 – Circuito de condicionamento do sinal PWM.	39
Figura 3.9 – Condicionamento do sinal V_A	41
Figura 3.10 – Circuito de condicionamento do sinal piloto e do sinal V_A após a implementação.	41
Figura 3.11 – Circuito de medição da resistência presente no pino proximidade.	42
Figura 3.12 – Circuito do microcontrolador e detecção do cabo de recarga após a implementação.	43
Figura 3.13 – Circuito de condicionamento dos sinais da medição.	44
Figura 3.14 – Circuito de medição do consumo de energia e seu circuito de condicionamento do sinal após a implementação.	46
Figura 3.15 – Caso B de conexão entre a estação de recarga e o VE.	47
Figura 3.16 – Circuito de acionamento da trava do soquete.	48
Figura 3.17 – Diagrama de blocos da interface homem-máquina.	49
Figura 3.18 – Circuito da interface homem-máquina após a implementação.	50
Figura 4.1 – Circuito do emulador do cabo de recarga.	51
Figura 4.2 – Circuito do emulador do cabo após a implementação.	52
Figura 4.3 – Emulador de estados utilizados.	55
Figura 4.4 – Circuito do emulador de estados após a implementação.	56
Figura 5.1 – Frequência do sinal PWM gerado pelo circuito piloto do lado da estação.	59
Figura 5.2 – Tensões obtidas para a parcela positiva e negativa do PWM do estado A2.	60
Figura 5.3 – Tensões obtidas para a parcela positiva e negativa do PWM do estado B2.	61
Figura 5.4 – Tensões obtidas para a parcela positiva e negativa do PWM do estado C2.	62
Figura 5.5 – PWM com razão cíclica de 5 %.	63
Figura 5.6 – PWM com razão cíclica de 10 %.	64
Figura 5.7 – Codificação através da razão cíclica do PWM da corrente máxima que a estação pode fornecer.	65
Figura 5.8 – Tempo de subida para o estado B2.	67

Figura 5.9 – Tempo de subida para o estado C2.	68
Figura 5.10 – Tempo de descida para o estado B2.	69
Figura 5.11 – Tempo de descida para o estado C2.	69
Figura 5.12 – Tempo necessário para o fechamento dos contatos principais da contadora.	71
Figura 5.13 – Tempo necessário para a abertura dos contatos principais da contadora.	72
Figura 5.14 – Resultados da transição do estado A1 para o B1.	73
Figura 5.15 – Resultados da transição do estado B1 para o B2.	74
Figura 5.16 – Resultados da transição do estado B2 para o C2.	75
Figura 5.17 – Resultado da transição do estado C2 para o B2.	76
Figura 5.18 – Estado C2, com cabo emulado de 32 A, e razão cíclica representando 32 A.	77
Figura 5.19 – Estado C2, com cabo emulado de 20 A, e razão cíclica representando 32 A.	78
Figura 5.20 – Estado C2, com cabo emulado de 20 A, e razão cíclica representando 20 A.	78
Figura 5.21 – Resultado da transição do estado B2 para o A2.	79
Figura 5.22 – Resultado da transição do estado A2 para o A1.	80
Figura 5.23 – Resultado da interrupção do condutor de proteção.	81
Figura 5.24 – Resposta da estação em reação a um curto-circuito entre o condutor de proteção e o piloto.	82
Figura 5.25 – Tensão e corrente na carga.	83
Figura 5.26 – Resultado do circuito de condicionamento de tensão.	84
Figura 5.27 – Resultado do circuito de condicionamento de corrente.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Capacidade do banco de baterias, potência do conversor, e potência do IC-CPD dos principais VE vendidos no Brasil.	20
Tabela 2.2 – Estimativa do tempo necessário para realizar uma recarga completa utilizando diferentes opções de carregadores.	21
Tabela 2.3 – Soquetes utilizado nos principais veículos elétricos vendidos no Brasil. .	24
Tabela 2.4 – Interpretação da resistência presente no contato proximidade.	25
Tabela 2.5 – Codificação da corrente máxima através da largura de pulso do PWM. ...	26
Tabela 2.6 – Interpretação da parcela superior do sinal no ponto V_A	28
Tabela 3.1 – Potência de cada um dos circuitos alimentados pelo conversor.	35
Tabela 4.1 – Tensões V_A que devem ser emuladas para os testes da estação.	53
Tabela 4.2 – Valores de resistência necessários para o emular os estados do veículo elétrico.	54
Tabela 5.1 – Resultados do emulador do cabo.	57
Tabela 5.2 – Resultados obtidos do emulador de estados.	58
Tabela 5.3 – Limites de tensão do sinal PWM para cada estado.	60
Tabela 5.4 – Outras possíveis correntes máximas permitidas durante a recarga.	65
Tabela 5.5 – Tempo de subida e descida do PWM em V_A	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABVE	Associação Brasileira do Veículo Elétrico
AD	Analógico-digital
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CCS	Sistema de recarga combinado
CP	Condutor piloto
DSP	Processador digital de sinais
GEPOC	Grupo de Eletrônica de Potência e Controle
IEC	International Electrotechnical Commission
PE	Condutor de proteção
PP	Contato proximidade
PWM	Modulação por largura de pulso
SAE	Society of Automotive Engineers
TBJ	Transistor bipolar de junção
V_A	Tensão no condutor piloto
VE	Veículo elétrico

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampère
A_{RMS}	Corrente eficaz
A_V	Ganho de tensão
Hz	Hertz
mA	Miliampère
mm ²	Milímetros quadrados
ms	Milissegundos
μs	Microsssegundos
Ω	Ohm
V	Volts
V_{pico}	Volts de pico
V_{CA}	Tensão eficaz alternada
V_{RMS}	Tensão eficaz

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO	14
1.2	PROPOSTA	15
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2	ESTAÇÕES DE RECARGA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS	16
2.1	HISTÓRICO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS	16
2.2	MODOS DE RECARGA	16
2.2.1	Modo 1	17
2.2.2	Modo 2	17
2.2.3	Modo 3	18
2.2.4	Modo 4	19
2.2.5	Tempo de recarga	20
2.3	REQUISITOS DE SEGURANÇA	22
2.3.1	Aterramento das partes	22
2.3.2	Chave comutadora	22
2.3.3	Proteção contra sobrecarga	22
2.3.4	Proteção contra poeira e água	22
2.3.5	Proteção contra correntes de fuga	23
2.4	PLUGUES E SOQUETES	23
2.4.1	SAE J1772	23
2.4.2	CCS Tipo 2	24
2.5	IDENTIFICAÇÃO DO CABO DE RECARGA	24
2.6	COMUNICAÇÃO ENTRE A ESTAÇÃO E O VEÍCULO	25
2.6.1	Informações fornecidas pela estação	26
2.6.2	Informações fornecidas pelo veículo elétrico	27
2.6.3	Estados da recarga	27
3	PROJETO DA ESTAÇÃO DE RECARGA	30
3.1	CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO E PROTEÇÃO	31
3.2	CHAVE COMUTADORA	32
3.3	FONTE AUXILIAR DE ALIMENTAÇÃO	35
3.4	SISTEMA DE MEDIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA	36
3.5	CIRCUITO DE CONTROLE E CONDICIONAMENTO DO SINAL	38
3.5.1	Função piloto	39
3.5.2	Pino proximidade	42
3.5.3	Condicionamento do sinal da medição de energia	43
3.6	SOQUETE E CABO DE RECARGA	46
3.7	GABINETE	48
3.8	INTERFACE HOMEM-MÁQUINA	49
4	PROJETO DOS CIRCUITOS DE TESTE DA ESTAÇÃO DE RECARGA	51
4.1	EMULADOR DO CABO DE RECARGA	51
4.2	EMULADOR DE ESTADOS DO VEÍCULO ELÉTRICO	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1	RESULTADOS DO EMULADOR DO CABO DE RECARGA	57
5.2	RESULTADOS DO EMULADOR DE ESTADOS	57

5.3	RESULTADOS DA ESTAÇÃO DE RECARGA	58
5.3.1	Frequência do sinal PWM	59
5.3.2	Limites de tensão do sinal PWM	60
5.3.3	Codificação da corrente máxima disponível ao veículo	62
5.3.4	Tempo de subida e descida do PWM	66
5.3.5	Tempo de resposta da contatora.....	70
5.3.6	Resposta da estação em reação as transições de estados	72
5.3.6.1	<i>Transição do estado AX para o BX (Sequência 1.1)</i>	<i>73</i>
5.3.6.2	<i>Transição do estado B1 para o B2 (Sequência 3.1).....</i>	<i>73</i>
5.3.6.3	<i>Transição do estado B2 para o C2 (Sequência 4).....</i>	<i>75</i>
5.3.6.4	<i>Transição do estado C2 para o B2 (Sequência 8.1).....</i>	<i>75</i>
5.3.6.5	<i>Sequência 6 da IEC 61851-1</i>	<i>76</i>
5.3.6.6	<i>Transição do estado BX para o AX (Sequência 2.1)</i>	<i>79</i>
5.3.6.7	<i>Transição do estado A2 para o A1 (Sequência 9.3).....</i>	<i>80</i>
5.3.6.8	<i>Conclusões da resposta da estação as transições de estados.....</i>	<i>80</i>
5.3.7	Resposta da estação em reação a perda do condutor de proteção	81
5.3.8	Resposta da estação em reação a um curto-circuito no condutor piloto ..	81
5.4	RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE ENERGIA	82
6	CONCLUSÃO	86
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

O número de veículos rodando nas ruas cresce a cada ano. Somente em 2018 foram licenciados 2,5 milhões de veículos leves no Brasil segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores - ANFAVEA (2019), sendo a grande maioria destes a combustão interna. Entretanto, utilizar combustíveis fósseis no setor de transportes causa diversos prejuízos ambientais, em virtude da emissão de poluentes na atmosfera (JACINTO et al., 2018).

Por sua vez, os veículos elétricos (VE's) não emitem nenhum gás poluente, e devido ao aumento das preocupações ambientais o interesse nestes veículos vem aumentando nos últimos anos (CASTRO; FERREIRA, 2010). Aliado a isso, o desenvolvimento de novas tecnologias de armazenamento de energia, tais como as baterias de lítio-íon tornou mais viável a construção e melhorou o desempenho dos veículos elétricos (LAFUENTE, 2011).

Porém, para rodarem estes veículos precisam ser recarregados e o processo de recarga tende a ser lento. No entanto, pode ser feito em qualquer lugar, bastando para isso a existência de um carregador que esteja adequado as características da rede elétrica disponível e o VE (SEBASTIÃO, 2014).

Em relação a velocidade de recarga a norma internacional IEC 61851-1 (2017) considera que há quatro modos de carregamento, sendo o Modo 1 o modo de carregamento mais lento e que drena menor corrente da rede elétrica, e o Modo 4 o modo mais rápido e que drena maior corrente da rede elétrica. Além disso, também há diferenças na forma como a energia é disponibilizada ao VE. Os Modos 1, 2 e 3 fornecem energia ao VE em corrente alternada, e o Modo 4 fornece energia em corrente contínua.

Atualmente, o Modo 1 é raramente utilizado devido ao seu baixo nível de proteção, sendo inclusive proibido em alguns países. O Modo 2 é essencialmente residencial. O Modo 3 pode ser utilizado tanto em ambientes residenciais, quanto em postos de recarga. Já o Modo 4 são as estações de recarga rápida, comumente instaladas em rodovias.

Os veículos elétricos novos costumam ser vendidos com um carregador portátil com proteção e controle em seu próprio cabo, comumente chamado de IC-CPD (IEC 62752, 2016). Este carregador pertence ao Modo 2 de recarga, sendo monofásico, e usualmente possuindo corrente máxima de 10 A, para que possa se adequar as tomadas residenciais (APTIV, 2016). Já as estações de recarga Modo 3 podem ser monofásicas ou trifásicas, e possuem corrente máxima de até 32 A, permitindo assim uma recarga ao menos três vezes mais rápida segundo a ABVE (2020).

1.2 PROPOSTA

Para evitar quaisquer riscos durante o carregamento dos veículos elétricos é necessário que as estações de recarga possuam algumas proteções e que as mesmas cumpram com as exigências estabelecidas em normas (GRASSI, 2019). Logo a segurança e a confiabilidade são requisitos indispensáveis de uma estação de recarga.

No mercado existem diversas estações de recarga de vários fabricantes, porém por serem um produto novo no mercado as mesmas costumam ser muito simples, entregando pouquíssimas informações ao usuário sobre a recarga, ou com preços elevados, tornando-as pouco atraentes aos proprietários de veículo elétrico que desejam instalar a mesma em casa.

Assim, este trabalho tem por finalidade desenvolver uma estação de recarga de veículos elétricos Modo 3 monofásica, alimentada em 220 V, com corrente máxima de 32 A, de baixo custo, segura, focada em instalações residenciais, e adequada à rede elétrica e as normas brasileiras.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em 6 capítulos. No capítulo 1 é apresentada a introdução, contendo a motivação, a contextualização, a proposta do trabalho, e as contribuições. No capítulo 2 é apresentado o estado da arte da tecnologia de estações de recarga para veículos elétricos, além das normas vigentes relacionadas a este assunto.

No capítulo 3 são apresentadas as partes que compõem a estação de recarga e o projeto de cada uma delas. No capítulo 4 são mostrados os projetos dos circuitos de teste da estação de recarga. No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante os testes da estação de recarga. No capítulo 6 são descritas as conclusões acerca do trabalho, sugestões de possíveis melhorias, e propostas para futuros trabalhos.

2 ESTAÇÕES DE RECARGA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

Neste capítulo é realizada uma contextualização sobre o estado da arte da tecnologia de carregadores de veículos elétricos, apresentando um breve histórico dos veículos elétricos, os diferentes tipos de carregadores, as suas características, e as formas de conexão do carregador ao veículo elétrico. Serão também apresentados os principais aspectos presentes nas normativas que regulamentam o desenvolvimento de estações de recarga, além dos conceitos técnicos de maior relevância para o desenvolvimento do trabalho.

2.1 HISTÓRICO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

O desenvolvimento de veículos elétricos e conseqüentemente seus carregadores, embora para muitos possa parecer recente, na verdade já possui uma longa história (BARAN; LEGEY, 2011). Os primeiros carros elétricos surgiram ainda no século XIX, quando foram desenvolvidas as primeiras baterias e motores elétricos (AZEVEDO, 2018). Estes primeiros veículos possuíam uma baixa autonomia e acabaram perdendo o mercado para seu concorrente, os automóveis a combustão interna (BARASSA, 2015). Porém, com o avanço na tecnologia de baterias e o advento da eletrônica de potência, estes veículos voltaram a ter uma autonomia similar aos carros a combustão, tornando-os assim, novamente interessantes ao público (SARLIOGLU et al., 2017).

Segundo a International Energy Agency (2020) há uma tendência de os carros elétricos de passeio convergirem para uma autonomia de 400 km, com isso, a capacidade correspondente do seu banco de baterias ficará em torno de 80 kWh. Tamanha capacidade demanda um carregador compatível. Tendo isso em vista, diversas empresas fabricam hoje carregadores para veículos elétricos, e para normatizar estes carregadores existem agências internacionais (HANAUER, 2018) sendo as principais: a International Electrotechnical Commission (IEC) e a Society of Automotive Engineers (SAE).

2.2 MODOS DE RECARGA

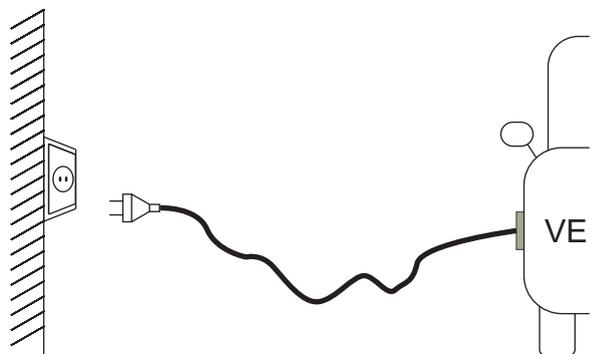
Tanto a SAE quanto a IEC definem distintos tipos de carregadores, que resultam em diferentes velocidades de recarga (FALVO et al., 2014), sendo o classificação mais adotado no Brasil a estabelecida pela International Electrotechnical Commission (IEC), que possui 4 modos de carregamento (RODRIGUES et al., 2014). Além disso, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) segue as recomendações estabelecidas pela IEC

(BALEN et al., 2019), logo este trabalho focou em apresentar os conceitos da forma como aparecem na norma internacional IEC 61851-1 (2017) que regulamenta os sistemas de recarga condutiva de veículos elétricos.

2.2.1 Modo 1

No Modo 1, um cabo contendo um plugue compatível com as tomadas residenciais é utilizado para conectar a rede elétrica ao VE, e internamente no veículo é realizada a conversão da energia e o carregamento das baterias. A corrente máxima permitida nas normas para esse modo de recarga é de 16 A, e a tensão máxima é de 250 V_{CA} para alimentação monofásica e 480 V_{CA} para alimentação trifásica. Este método de carregamento está atualmente obsoleto, devido a sua baixa segurança, inclusive sendo proibido em alguns países segundo Bräunl (2012). A Figura 2.1 exemplifica como é realizada a conexão entre o VE e a rede elétrica neste modo de recarga.

Figura 2.1 – Modo 1 de recarga.



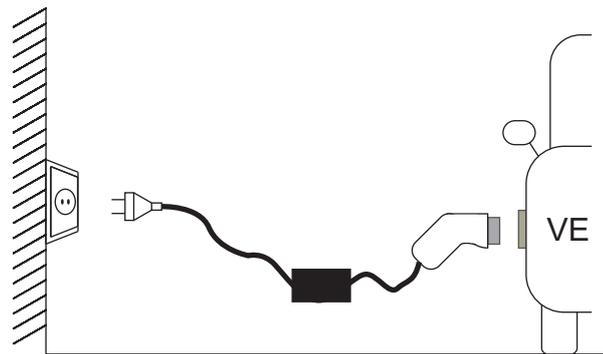
Fonte: Autor.

2.2.2 Modo 2

No Modo 2, ao contrário do Modo 1, entre o plugue da tomada e o veículo existem itens de proteção e controle (LUYTEN et al., 2013). Este carregador é comumente chamado de IC-CPD do inglês *In-cable control and protection device*. E costuma ser um dos itens inclusos quando um veículo elétrico é adquirido. As normas internacionais permitem que a corrente máxima seja de até 32 A neste modo de recarga. Porém, por continuar

sendo conectado a rede elétrica através da tomada, os fabricantes deste carregador costumam projetar o mesmo para que sua corrente nominal seja igual ou menor a 20 A, tornando assim lenta a recarga das baterias. A Figura 2.2 mostra como é realizada a conexão no Modo 2.

Figura 2.2 – Modo 2 de recarga.

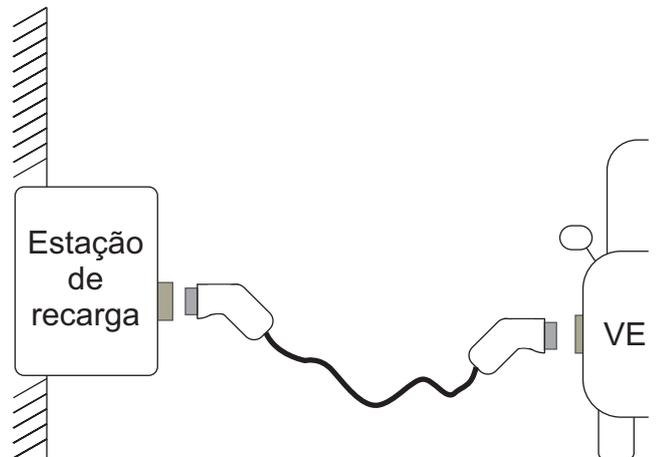


Fonte: Autor.

2.2.3 Modo 3

Assim como os dois modos anteriores, o Modo 3 disponibiliza a energia ao VE em corrente alternada, e no interior do VE há um conversor estático que realiza a recarga das baterias. O Modo 3 apresenta a vantagem quando comparado aos carregadores anteriores, de manter-se permanentemente conectado ao quadro de disjuntores da edificação, podendo assim, drenar a máxima corrente permitida pela norma, não sendo necessário adequá-lo a corrente máxima permitida pelas tomadas (RATA et al., 2020). A corrente máxima para este modo de recarga é de 32 A por fase. Os valores de tensão máxima são os mesmos dos modos anteriores. Além disso, este equipamento deve possuir diversas proteções, garantindo assim, segurança completa ao usuário, a rede elétrica, e o VE. A Figura 2.3 apresenta o Modo 3 de recarga.

Figura 2.3 – Modo 3 de recarga.

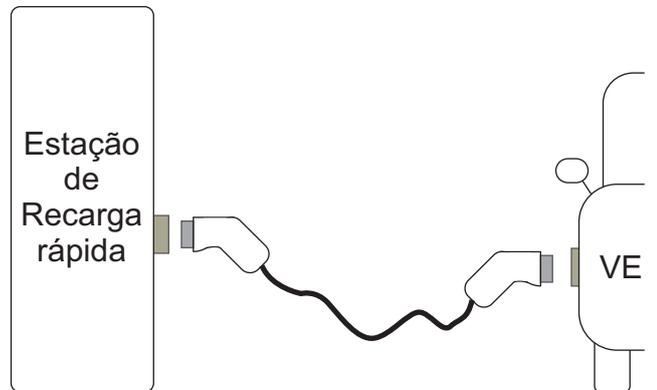


Fonte: Autor.

2.2.4 Modo 4

No Modo 4 de recarga diferentemente do modo 3, o carregador apresenta um conversor estático que converte corrente alternada em corrente contínua, dessa forma é possível carregar mais rapidamente o veículo elétrico, visto que a potência do conversor estático do carregador modo 4 costuma ser dezenas de vezes maior do que a potência do conversor presente no veículo (POPOV; TYBEL; SCHUGT, 2014). Porém o custo desse carregador é muito elevado, não sendo adequado para uso individual, e conseqüentemente residencial. A Figura 2.4 apresenta

Figura 2.4 – Modo 4 de recarga.



Fonte: Autor.

2.2.5 Tempo de recarga

A Tabela 2.1 apresenta alguns dos principais veículos puramente elétricos vendidos no Brasil, a capacidade do banco de baterias de cada um deles, a potência do conversor interno ao VE que realiza a recarga da bateria, e a potência do IC-CPD fornecido juntamente com o VE.

Tabela 2.1 – Capacidade do banco de baterias, potência do conversor, e potência do IC-CPD dos principais VE vendidos no Brasil.

Marca/Modelo	Capacidade da bateria (kWh)	Potência do conversor do VE (kW)	Potência do IC-CPD fornecido (kW)
BMW i3	27,2	11	2,4
Chevrolet Bolt	66	7,4	2,2
JAC iEV20	41	7,4	2,2
Nissan Leaf	40	6,6	2,2
Renault Zoe	41	22	2,2

Fonte: BMW (2020), Chevrolet (2020), JacMotors (2020), Nissan (2020), Renault (2020).

Como pode-se observar na Tabela 2.1, a potência do IC-CPD que é fornecido juntamente com o VE é menor do que a potência do conversor que está interno ao VE. Dessa forma, ao utilizar o carregador portátil fornecido pelo fabricante, o proprietário do VE está subutilizando o conversor interno ao VE, e tornando a recarga mais lenta do que o necessário. A Tabela 2.2 apresenta uma estimativa do tempo necessário para recarregar

completamente o banco de baterias de cada um dos VE mencionados anteriormente, considerando que elas estão completamente descarregadas, e que a potência durante o carregamento será constante e igual a potência de cada um dos carregadores apresentados na tabela.

Tabela 2.2 – Estimativa do tempo necessário para realizar uma recarga completa utilizando diferentes opções de carregadores.

Fabricante/Modelo	Tempo necessário para recarregar		
	ICP-CPD fornecido	Estação de recarga monofásica (7,1 kWh)	Estação de recarga trifásica (22 kWh)
BMW i3	11h20min	3h50min	2h30min
Chevrolet Bolt	30h00min	9h20min	9h20min
JAC iEV20	18h40min	5h50min	5h50min
Nissan Leaf	18h20min	6h05min	6h05min
Renault Zoe	18h40min	5h50min	1h50min

Fonte: Autor.

Como é possível ver na Tabela 2.2 o tempo total da recarga diminui significativamente ao utilizar estações de recarga ou invés do ICP-CPD que é fornecido junto com o veículo. Isso acontece devido ao fato de a estação de recarga possuir uma potência maior do que o carregador portátil fornecido pelo fabricante.

Percebe-se também que três dos cinco veículos citados não apresentam nenhuma alteração no tempo de recarga quando são comparados os modelos monofásicos e trifásicos de estações de recarga. Isso deve-se ao fato de o conversor interno ao veículo não possuir potência suficiente para aproveitar a maior disponibilidade de energia da estação de recarga trifásica.

Logo, devido ao custo menor de produção de uma estação de recarga monofásica, e o fato das estações trifásicas não significarem uma redução no tempo de recarga para alguns dos VE atualmente disponíveis, mostra-se mais vantajoso e apropriado o desenvolvimento de uma estação de recarga monofásica.

Outro detalhe que podemos observar através da Tabela 2.2 é que os tempos obtidos são compatíveis com o tempo que o VE costuma ficar na garagem durante a noite e a madrugada. Logo, este é um bom horário para recarregar o VE utilizando estação de recarga.

2.3 REQUISITOS DE SEGURANÇA

As estações de recarga necessitam cumprir com alguns requisitos mínimos de segurança. Esta seção apresentará os principais requisitos exigidos em normas.

2.3.1 Aterramento das partes

Todas as estações de recarga necessitam possuir condutor de proteção, e assim como suas partes metálicas expostas, o mesmo deve estar devidamente conectado ao sistema de aterramento conforme recomendações da NBR 5410 (2004). Na perda do condutor de proteção a estação de recarga deve automaticamente interromper o fornecimento de energia.

2.3.2 Chave comutadora

A chave comutadora que comanda o fornecimento de energia deve possuir corrente nominal de operação maior ou igual a corrente máxima que a estação pode fornecer, ter um tempo de atuação menor do que 100 ms, e estar de acordo com a norma IEC 60947-4-1 (2018) ou IEC 61810-1 (2015). Logo a chave comutadora pode ser uma contatora ou um relé.

2.3.3 Proteção contra sobrecarga

A proteção contra sobrecarga pode ser realizada através de disjuntor, fusível, ou a combinação dos dois. Sendo que o tempo de atuação deve ser menor ou igual a 1 minuto caso a corrente exceda 1,3 vezes a corrente permitida pelo cabo de recarga.

2.3.4 Proteção contra poeira e água

Estações de recarga instaladas em ambientes internos necessitam possuir grau de proteção mínimo contra poeira e água igual a IP41. Caso instaladas em ambientes externos o grau mínimo de proteção é IP44.

2.3.5 Proteção contra correntes de fuga

As estações de recarga precisam ser protegidas contra correntes de fuga alternadas, ou contínuas pulsadas maiores ou iguais a 30 mA, e correntes puramente contínuas maiores que 6 mA. Quando isso acontecer, o fornecimento de energia deve ser imediatamente interrompido, assim como todas as condutores vivos devem ser desenergizados.

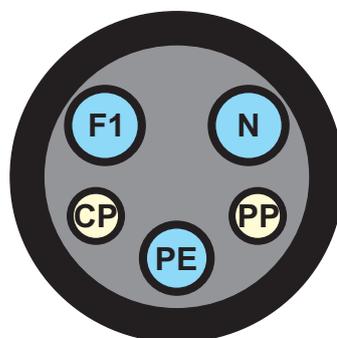
2.4 PLUGUES E SOQUETES

Como os fabricantes de veículos elétricos estão espalhados pelo globo, e inicialmente não havia um padrão mundial de plugues e soquetes, cada região criou seu padrão e os veículos produzidos em sua área de influência seguiram seus modelos (FOLEY; WINNING; Ó GALLACHÓIR, 2010). São ao menos 3 modelos de soquetes para recarga em corrente alternada, e 5 para recarga em corrente contínua (Tu et al., 2019). Como o foco aqui é recarga em corrente alternada, serão analisados apenas os dois principais acopladores desse modo de recarga.

2.4.1 SAE J1772

A América do Norte adotou o padrão SAE J1772 (2017), em que o plugue e o conector possuem 5 pinos, sendo eles: fase, neutro, de proteção, piloto, e proximidade. Sua trava de segurança é mecânica, e o travamento realizado pelo usuário, dessa forma permite erro humano.

Figura 2.5 – Conector SAE J1772.

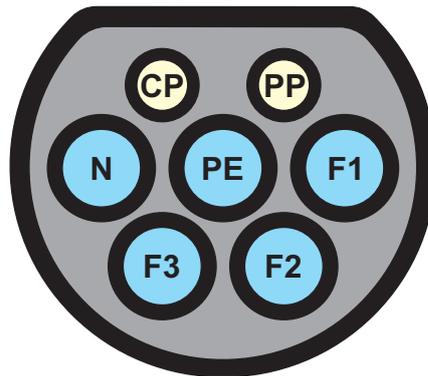


Fonte: Adaptado de IEC 62196-2 (2016).

2.4.2 CCS Tipo 2

Já na Europa o padrão mais utilizado é o CCS Tipo 2, possuindo a vantagem com relação ao anterior de ter dois condutores fase a mais, possibilitando assim, a recarga trifásica. Além disso, a trava de segurança é eletrônica, sendo o travamento realizado pela estação de recarga, logo não permite erro humano.

Figura 2.6 – Conector CCS Tipo 2.



Fonte: Adaptado de IEC 62196-2 (2016).

Logo neste trabalho será utilizado o padrão europeu de plugues e soquetes CCS Tipo 2, visto que ele possui maior nível de segurança, e é adotado na maioria dos veículos elétricos comercializados no Brasil, como mostra a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Soquetes utilizado nos principais veículos elétricos vendidos no Brasil.

Fabricante/Modelo	Conexão
BMW i3	CCS Tipo 2
Chevrolet Bolt	CCS Tipo 2
JAC iEV20	CCS Tipo 2
Nissan Leaf	SAE J1772
Renault Zoe	CCS Tipo 2

Fonte: BMW (2020), Chevrolet (2020), JacMotors (2020), Nissan (2020), Renault (2020).

2.5 IDENTIFICAÇÃO DO CABO DE RECARGA

Tanto a estação de recarga quanto o veículo elétrico identificam a conexão de um cabo de recarga através do pino proximidade (PP). Os plugues e soquetes do Tipo 2 CCS, utilizam esse pino também para informar a corrente nominal permitida pelo cabo de recarga. A codificação da corrente máxima do cabo é realizada através de uma resistência

que fica eletricamente conectada entre o pino proximidade e o proteção. A Tabela 2.4 mostra como deve ser realizada a interpretação da resistência presente no contato proximidade.

Tabela 2.4 – Interpretação da resistência presente no contato proximidade.

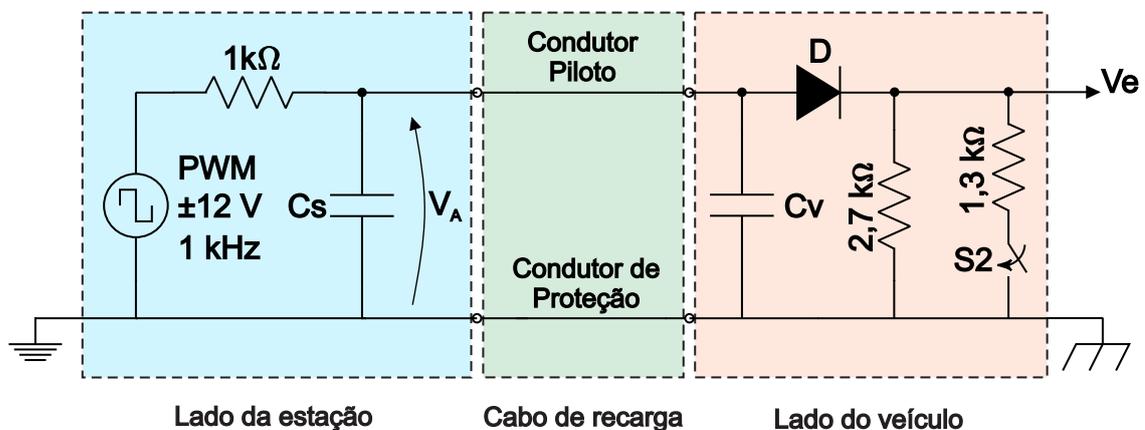
Interpretação da conexão	Corrente máxima do cabo (A)	Faixa de resistência (Ω)
Cabo desconectado	-	>4 500
Cabo conectado	13	1 100 - 2 460
Cabo conectado	20	400 - 936
Cabo conectado	32	164 - 308
Cabo conectado	63 (trifásico) /70 (monofásico)	80 - 140
Erro	-	<60

Fonte: Adaptado de IEC 61851-1 (2017).

2.6 COMUNICAÇÃO ENTRE A ESTAÇÃO E O VEÍCULO

A comunicação entre a estação de recarga e o veículo é realizada utilizando o condutor piloto (CP), e é chamada de função piloto. Para a função piloto funcionar é necessário o circuito piloto, que pode ser dividido em duas partes: a parte da estação, e a parte do veículo, sendo estas duas partes conectadas através do condutor de recarga. A Figura 2.7 apresenta o circuito piloto.

Figura 2.7 – Circuito piloto.



Fonte: Adaptado de IEC 61851-1 (2017).

Como pode-se ver na Figura 2.7 o lado da estação de recarga apresenta um gerador de ondas quadradas com modulação por largura de pulso (PWM), com valores de pico de ± 12 V, frequência de 1 kHz, e a resistência de saída de 1 k Ω . Há ainda o capacitor Cs, que tem a função de filtrar ruídos em alta frequência. O lado do Veículo apresenta o capacitor Cv, além de um diodo e uma associação de resistores.

2.6.1 Informações fornecidas pela estação

A estação de recarga informa ao veículo elétrico (VE) através da razão cíclica do PWM, se ela está ou não pronta para realizar a recarga. Caso não esteja disponível, a razão cíclica será de 0 ou 100 %. Caso ela esteja disponível, a razão cíclica do PWM fica entre 5 e 96 %, sendo a razão cíclica a forma de informar ao VE a corrente máxima que ele pode drenar naquele momento.

A corrente máxima que a estação pode fornecer leva em consideração a corrente máxima do cabo de recarga, e a disponibilidade de energia da fonte. A Tabela 2.5 apresenta a forma como deve ser codificada a corrente máxima permitida pela estação através da largura de pulso do PWM.

Tabela 2.5 – Codificação da corrente máxima através da largura de pulso do PWM.

Corrente máxima	Razão cíclica (%)	Descrição
0 A	0	PWM = -12 V, estação de recarga necessita de reparo
	100	PWM = +12 V, estação não está pronta para realizar recarga
Informada através de comunicação digital	5	Comunicação digital necessária em ambos os lados
Entre 6 e 51 A	(Corrente máxima/ 0,6 A)	Razão cíclica entre 10 e 85 %
Entre 51 e 80 A	(Corrente máxima/ 2,5 A) + 64	Razão cíclica entre 85 e 96 %

Fonte: Adaptado de IEC 61851-1 (2017).

O veículo elétrico deve medir a razão cíclica do PWM, interpretar qual é a corrente máxima que ele pode drenar através da Tabela 2.5, e não ultrapassar esse valor durante o carregamento das baterias.

2.6.2 Informações fornecidas pelo veículo elétrico

Como mostra a Figura 2.7, o circuito piloto do lado do VE possui o capacitor C_v , que assim como o capacitor C_s tem a função de filtrar ruídos em alta frequência, e uma associação de resistores que juntamente com o diodo D tem a função de atenuar a parcela positiva do sinal PWM gerado pela estação medido em V_A , de modo a comunicar à estação de recarga o estado do VE.

Quando o cabo de recarga não está conectado ao VE, a parcela superior do sinal no ponto V_A fica em + 12 V. Já quando o cabo é conectado ao veículo, o diodo juntamente com o resistor de $2,7\text{ k}\Omega$, promovem uma queda de tensão na parcela positiva do PWM, ficando essa parcela com valor de aproximadamente + 9 V.

Quando o veículo já está conectado, e reconhece que está pronto para receber energia, ele fecha a chave S_2 , gerando uma maior queda de tensão na parcela positiva do PWM, ficando esta parcela com tensão + 6 V em caso de o veículo não necessitar local ventilado, e + 3 V caso o veículo necessite local ventilado para a recarga. Quando o veículo conclui a recarga ele deve abrir a chave S_2 , informando que não está pronto para receber energia.

A estação deve identificar o estado do VE e controlar a chave contatora de forma a fornecer energia ao veículo somente quando ela e o veículo estiverem prontos para a recarga.

2.6.3 Estados da recarga

Existem ao todo 10 possíveis estados durante a recarga, sendo estes a combinação das condições do VE e da estação de recarga. Os estados são definidos através da parcela superior do sinal no ponto V_A . A Tabela 2.6 mostra como a interpretação desse sinal deve ser feita.

Tabela 2.6 – Interpretação da parcela superior do sinal no ponto V_A .

Tensão V_A (V)	Estação e VE conectados	VE pronto	Ventilação necessária	Estação pronta	Razão Cíclica do PWM (%)	Estado
11 a 13	Não	N/A	N/A	Não	100	A1
				Sim	5 a 96	A2
8 a 10	Sim	Não	N/A	Não	100	B1
				Sim	5 a 96	B2
5 a 7	Sim	Sim	Não	Não	100	C1
				Sim	5 a 96	C2
2 a 4	Sim	Sim	Sim	Não	100	D1
				Sim	5 a 96	D2
-1 a 1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	E
-12	N/A	N/A	N/A	Não	0	F

Fonte: Adaptado de IEC 61851-1 (2017).

Nota: N/A pode ser entendido como não afeta, ou não se aplica.

O estado E acontece quando há um curto circuito entre o condutor piloto e o proteção, logo não é um estado gerado pela estação de recarga ou pelo VE. Neste caso, tanto a estação quanto o VE devem interromper a recarga, já que não é possível realizar a comunicação.

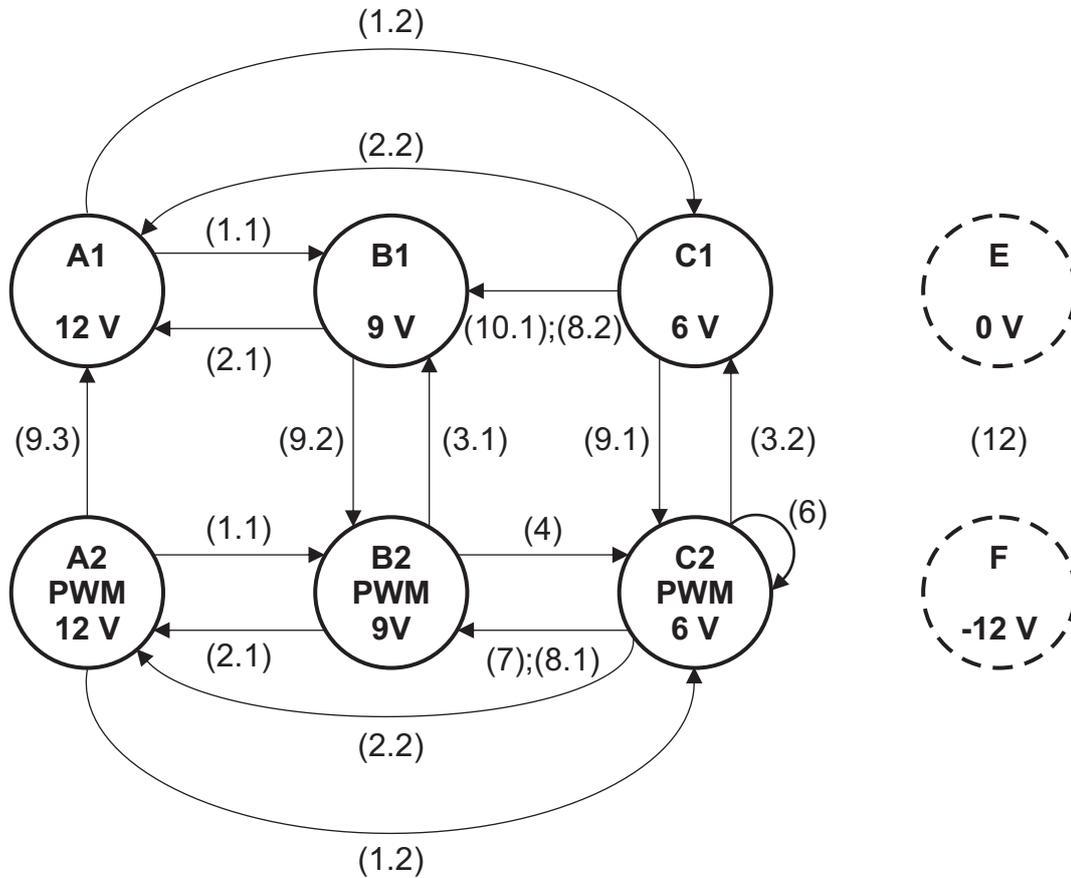
O estado F é intencionalmente gerado pela estação de recarga para demonstrar que ela necessita de manutenção, e é o único estado onde haverá apenas a parcela negativa do PWM.

Os estados A1, B1, C1 e D1 diferem dos estados A2, B2, C2 e D2 respectivamente, apenas por não apresentarem a parcela negativa do PWM, ou seja, sua razão cíclica é de 100 %. Já os estados A2, B2, C2 e D2 (comumente abreviados por X2) possuem tanto a parcela positiva quanto negativa do PWM, visto que a sua razão cíclica está entre 5 e 96 %. Dessa forma, quando são referidos os estados que possuem razão cíclica de 100 % utiliza-se a sigla X1 (referindo-se aos estados A1, B2, C1 e D1), e os estados que apresentam razão cíclica entre 5 e 96 % utiliza-se a sigla X2 (referindo-se aos estados A2, B2, C2 e D2).

Da mesma forma, quando deseja-se referir tanto ao estado A1 quanto ao A2, abrevia-se a escrita chamando apenas de AX, logo o X significa qualquer uma das opções.

A Figura 2.8 apresenta a máquina de estados da recarga contendo: os possíveis estados da recarga, a informação se naquele estado é realizada a codificando da máxima corrente que a estação pode fornecer ao VE (PWM), o valor da maior tensão medida em V_A naquele estado, as transições possíveis (setas), e o número que cada transição equivale em termos de sequência da Tabela A.6 da IEC 61851-1 (2017).

Figura 2.8 – Máquina de estados da recarga.



Fonte: Adaptado de IEC 61851-1 (2017).

Quando há uma das transições apresentadas na Figura 2.8, algumas ações devem ser tomadas pela estação e/ou pelo veículo elétrico. A Tabela A.6 da IEC 61851-1 (2017) apresenta essas ações. Por apresentar uma grande quantidade de informações, não serão descritos todos os detalhes de cada transição neste trabalho, serão descritas apenas as informações relevantes para a realização do projeto e dos testes da estação de recarga.

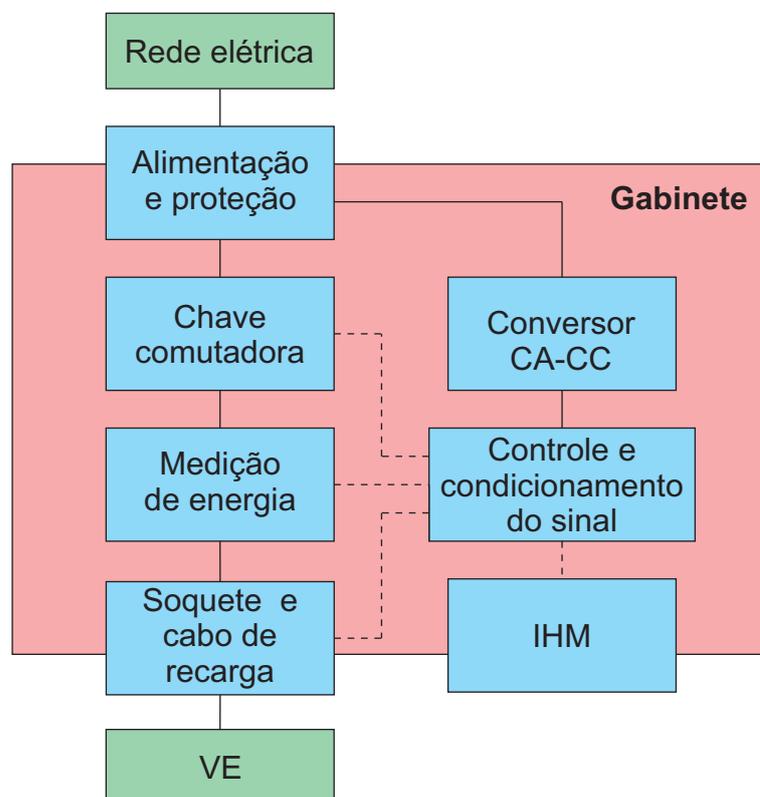
3 PROJETO DA ESTAÇÃO DE RECARGA

Neste capítulo serão apresentados os projetos de cada uma das partes que compõem a estação de recarga de veículo elétrico desenvolvida neste trabalho. A estação de recarga foi separada em 8 partes, listadas abaixo:

- Circuito de alimentação e proteção;
- Chave comutadora;
- Fonte auxiliar de alimentação;
- Circuito de controle e condicionamento do sinal;
- Soquete e cabo de recarga;
- Sistema de medição de energia;
- Interface homem-máquina;
- Gabinete.

O diagrama de blocos da Figura 3.1 apresenta a organização dessas partes.

Figura 3.1 – Diagrama de blocos da estação.



3.1 CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO E PROTEÇÃO

Sabendo que a estação de recarga será instalada em ambiente residencial e que a fonte de energia será a rede elétrica, pode-se realizar o projeto do circuito de alimentação e proteção da estação.

A conexão da estação de recarga à rede elétrica deve ser realizada no quadro geral de disjuntores da edificação. Onde um disjuntor termomagnético de 32 A curva C deve ser instalado exclusivamente para a alimentação da estação de recarga, garantindo assim, proteção contra sobrecarga.

Sabendo que 32 A é a corrente máxima que a estação pode fornecer ao veículo, pode-se dimensionar os condutores de alimentação. Embora alguns métodos de instalação da NBR 5410 (2004) permitam o uso de condutores de 4 mm², é recomendável a instalação de condutores de ao menos 6 mm² para a alimentação da estação de recarga.

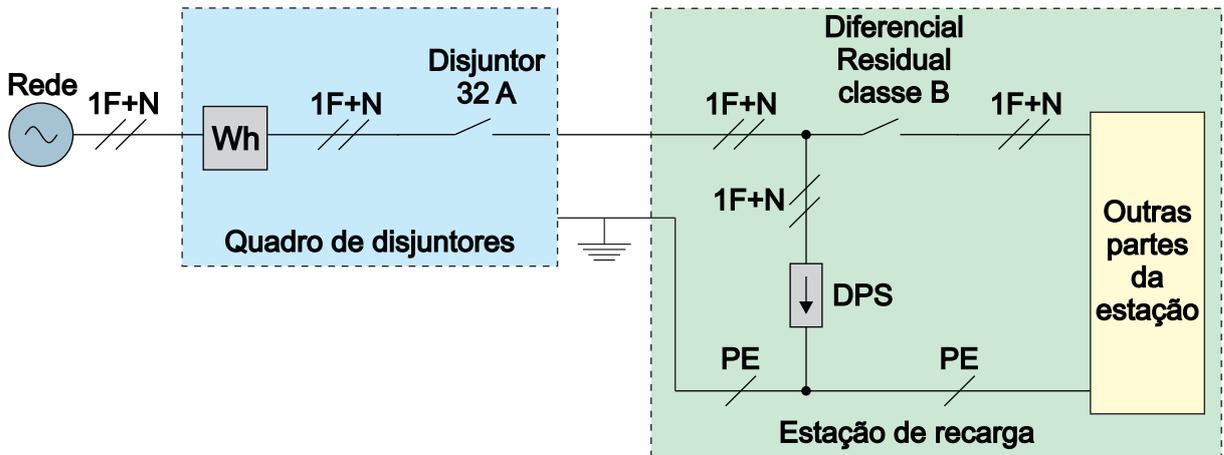
O condutor de proteção deve ter a mesma seção dos condutores de alimentação, e o sistema de aterramento deve estar de acordo com as exigências da NBR 5410 (2004).

Como exigido pelas normas IEC 61851-1 (2017) e SAE J1772 (2017), esta estação de recarga deve contar com proteção contra correntes de fuga. Esta proteção é garantida através de um interruptor diferencial residual classe B, que neste caso ficará dentro do gabinete da estação. Porém este interruptor diferencial residual também pode ser instalado no quadro geral de disjuntores, desde que fique a jusante do disjuntor termomagnético. A corrente nominal desse interruptor deve ser de 40 A, e a sensibilidade deve ser de 30 mA para corrente de fugas alternadas e contínuas pulsadas, e 6 mA para correntes puramente contínuas, assim como exigem as normas.

Além disso, a estação de recarga deve possuir dispositivo de proteção contra surtos (DPS). Este dispositivo ficará conectado entre os condutores de alimentação e o condutor de proteção, protegendo os componentes internos da estação contra sobretensões transitórias causadas por descargas atmosféricas e/ou manobras na rede.

Neste caso, é necessária a utilização de DPS Classe I/II, corrente nominal de 12,5 kA, corrente máxima de 60 kA, e tensão máxima transitória de 1,5 kV. A Figura 3.2 mostra como fica o circuito de alimentação e proteção da estação de recarga.

Figura 3.2 – Circuito de alimentação e proteção da estação de recarga.



Fonte: Autor.

3.2 CHAVE COMUTADORA

A chave comutadora possui a função de ser o mecanismo que controla a disponibilidade de energia ao veículo. Dessa forma, ela deve ser conectada aos condutores de alimentação, que neste caso são os condutores fase e neutro para redes monofásicas 220 V, e dois condutores fase para redes monofásicas 127 V. O condutor de proteção não pode sofrer comutação, logo não deve ser ligado a chave comutadora. A corrente nominal da chave comutadora deve ser maior ou igual a corrente máxima que a estação pode fornecer, ou seja, maior ou igual a 32 A.

Assim, torna-se adequada a utilização de contadoras para esse fim, visto que as mesmas são desenvolvidas para comutar circuitos nesta faixa de tensão e corrente. Assim, uma contadora com contatos normalmente abertos será utilizada, com corrente nominal de 32 A para a categoria de emprego AC-1.

Por conveniência, a bobina que é utilizada para comutar os contatos deve ter tensão de acionamento de 220 V CA, simplificando assim o acionamento, já que não será necessário realizar a conversão da energia que alimenta a estação.

Tendo estas características definidas, um possível modelo de contadora que pode ser utilizada é a contadora WEG CWB18. Este modelo possui tempos médios de abertura e fechamento dos contatos principais de 12 e 25 ms respectivamente, além de estar de acordo com a norma IEC 60947-4-1 (2018). Dessa forma, está adequada para ser utilizada nesta aplicação.

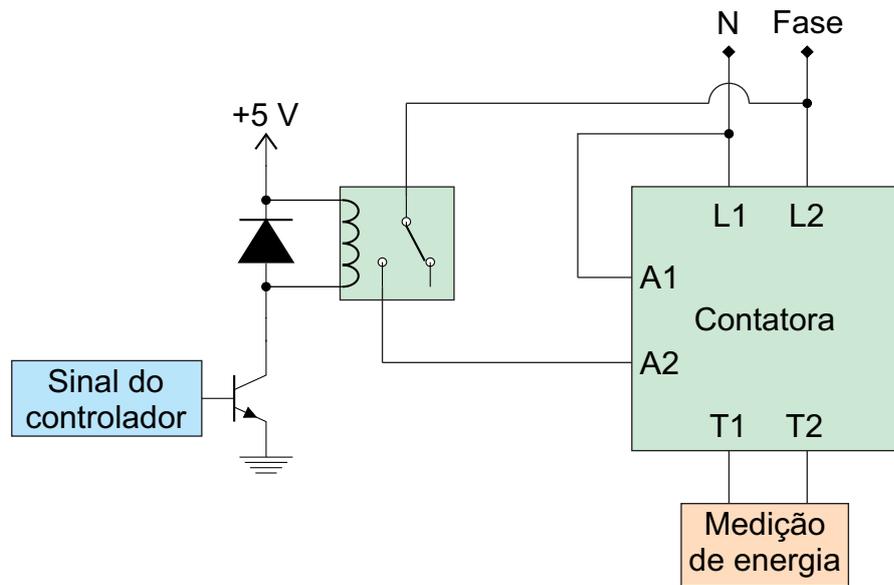
Sabendo que um microcontrolador será o responsável por enviar o sinal que co-

mandará a abertura e o fechamento dos contatos principais da contatora, é necessário um circuito de acionamento para adequar os níveis de tensão e corrente para que isso seja possível.

Primeiramente, deve-se dar um ganho na corrente do sinal de acionamento enviado pelo microcontrolador. Para isso, utiliza-se um transistor bipolar de junção (TBJ), com o emissor conectado a mesma referência do microcontrolador, o coletor conectado a uma carga, que por sua vez estará conectada a uma tensão positiva de 5 V, e a base conectada a respectiva saída do microcontrolador que comanda a contatora. Dessa forma garante-se que o sinal de corrente que passa pela carga tem a mesma informação do sinal que enviado pelo microcontrolador, porém com disponibilidade de corrente muito maior.

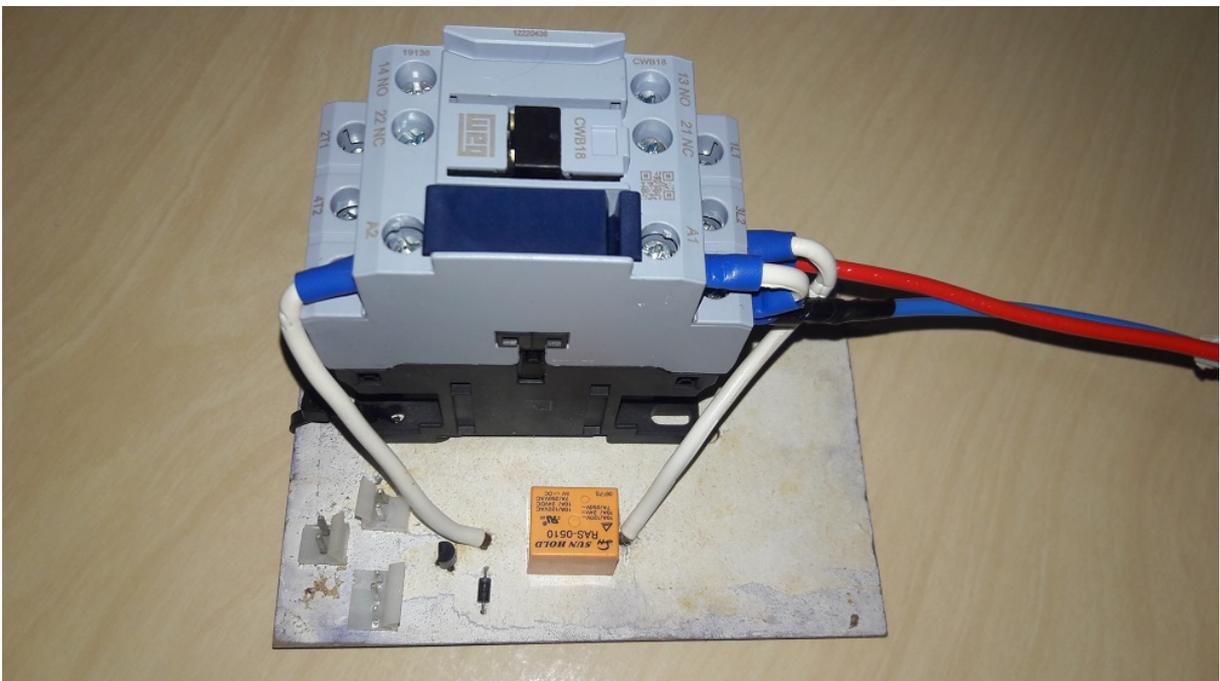
Em seguida, precisa-se adequar o nível de tensão, para que seja possível acionar a bobina da contatora. Sabendo que a tensão que alimenta a estação é a mesma que é necessária para acionar a bobina da contatora, pode-se utilizar um relé para realizar esta tarefa. O relé tem os terminais de sua bobina conectados entre a tensão positiva de 5 V e o coletor do TBJ, sendo a bobina do relé a carga mencionada anteriormente. O terminal comum do relé ficará conectado a um dos condutores de alimentação, e o terminal normalmente aberto conectado a um dos terminais da bobina da contatora. O outro terminal da bobina da contatora estará ligado diretamente ao outro condutor de alimentação. Assim, quando um sinal alto for enviado pelo microcontrolador a bobina da contatora será energizada e fechará seus contatos principais. Já quando houver um sinal baixo provindo do microcontrolador, a bobina da contatora será desenergizada e os contatos principais abrirão. A Figura 3.3 mostra o circuito elétrico associado ao acionamento da contatora. Já a Figura 3.4 mostra como ficou o circuito da contatora juntamente com o seu circuito de comando após a implementação.

Figura 3.3 – Circuito de comando da contatora.



Fonte: Autor.

Figura 3.4 – Contatora e seu circuito de comando após a implementação.



Fonte: Autor.

Devido a pandemia causada pelo novo coronavírus (SARS-CoV-2) a confecção de placas de circuito empresa no Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC) foi suspensa por alguns meses. Dessa forma, novas alternativas foram encontradas para não prejudicar o andamento do trabalho, e apesar da queda na qualidade final das placas, foi possível implementar todos circuitos necessários.

3.3 FONTE AUXILIAR DE ALIMENTAÇÃO

Como a fonte de energia da estação é a rede elétrica, e o circuito de controle e condicionamento do sinal trabalha com tensões contínuas, é necessário realizar a conversão da energia. Conversores CA-CC realizam essa função. Porém, este conversor CA-CC deve estar adequado as necessidades desta aplicação. Como a ideia é alimentar a estação em tensão alternada de 220 V, o conversor deve possuir especificações de tensão de entrada compatíveis com esse valor. Já a tensão de saída deve estar de acordo com as necessidades do circuito de controle e condicionamento do sinal.

A estratégia para determinar a tensão de saída do conversor, foi encontrar as maiores tensões necessárias no circuito de controle e condicionamento do sinal, que neste caso são de ± 12 V, pela necessidade de geração do sinal PWM. E a partir destas tensões gerar tensões menores utilizando reguladores de tensão.

A potência do conversor foi calculada a partir do consumo de energia dos circuitos que ele vai alimentar. A Tabela 3.1 mostra os circuitos e sua respectivas potências.

Tabela 3.1 – Potência de cada um dos circuitos alimentados pelo conversor.

Circuito	Tensão de alimentação (V)	Corrente máxima (mA)	Potência (W)
Controlador	3,3	50	0,165
Condicionamento do sinal PWM	± 12	20	0,24
Condicionamento do sinal da contatora	5	60	0,3
Condicionamento do sinal da medição	± 12	10	0,12
Condicionamento do sinal da trava do cabo	12	50	0,6
Interface homem-máquina	5	50	0,25
Total			1,675

Fonte: Autor.

Assim, sabe-se que a potência mínima do conversor CA-CC deve ser de 1,675 W, porém é adequado utilizar um conversor de potência maior, garantindo assim o correto funcionamento da estação de recarga mesmo que o consumo de energia seja maior do que o esperado.

Como mostrado a Tabela 3.1, além das tensões de ± 12 V, são necessária as tensões de 3,3 V e 5 V. Para gerar estas tensões serão utilizados dois reguladores de

tensão, o primeiro reduz de 12 V para 5 V, e o segundo reduz de 5 V para 3,3 V, garantindo assim que todas as tensões necessárias para o funcionamento da estação de recarga estarão disponíveis.

Tendo em vista o custo, a disponibilidade, a confiabilidade e a alta eficiência, foi utilizado neste trabalho um conversor CA-CC da empresa RECOM modelo RAC10-12DK, que pode ser alimentado com tensão de entrada entre 85 a 264 V CA, possui tensão de saída de ± 12 V, e potência de 10 W. Este conversor possui valor unitário de 10,78 dólares americanos ou aproximadamente 59,95 reais na data de 26 de setembro de 2020, além de certificados internacionais de segurança para aplicações industriais e residenciais, e eficiência energética maior que 85 %. A Figura 3.5 apresenta o circuito da fonte auxiliar de alimentação após a implementação.

Figura 3.5 – Circuito da fonte auxiliar de alimentação após a implementação.



Fonte: Autor.

3.4 SISTEMA DE MEDIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA

Com o objetivo de informar ao usuário da estação qual foi a energia consumida durante a recarga do veículo, a estação de recarga desenvolvida possuirá um sistema de medição do consumo de energia ativa. Esse sistema precisa ser capaz de medir a tensão e a corrente instantânea que está sendo fornecida ao veículo e enviar esses sinais ao controlador da estação. O controlador por sua vez recebe esses sinais e calcula a energia que foi fornecida ao veículo.

Porém, para que estes sinais representem corretamente os valores reais, é necessário escolher sensores que estejam adequados a grandeza a ser medida. Assim, o sensor

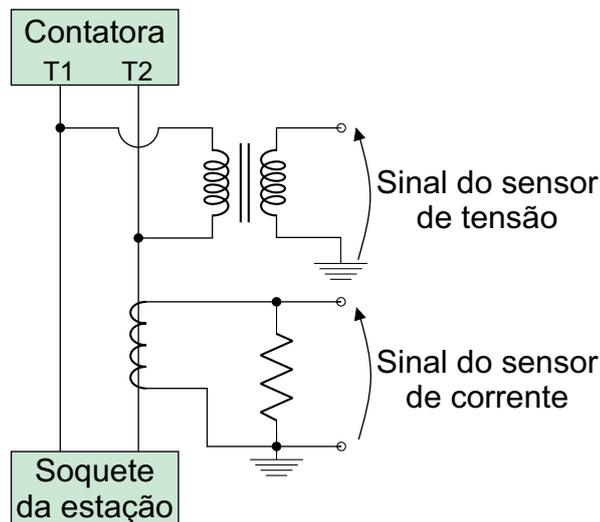
de tensão deve medir tensões alternadas de 220 V 60 Hz, e o sensor de corrente deve realizar medidas de corrente de pelo menos 32 A na mesma frequência. Ambos devem possuir isolamento para tensões de 220 V CA.

Além disso, deve-se levar em consideração que os sinais de saída dos sensores precisam ser interpretados pela unidade de controle, logo precisam ter baixas amplitudes de tensão. Dessa forma, mostra-se adequado o uso de transformador para realizar a medida de tensão, visto que o mesmo consegue ter uma boa precisão na faixa de 220 V, e frequência de 60 Hz, além de possuir baixo custo e boa disponibilidade. Foi escolhido para este trabalho um modelo de transformador que possui tensão nominal de entrada de 220 V e tensão de saída de 3 V, permitindo uma simples adequação do sinal de saída do transformador as entradas do conversor analógico-digital.

O sensor de corrente deve ser escolhido de forma a ter boa precisão para correntes até 32 A e frequência de 60 Hz. Logo, foi escolhido como sensor de corrente um transformador de corrente com saída em tensão da empresa YHDC modelo SCT-013, que possui corrente nominal de 50 A e não linearidade de $\pm 3\%$ para correntes entre 10 e 120% da corrente nominal. Também possui isolamento para até 6000 V por um minuto, e ganho de 50 A por Volt. Portanto está adequado a aplicação.

A Figura 3.6 mostra como são conectados os sensores de tensão e corrente aos condutores que fornecem energia ao veículo elétrico.

Figura 3.6 – Conexão dos sensores de tensão e corrente.



Fonte: Autor.

3.5 CIRCUITO DE CONTROLE E CONDICIONAMENTO DO SINAL

O circuito de controle possui a função de comandar todo o funcionamento da estação de recarga. É ele quem interpreta os sinais e atua da forma adequada para garantir o funcionamento correto da mesma.

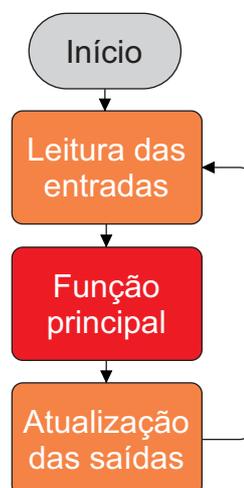
Entre as ações que ele deve realizar estão: o envio de sinais para o fechamento e a abertura da contatora e da trava do cabo; o recebimento de sinais analógicos da medição de energia; a geração do sinal PWM da função piloto; a comunicação com a interface homem-máquina; e a interpretação dos sinais nos condutores piloto e proximidade.

Assim, o recomendado para este caso é utilizar um microcontrolador ou um processador digital de sinais (DSP), que possua os seguintes periféricos:

- saídas e entradas digitais;
- conversores analógico-digital;
- saídas PWM;
- contadores para a implementação de interrupções;
- protocolos de comunicação.

Um possível modelo que apresenta baixa custo e todas estas funcionalidades e periféricos é o microcontrolador STM32F103C8T6 da empresa STMicroelectronics. Este microcontrolador foi utilizado neste trabalho, e realizou as tarefas necessárias. As saídas e entradas apresentam valores máximos de 3,3 V. A programação foi realizada na linguagem C, e o fluxograma simplificado da programação utilizada é apresentado na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Fluxograma simplificado da programação utilizada.



3.5.1 Função piloto

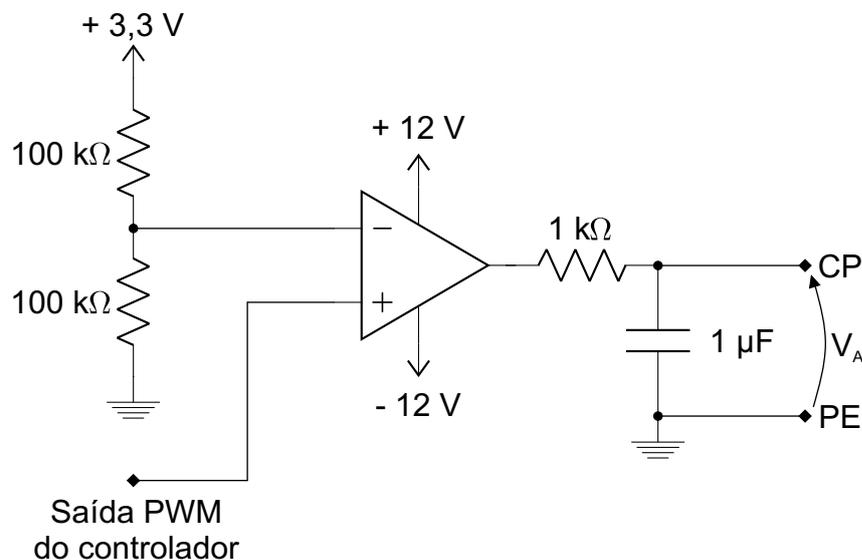
Uma das principais funções da estação de recarga é a geração do sinal PWM com amplitude de ± 12 V, e com razão cíclica codificando a corrente máxima que a estação permite fornecer naquele momento. Como as saídas PWM dos microcontroladores e DSP's não possuem essa amplitude e possuem offset, é necessário realizar o condicionamento desse sinal para adequar aos níveis exigidos nas normas.

Para retirar o offset e ainda amplificar o sinal PWM, pode-se utilizar um amplificador operacional *rail-to-rail* como comparador, em que a entrada não inversora recebe o sinal PWM do controlador, e a entrada inversora recebe o offset que deseja-se retirar do sinal PWM. Dessa forma, o amplificador operacional *rail-to-rail* irá comparar os dois sinais, e quando o sinal PWM for maior que o offset, a saída do *rail-to-rail* vai para alto, ficando grampeada na tensão superior de alimentação, que neste caso é + 12 V. Da mesma forma, quando o sinal PWM for menor do que o offset, a saída fica grampeada na tensão inferior de alimentação, neste caso - 12 V, gerando assim o sinal PWM com a amplitude especificada nas normas internacionais.

Pela disponibilidade no Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC), foi escolhido como amplificador operacional *rail-to-rail* o modelo LM7341 da Texas Instruments, já que o mesmo pode ser alimentado com tensões de até ± 15 V, e possui banda passante compatível com a frequência do sinal.

Na saída do amplificador operacional adiciona-se ainda um resistor de 1 k Ω e um capacitor de 1 nF para completar o circuito piloto do lado da estação. A Figura 3.8 mostra o circuito de condicionamento do sinal PWM juntamente com as outras partes da função piloto do lado da estação de recarga.

Figura 3.8 – Circuito de condicionamento do sinal PWM.



Quando o VE está desconectado da estação de recarga a tensão V_A mostrada na Figura 3.8 é igual a tensão gerada no amplificador *rail-to-rail*. Porém quando o VE é conectado, a associação de resistores e o diodo do circuito piloto do VE causam uma queda de tensão na parcela positiva do PWM medido em V_A . O estado do veículo elétrico é informado através dessa queda de tensão. Logo, precisa-se medir e interpretar essa tensão V_A .

Porém, não pode-se conectar esta tensão V_A diretamente a uma entrada analógica-digital do controlador, pois os níveis de tensão estão fora dos limites da entrada do conversor AD. Assim, outro circuito de condicionamento é necessário, porém desta vez deve-se reduzir a amplitude e adicionar um offset.

Como a amplitude de pico a pico máxima é de 24 V, e a entrada do conversor analógico-digital é de 3,3 V, deve-se aplicar o seguinte ganho de tensão ao sinal medido em V_A :

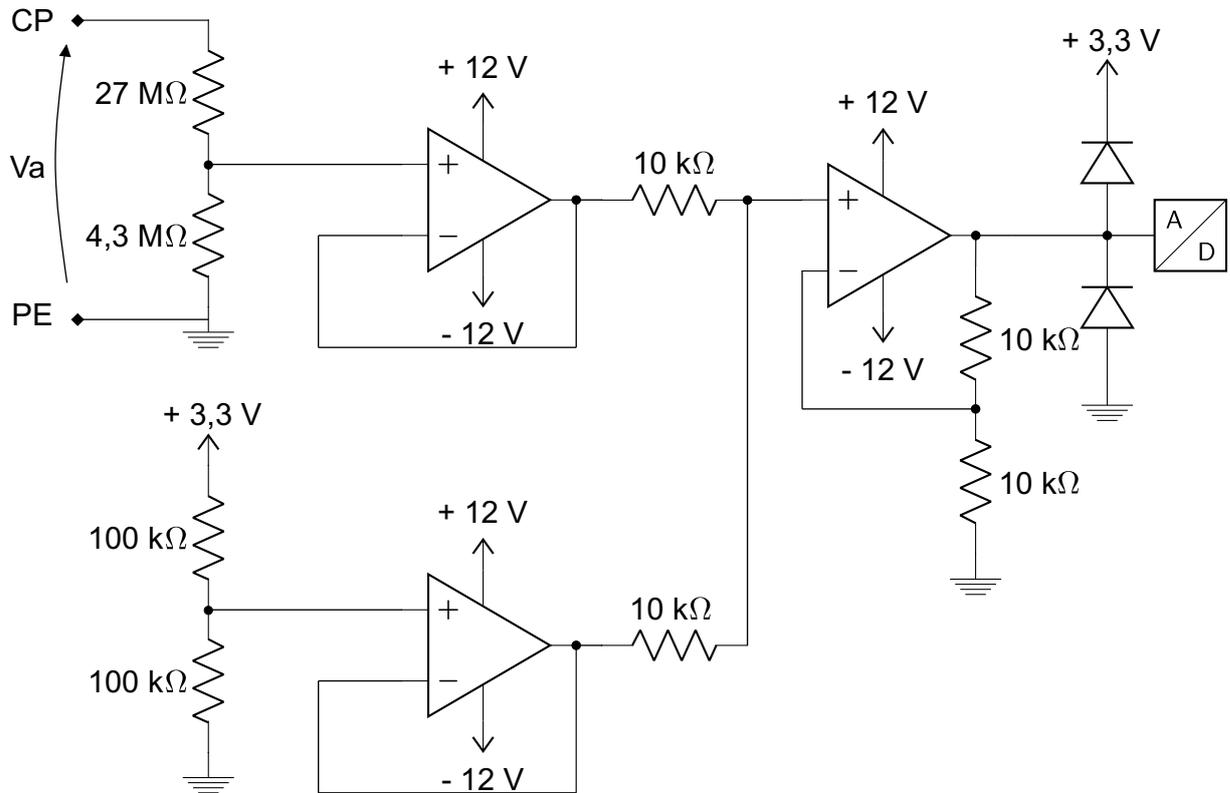
$$A_V = \frac{3,3}{24} = 0,1375 \quad (3.1)$$

Uma forma de aplicar esse ganho é utilizando um divisor resistivo, porém os valores de resistência utilizados no divisor resistivo precisam ser muito maiores do que 1 k Ω . Por esse motivo serão utilizados resistores de 27 M Ω e 4,3 M Ω , os quais garantem um ganho de tensão de 0,1374, valor muito próximo ao ganho calculado.

Em seguida, deve-se adicionar um offset ao sinal já atenuado. Para isso, utilizou-se um amplificador operacional na configuração somador não-inversor. Esta configuração conta com quatro resistores, sendo que: dois deles ficam conectados aos sinais de entrada e a porta não inversora; um realiza a realimentação negativa; e o outro fica conectado entre a porta inversora e a referência do controlador.

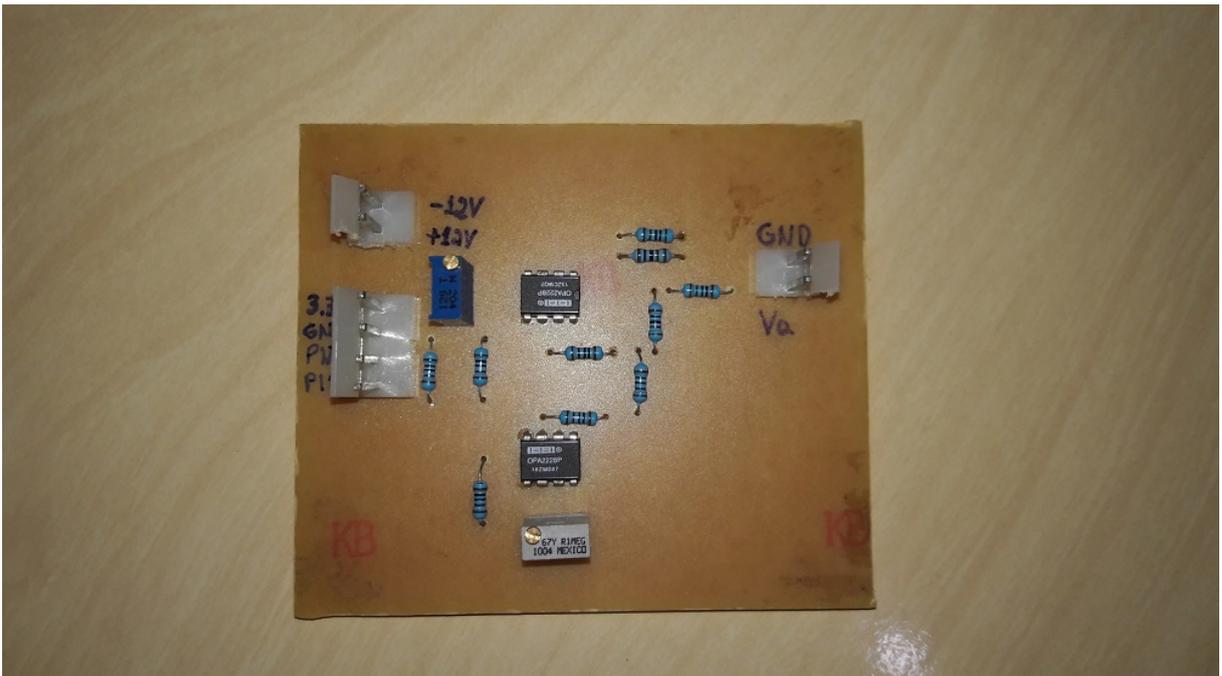
Todos os resistores da configuração somador não-inversor tem o mesmo valor. Dessa forma, o sinal de saída tem ganho unitário e é compatível com a entrada do conversor AD do microcontrolador. Os sinais de entrada desta configuração precisam ter impedância baixa, logo é necessário utilizar um buffer tanto para no sinal V_A atenuado, como na tensão de offset provinda de divisor resistivo. Ainda são utilizado diodos schottky que grampearão o sinal, impedindo assim danos ao conversor AD caso o sinal ultrapasse os limites do conversor. A Figura 3.9 apresenta o circuito de condicionamento do sinal V_A . Já a Figura 3.10 apresenta o circuito de condicionamento do sinal piloto e do sinal V_A após a implementação.

Figura 3.9 – Condicionamento do sinal V_A .



Fonte: Autor.

Figura 3.10 – Circuito de condicionamento do sinal piloto e do sinal V_A após a implementação.



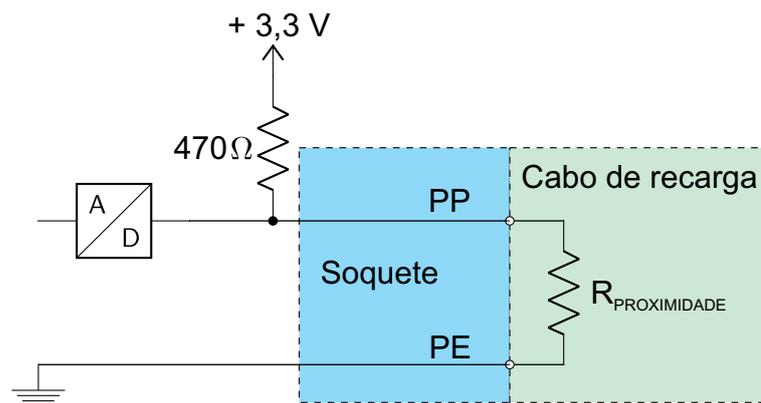
Fonte: Autor.

3.5.2 Pino proximidade

O circuito que realiza a medição e interpretação das informações no pino proximidade é bem mais simples. Sabe-se que no interior do cabo há uma resistência eletricamente conectada entre o pino proximidade e o condutor de proteção. O valor dessa resistência contém a informação da corrente nominal permitida pelo cabo de recarga. Para decodificar essa informação pode-se utilizar uma fonte tensão com um resistor em série e conectar este resistor ao pino proximidade. Assim haverá uma queda de tensão quando o cabo de recarga estiver conectado, e a partir dessa queda de tensão pode-se determinar qual é o valor da resistência do cabo.

Por conveniência a tensão utilizada será 3,3 V, e o resistor em série com esta tensão é de $470\ \Omega$. Dessa forma, não é necessário utilizar nenhum circuito de condicionamento para ler o sinal em uma porta do conversor AD do controlador. A Figura 3.11 mostra o circuito de medição da resistência presente no pino proximidade.

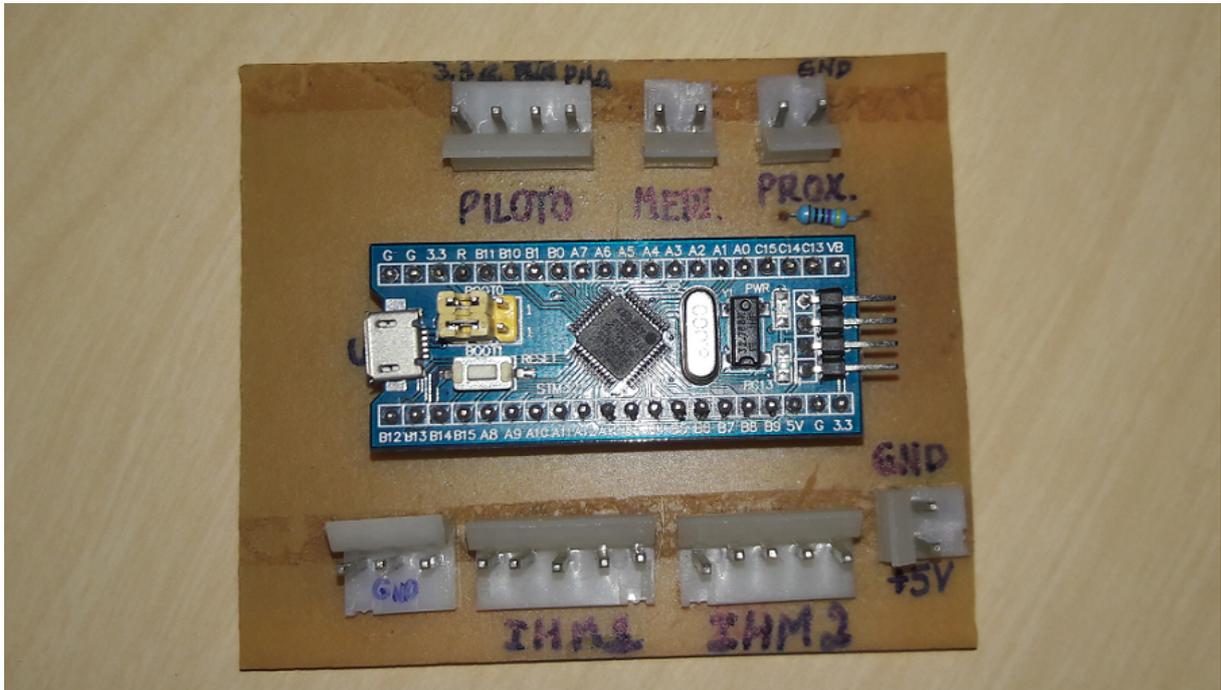
Figura 3.11 – Circuito de medição da resistência presente no pino proximidade.



Fonte: Autor

A Figura 3.12 apresenta o circuito do microcontrolador, além do resistor de $470\ \Omega$ apresentado na Figura 3.11 após a implementação.

Figura 3.12 – Circuito do microcontrolador e detecção do cabo de recarga após a implementação.



Fonte: Autor.

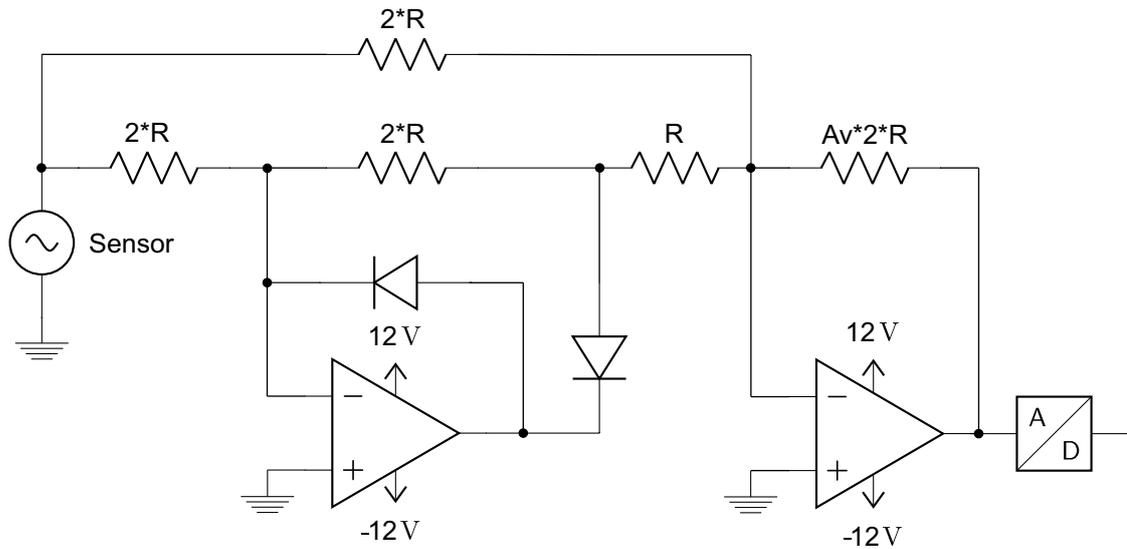
3.5.3 Condicionamento do sinal da medição de energia

Como os sinais dos sensores de tensão e corrente possuem saída em tensão, com frequência igual a da rede, ou seja 60 Hz, pode-se considerar os dois como sendo fontes de tensão para fins de projeto do circuito de condicionamento do sinal. A diferença entre os dois está no valor eficaz de cada um, sendo que o sensor de tensão terá valor eficaz próximo a $3 V_{RMS}$, e o sensor de corrente terá valor eficaz de até $1 V_{RMS}$. Logo, apenas um circuito de condicionamento será projetado, pois a mesma configuração servirá para os dois, sendo a única diferença de um para o outro o ganho final.

Devido ao fato dos sinais de saída dos sensores de tensão e corrente serem alternados, não é possível conectá-los diretamente a uma entrada analógica-digital do controlador. Para resolver esse problema, será utilizado um amplificador operacional na configuração de retificador de precisão, que irá retificar os sinais da medição de energia.

Após retificar o sinal, é necessário aplicar um ganho para adequar o mesmo a entrada do conversor AD do microcontrolador. Este ganho será realizado utilizando um amplificador operacional na configuração inversora. Por fim, adicionam-se ainda diodos schottky para grampear o sinal e garantir que não irá danificar o conversor AD. Unindo estas partes tem-se o circuito mostrado na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Circuito de condicionamento dos sinais da medição.



Fonte: Autor.

O valor R dos resistores mostrados na Figura 3.13 devem ser na faixa de algumas unidades de milhares de Ohms para um melhor funcionamento do circuito. Assim, o valor de R escolhido foi de $1\text{ k}\Omega$, dessa forma pode-se calcular o valor A_V e determinar o resistor de ganho de tensão para o sinais dos sensores de tensão e corrente.

Para não perder nenhuma informação do sinal de tensão, calcula-se o ganho do circuito de condicionamento do sinal de tensão para que seja possível ler tensões de até 250 V_{CA} no primário do transformador. Portanto, deve-se primeiro calcular qual será a tensão no secundário do transformador:

$$V_{\text{secundário}} = 250\text{ V} * A_{V_sensor_tensão} \quad (3.2)$$

$$V_{\text{secundário}} = 250\text{ V} * \frac{3\text{ V}}{220\text{ V}} = 3,4091\text{ V} \quad (3.3)$$

Porém, esse é o valor eficaz de tensão e deve-se encontrar o valor de pico para fins de cálculo do ganho.

$$V_{\text{pico}} = 3,4091\text{ V} * \sqrt{2} = 4,8212\text{ V}_{\text{pico}} \quad (3.4)$$

Tendo-se o valor de pico pode-se finalmente calcular o ganho para adequar o sinal à entrada do conversor AD.

$$A_V = \frac{3,3\text{ V}}{4,8212\text{ V}} = 0,684 \quad (3.5)$$

O valor do resistor responsável pelo ganho será de:

$$R_{ganho} = 0,684 * 2 * R \quad (3.6)$$

$$R_{ganho} = 0,684 * 2 * 1000\Omega = 1368 \Omega \quad (3.7)$$

Pode-se utilizar dois resistores em série de 680 Ω , já que este é um valor comercial de resistência, de forma a obter 1360 Ω que é um valor muito próximo do calculado, e que garantirá o ganho desejado.

Já o ganho do sinal de corrente será calculado para que uma corrente de 50 A_{CA} represente 3,3 V_{CC} na entrada do conversor AD do microcontrolador.

Da mesma forma, precisa-se novamente calcular quanto isso equivale na saída do sensor, qual o valor de pico, e qual é o ganho necessário:

$$V_{saída_sensor} = 50 \text{ A} * A_{V_sensor_corrente} \quad (3.8)$$

$$V_{saída_sensor} = 50 \text{ A} * \frac{1 \text{ V}}{50 \text{ A}} = 1 \text{ V}_{\text{RMS}} \quad (3.9)$$

$$V_{pico} = 1 \text{ V}_{\text{RMS}} * \sqrt{2} = \sqrt{2} \text{ V}_{\text{pico}} \quad (3.10)$$

$$A_V = \frac{3,3 \text{ V}}{\sqrt{2} \text{ V}} = 2,333 \quad (3.11)$$

O valor do resistor que garantirá esse ganho será de:

$$R_{ganho} = 2,333 * 2 * R \quad (3.12)$$

$$R_{ganho} = 2,333 * 2 * 1000\Omega = 4667 \Omega \quad (3.13)$$

Dessa forma, pode-se utilizar o resistor comercial de 4,7 k Ω para garantir o ganho desejado. A Figura 3.14 apresenta como ficou o circuito do sistema de medição do consumo de energia e seu circuito de condicionamento do sinal após a implementação.

Figura 3.14 – Circuito de medição do consumo de energia e seu circuito de condicionamento do sinal após a implementação.

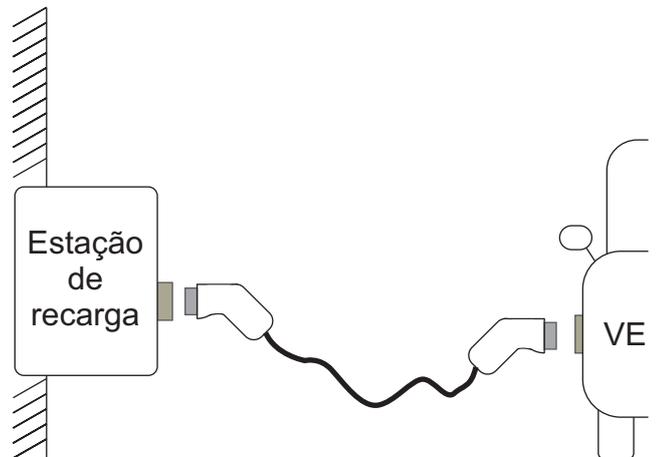


Fonte: Autor.

3.6 SOQUETE E CABO DE RECARGA

Como definido anteriormente, neste trabalho serão plugues e soquetes com o padrão CCS Tipo 2. Pela maior utilidade ao usuário, esta estação irá se conectar ao veículo elétrico utilizando o caso B descrito na norma IEC 61851-1 (2017). Ou seja, o cabo de recarga pode ser desconectado tanto do veículo, quanto da estação de recarga. A Figura 3.15 exemplifica o caso B de conexão.

Figura 3.15 – Caso B de conexão entre a estação de recarga e o VE.



Fonte: Autor.

Dessa forma, é necessário que haja um soquete de saída no gabinete da estação, para que o cabo possa se conectar. Isso aumenta os custos da estação, mas por outro lado, dá ao cliente a liberdade de utilizar o cabo desta estação em outra estação de recarga que não disponha.

Da mesma forma, caso o cliente já possua um cabo com padrão CCS Tipo 2, ele não será obrigado a comprar o cabo desta estação, o que torna este item opcional ao cliente.

Como não pode-se utilizar soquetes e cabos com capacidade de corrente menor do que a corrente nominal da estação, serão utilizados nesta estação tanto um soquete quanto um cabo de recarga com exatamente 32 A, ambos de acordo com as exigências da IEC 62196-2 (2016).

Como descrito no início do trabalho, este tipo de conector necessita possuir uma trava eletrônica no soquete de saída, que tem o objetivo de proteger o usuário da estação contra uma possível desconexão indevida do cabo. As normas também descrevem que quem deve controlar esta trava eletrônica é a unidade de controle da estação.

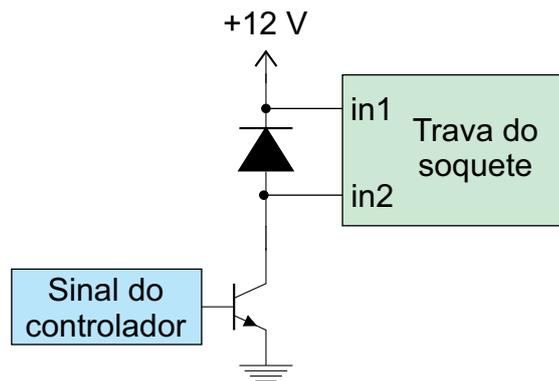
Como o modelo de soquete escolhido possui trava eletrônica com acionamento em tensão contínua de 12 V, deve-se adequar o sinal de saída do controlador à entrada de sinal da trava.

Para aplicar o ganho de tensão e corrente será utilizado um transistor bipolar de junção o qual terá seu emissor conectado a referência do microcontrolador, a base conectada ao sinal do controlador, e o coletor conectado a uma das entradas da trava. A outra entrada da trava ficará conectada a fonte 12 V, assim quando o sinal for alto na saída do microcontrolador o transistor entra em condução e aplica aproximadamente 12 V as entradas da trava, causando assim o fechamento da trava e prendendo o cabo a ela.

Quando o sinal do controlador for baixo, o transistor não conduz, logo não haverá tensão nos terminais da trava o que fará com que ela fique destravada. O diodo presente no circuito tem a função de dar caminho para a corrente quando há uma mudança de estado da trava, já que a entrada da mesma possui característica indutiva.

A Figura 3.16 mostra o circuito de acionamento da trava do soquete.

Figura 3.16 – Circuito de acionamento da trava do soquete.



Fonte: Autor.

Além do sinal de trancamento da trava, o soquete também recebe o condutor de proteção, neutro, fase, piloto do lado da estação, e o pino proximidade. É através do soquete que a estação de recarga se conecta ao cabo de recarga.

O cabo de recarga também utilizará o padrão CCS Tipo 2 e possuirá comprimento de 4,5 metros, comprimento suficiente para se conectar aos VE. A corrente nominal do cabo de recarga também será de 32 A.

3.7 GABINETE

O gabinete tem a função de garantir a proteção contra poeira e água dos componentes internos. Como esta estação de recarga será utilizada em ambiente interno, a proteção contra poeira e água mínima deve ser IP41. O material do gabinete será em plástico de engenharia, visto que este material tem melhores características mecânicas e térmicas do que os plásticos convencionais.

O gabinete também será utilizado para fixar mecanicamente a estação a uma parede, garantindo assim maior comodidade na instalação em garagem.

3.8 INTERFACE HOMEM-MÁQUINA

A interface homem-máquina tem a função de apresentar as informações da recarga ao usuário. São informações úteis ao usuário da estação de recarga:

- o estado da estação de recarga;
- o estado atual da recarga;
- o tempo total que o VE ficou recarregando;
- o consumo total de energia.

Desta forma será utilizado um display LCD 16x2 para cumprir essa função. Este display apresenta duas linhas com até 16 caracteres, sendo a primeira linha utilizada para apresentar o estado da estação, e da recarga, e a segunda para mostrar o tempo total da recarga e a energia total consumida.

Para funcionar corretamente este display necessita ser alimentado com 5 V de tensão, e receber 6 sinais digitais, que são utilizados para informar quando haverá uma atualização no conteúdo do display, além de informar qual será o novo conteúdo que deve ser apresentado no display. A Figura 3.17 apresenta o diagrama de blocos da interface homem-máquina.

Figura 3.17 – Diagrama de blocos da interface homem-máquina.



Fonte: Autor.

A Figura 3.18 apresenta o circuito da interface homem-máquina após a implementação.

Figura 3.18 – Circuito da interface homem-máquina após a implementação.



Fonte: Autor.

4 PROJETO DOS CIRCUITOS DE TESTE DA ESTAÇÃO DE RECARGA

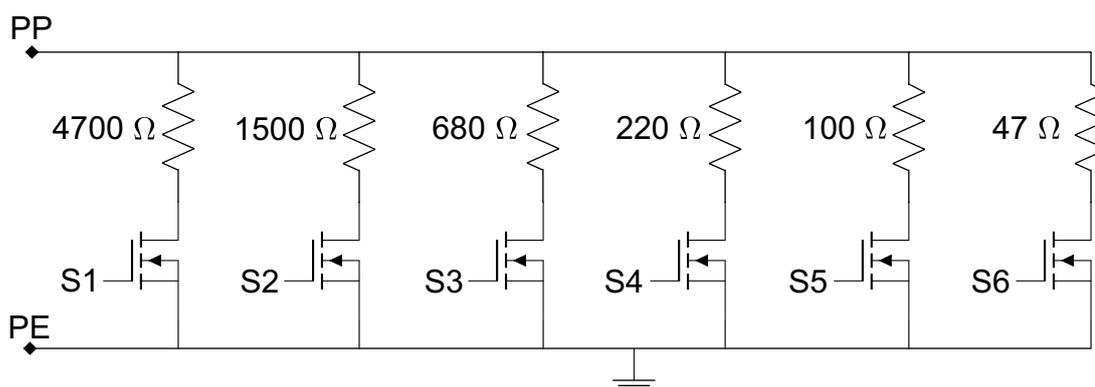
Para verificar se a estação de recarga está funcionando da forma adequada, são necessários alguns testes. Estes testes consistem em emular a conexão de um cabo e um veículo elétrico à estação. Para isso, primeiramente deve-se projetar estes circuitos emuladores. Dessa forma, este capítulo irá descrever como foram realizados estes projetos.

4.1 EMULADOR DO CABO DE RECARGA

A norma internacional IEC 62196-2 (2016) apresenta os valores nominais de resistência no contato proximidade que emulam cada valor permitido de corrente nominal do cabo de recarga. Estes valores serão adotados no emulador do cabo de recarga com o objetivo de verificar o funcionamento da estação de recarga.

Para selecionar qual resistência será emulada, são utilizados transistores MOSFET de sinal operando como chaves. Dessa forma, pode-se comandar o emulador do cabo através de sinais digitais provindos de um controlador externo. O circuito do emulador do cabo é apresentado na Figura 4.1. A sigla S seguida de um número representa nesta figura qual é o sinal de comando que controla cada transistor para que o mesmo funcione como chave.

Figura 4.1 – Circuito do emulador do cabo de recarga.



Fonte: Autor.

A Figura 4.2 apresenta o circuito do emulador do cabo de recarga após a implementação.

Figura 4.2 – Circuito do emulador do cabo após a implementação.



Fonte: Autor.

Pela disponibilidade no laboratório, foi escolhido como controlador externo o microcontrolador Arduino Mega 2560. Logo, ele o responsável por controlar a realização dos testes que demonstrarão se a estação de recarga está ou não funcionando de acordo com as normas internacionais.

4.2 EMULADOR DE ESTADOS DO VEÍCULO ELÉTRICO

Da mesma forma, é necessário emular os estados do veículo elétrico para verificar se a estação de recarga está realizando as ações corretas em cada estado. Como a determinação dos estados é algo crucial para o bom funcionamento da estação, deve-se testar toda a faixa de tensão de cada estado. Logo, uma forma simples e eficaz de fazer isso, é testar cada estado no seu valor nominal de tensão, e em seus limites.

O emulador de estados do veículo elétrico deve ser capaz de gerar os seguintes valores de tensão presentes na Tabela 4.1 para a borda superior do PWM no ponto V_A quando o PWM gerado pela estação tiver sua borda superior exatamente igual a 12 V.

Tabela 4.1 – Tensões V_A que devem ser emuladas para os testes da estação.

Estado	Faixa do estado	Tensão V_A (V)
AX	Nominal	12
	Limite superior	10
BX	Nominal	9
	Limite inferior	8
	Limite superior	7
CX	Nominal	6
	Limite inferior	5
	Limite superior	4
DX	Nominal	3
	Limite inferior	2
E	Limite superior	1

Fonte: Autor.

Portanto, pode-se projetar o emulador do cabo apenas utilizando resistores, um diodo, e chaves que selecionam quais resistências estarão conectadas ao circuito piloto da estação.

Por recomendação da norma IEC 61851-1, o diodo do emulador deve ter queda de tensão de 0,7 V para correntes entre 2,5 e 10 mA. Logo, diodos de silício são os mais adequados para esta aplicação, sendo o modelo escolhido para este trabalho o UF4007 por apresentar queda de tensão próxima a recomendada pela norma, e por possuir características que o tornam compatível com a frequência do sinal.

A equação a seguir mostra como obtém-se a tensão V_A a partir da resistência equivalente emulada.

$$V_A = (12 - 0,7) * \left(\frac{R_{equivalente}}{R_{equivalente} + R_1} \right) + 0,7 \quad (4.1)$$

A partir dela pode-se isolar o termo $R_{equivalente}$ para encontrar os valores de resistência que geram as tensões V_A desejadas:

$$R_{equivalente} = \frac{R_1 * (V_A - 0,7)}{12 - V_A} \quad (4.2)$$

Onde R_1 é a resistência de 1 k Ω presente no circuito piloto do lado da estação. Realizando os cálculos são obtidos os valores de resistência apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores de resistência necessários para o emular os estados do veículo elétrico.

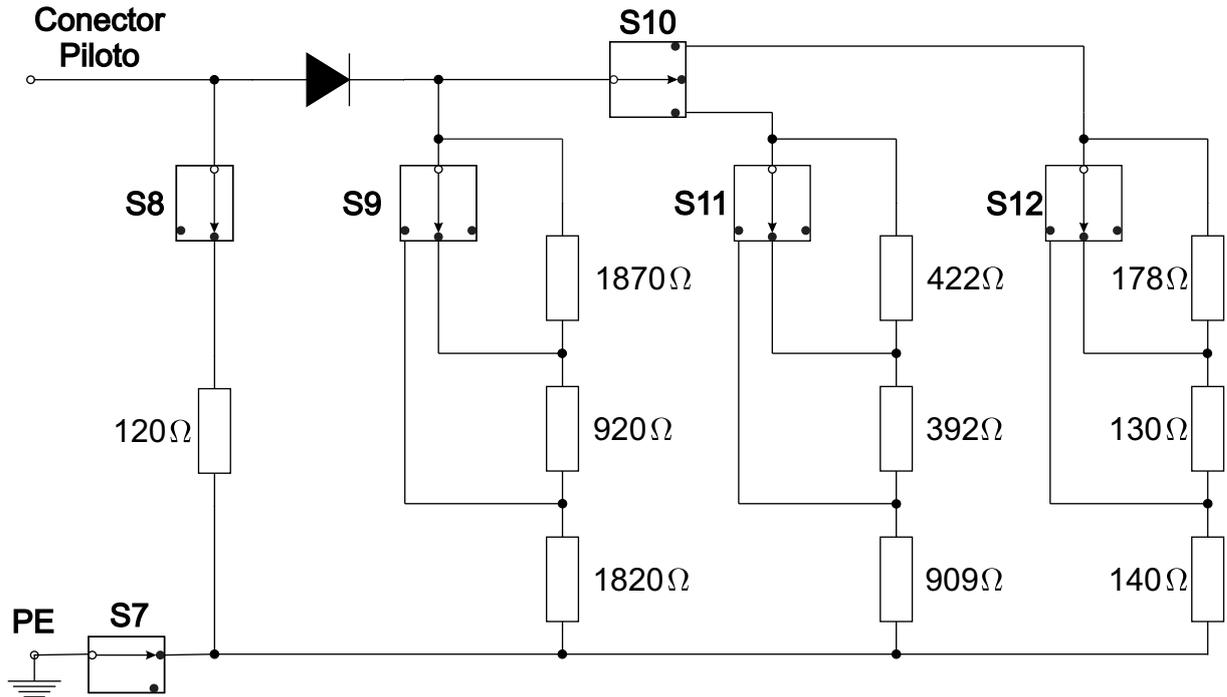
Estado	Faixa do estado	Tensão V_a (V)	Resistência (Ω)
AX	Nominal	12	∞
	Limite superior	10	4650
BX	Nominal	9	2767
	Limite inferior	8	1825
	Limite superior	7	1260
CX	Nominal	6	883
	Limite inferior	5	614
	Limite superior	4	412
DX	Nominal	3	256
	Limite inferior	2	130
E	Limite superior	1	120

Fonte: Autor.

A maior parte destas resistências calculadas não estão disponíveis comercialmente, logo são necessárias associações série e paralelo de resistores disponíveis para gerar estes valores.

O circuito mostrado na Figura 4.3 apresenta uma possível configuração de resistores que consegue emular com boa precisão os valores de tensão V_A .

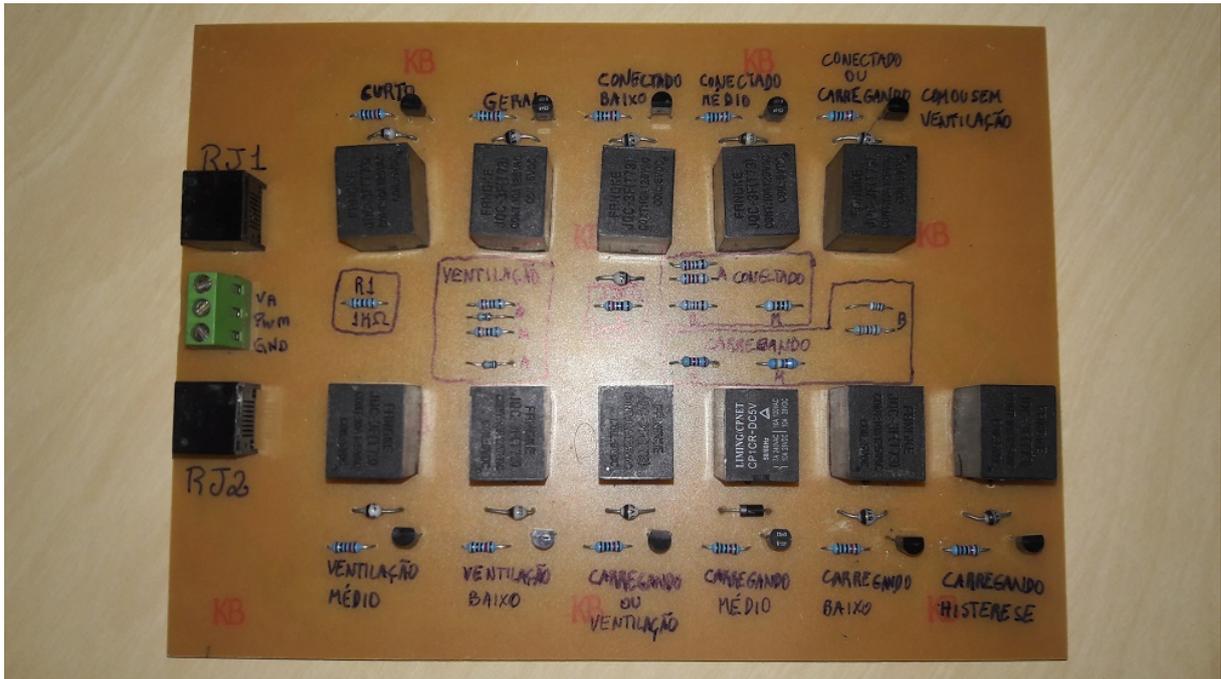
Figura 4.3 – Emulador de estados utilizados.



Fonte: Adaptado de IEC 61851-1 (2017).

As chaves apresentadas na Figura 4.3 foram implementadas utilizando relés pela maior simplicidade no acionamento, visto que durante o funcionamento as chaves estão submetidas a diferentes potenciais. O comando da posição que cada relé é feito através do mesmo microcontrolador Arduino Mega 2560. O emulador de estados do veículo elétrico mostrado na Figura 4.3 foi utilizado para testar a estação de recarga. A Figura 4.4 apresenta como ficou o circuito do emulador de estados após a implementação.

Figura 4.4 – Circuito do emulador de estados após a implementação.



Fonte: Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados alcançados dos emuladores e da estação de recarga.

5.1 RESULTADOS DO EMULADOR DO CABO DE RECARGA

Para garantir que os testes da estação de recarga estejam sendo realizados da forma correta, primeiramente é necessário confirmar que os emuladores estão funcionando da forma adequada.

O primeiro a ser testado foi o emulador do cabo. Nele foi testada a resistência emulada através da tensão medida no contato proximidade e foi verificado se está dentro da faixa do cabo desejado. Os resultados são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resultados do emulador do cabo.

Cabo emulado	Faixa de resistência (Ω)	Resistência projetada (Ω)	Tensão no contato proximidade (V)	Resistência emulada (Ω)
Desconectado	>4500	4700	2,707	4570
13 A	1100 a 2460	1500	1,934	1416
20 A	400 a 936	680	1,340	684
32 A	164 a 308	220	0,599	222
63 A ou 70 A	80 a 140	100	0,300	100,2
Falha no cabo	<60	47	0,152	48,2

Fonte: Autor.

Devido a tolerância dos resistores e da queda de tensão em condução do transistor funcionando como chave, a resistência emulada não apresentou o mesmo valor da resistência projetada. Mesmo assim, ficou dentro da faixa de resistência do cabo que deseja-se emular. Logo, este emulador está adequado para realizar a sua parcela de testes na estação.

5.2 RESULTADOS DO EMULADOR DE ESTADOS

O emulador de estados, por sua vez, precisa emular corretamente 11 quedas de tensão diferentes na parcela positiva do PWM. Para testá-lo, foi aplicado um PWM com

amplitude de ± 12 V, e impedância de saída de $1\text{ k}\Omega$, e foram verificados os valores de tensão da borda positiva do PWM em cada um dos estados, sendo que o erro máximo deve ser de 3 %. A Tabela 5.2 apresenta os valores desejados e os valores obtidos utilizando o emulador de estados.

Tabela 5.2 – Resultados obtidos do emulador de estados.

Estado	Faixa do estado	Parcela Positiva do PWM em V_A	
		Desejada	Emulada
AX	Nominal	12	12
	Limite superior	10	9,95
BX	Nominal	9	8,92
	Limite inferior	8	7,92
CX	Limite superior	7	6,93
	Nominal	6	5,92
	Limite inferior	5	4,90
DX	Limite superior	4	3,91
	Nominal	3	2,91
	Limite inferior	2	1,96
E	Limite superior	1	0,97

Fonte: Autor.

Como pode-se perceber na Tabela 5.2, os valores de tensão da parcela positiva do PWM em V_A emulados ficaram bem próximos dos valores desejados, sendo que o erro máximo foi de 3 %. Dessa forma, pode-se afirmar que o emulador de estados está adequado para realizar testes na estação de recarga.

5.3 RESULTADOS DA ESTAÇÃO DE RECARGA

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a realização dos testes da estação de recarga. Os testes foram divididos em 8 partes, as quais são listadas abaixo:

- frequência do sinal PWM;
- limites de tensão do sinal PWM;
- codificação da corrente máxima disponível ao veículo;
- tempo de subida e descida do PWM;

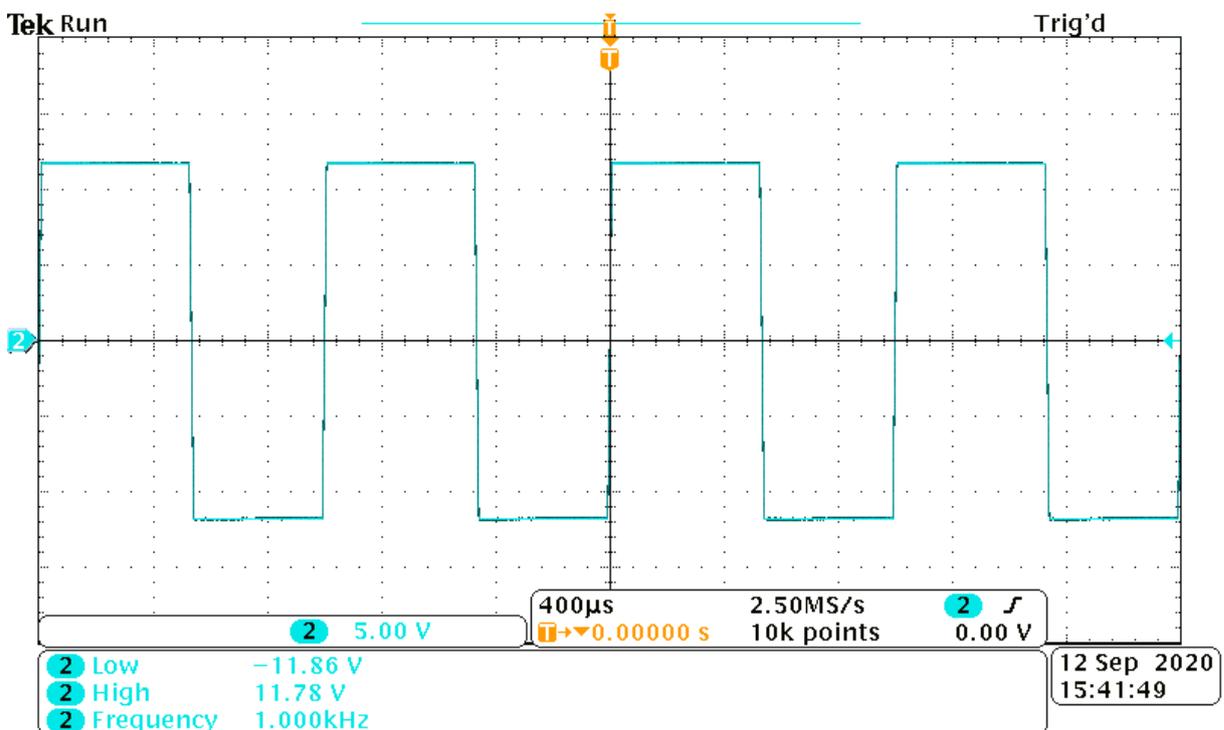
- tempo de resposta da contatora;
- resposta da estação em reação as transições de estados;
- resposta da estação em a perda do condutor de proteção;
- resposta da estação em reação a um curto-circuito no condutor piloto.

E que tem por objetivo verificar se a estação de recarga cumpre com todos os requisitos estabelecidos nas normas internacionais.

5.3.1 Frequência do sinal PWM

Como a geração do sinal PWM é algo crucial para o correto funcionamento da estação de recarga, o primeiro teste que deve ser realizado é verificar se a frequência do sinal PWM gerado pelo circuito piloto do lado da estação é de 1 kHz, com erro máximo de $\pm 2\%$. A Figura 5.1 apresenta o resultado obtido para esse teste.

Figura 5.1 – Frequência do sinal PWM gerado pelo circuito piloto do lado da estação.



Fonte: Autor.

Como pode-se ver na Figura 5.1 a frequência do sinal PWM gerado pelo circuito piloto do lado da estação ficou em exatamente 1 kHz, logo a estação está gerando o PWM corretamente.

5.3.2 Limites de tensão do sinal PWM

O segundo teste é verificar se a amplitude do sinal PWM e, V_A está de acordo com os valores estabelecidos nas normas. A Tabela 5.3 apresenta os limites para cada estado do veículo elétrico.

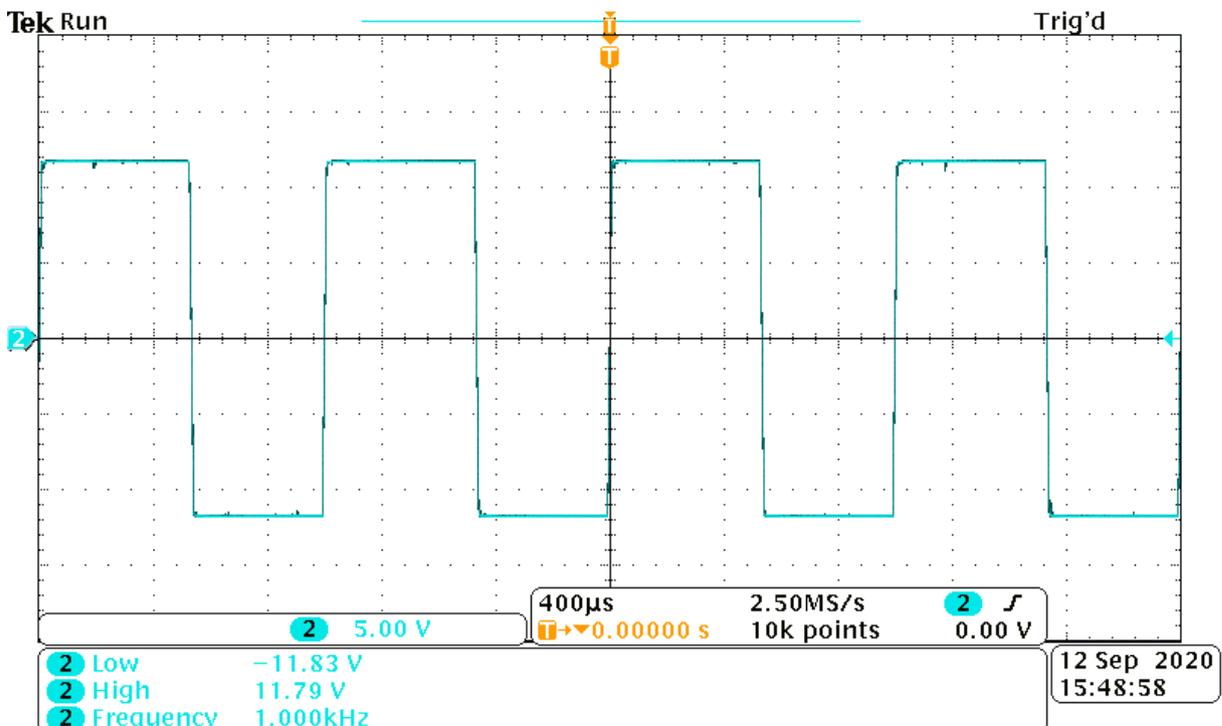
Tabela 5.3 – Limites de tensão do sinal PWM para cada estado

	Tensão mínima (V)	Tensão máxima (V)
Estado A1 e parte positiva do PWM do estado A2	11,4	12,6
Estado B1 e parte positiva do PWM do estado B2	8,37	9,59
Estado C1 e parte positiva do PWM do estado C2	5,47	6,53
Parte negativa do PWM dos estados A2, B2 e C2	-12,6	-11,4

Fonte: Autor.

O primeiro estado testado foi o estado A2. A Figura 5.2 apresenta os valores obtidos para este estado.

Figura 5.2 – Tensões obtidas para a parcela positiva e negativa do PWM do estado A2.

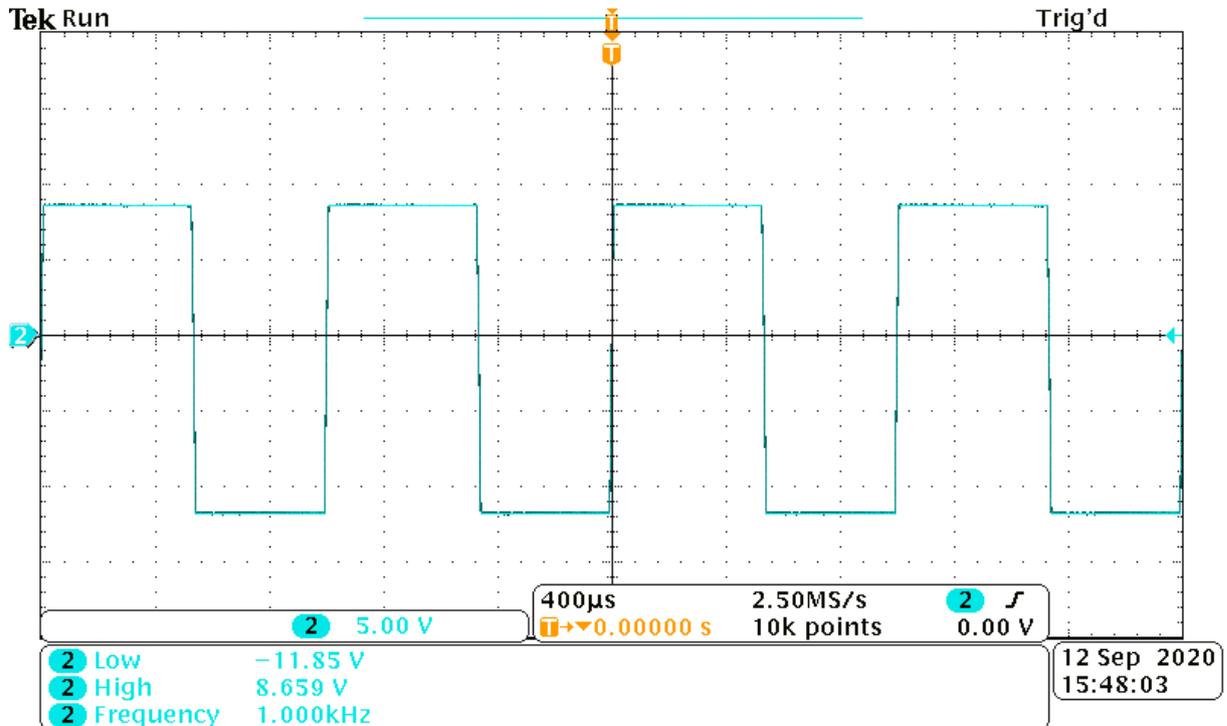


Fonte: Autor.

Como pode-se perceber através da Figura 5.2, o valor de tensão da parcela positiva do PWM ficou em 11,79 V, e a parcela negativa ficou em -11,83 V, ambos dentro dos limites das normas.

Em seguida, foi realizado o mesmo teste para o estado B2. A Figura 5.3 apresenta os resultados.

Figura 5.3 – Tensões obtidas para a parcela positiva e negativa do PWM do estado B2.

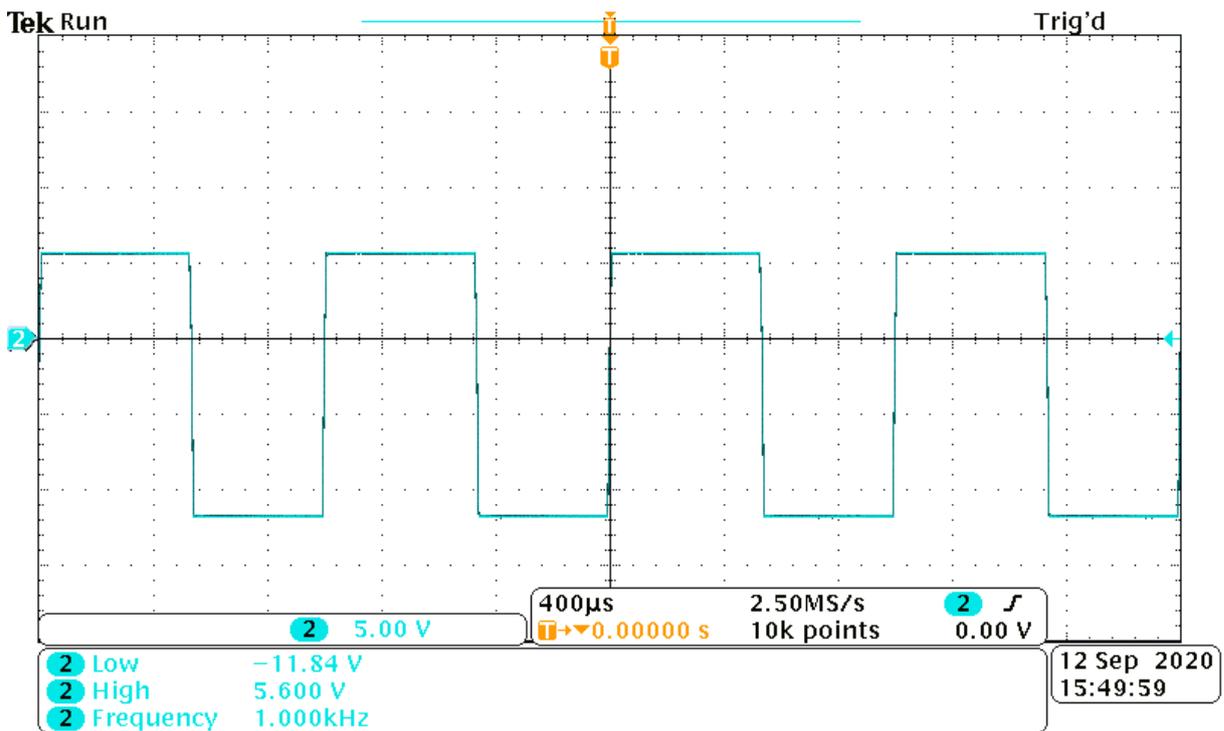


Fonte: Autor.

Analisando a Figura 5.3 percebe-se que o valor de tensão da parcela positiva foi de 8,659 V, e da parcela negativa foi de -11,85 V, ambos dentro dos limites apresentados na Tabela 5.3.

Por último, foi realizado o teste do estado C2, que apresentou os resultados mostrados na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Tensões obtidas para a parcela positiva e negativa do PWM do estado C2.



Fonte: Autor.

O estado C2 apresentou o valor de tensão de 5,6 V para a parcela positiva do PWM, e -11,84 V para a parcela negativa do PWM. Logo, também está dentro dos padrões estabelecidos em normas.

Os resultados dos estados A1, B1 e C1 são iguais aos resultados da parcela positiva do PWM para os estados A2, B2 e C2 respectivamente. Isto já era esperado, visto que os estados X1 apresentam os mesmos valores de tensão que os estados X2, porém não apresentam a parcela negativa do PWM. Logo, pode-se concluir que todos os estados passaram pelo teste de verificação da amplitude do sinal PWM em V_A .

5.3.3 Codificação da corrente máxima disponível ao veículo

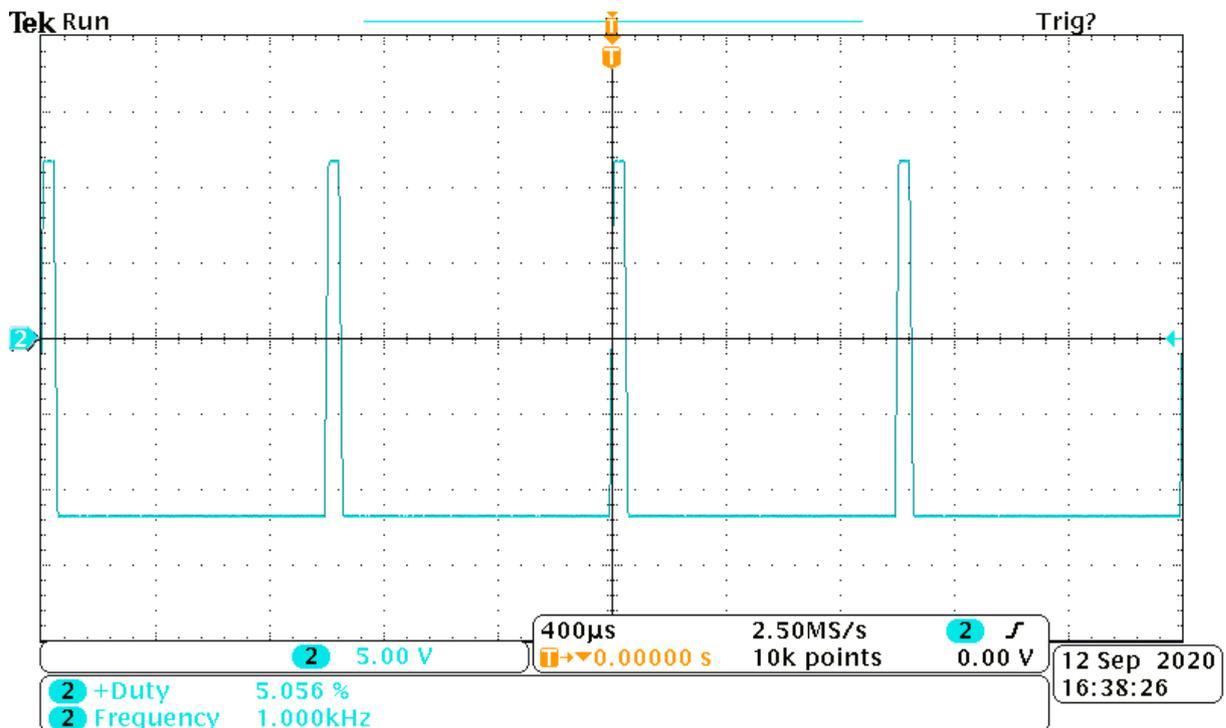
Com o objetivo de testar se a estação de recarga está codificando corretamente a informação da corrente máxima que ela pode fornecer ao veículo naquele momento, este terceiro teste analisa a largura de pulso do PWM gerado pela estação, já que é desta forma que a corrente máxima é codificada e enviada ao veículo. As normas exigem que ao menos as seguintes três razões cíclicas sejam testadas, são elas:

- 5 %;
- 10 %;

- a razão cíclica para a corrente máxima que a estação pode fornecer.

A razão cíclica de 5 % representa a informação de que a estação de recarga informará ao veículo elétrico a corrente máxima que ela pode fornecer através de comunicação digital. Como esta estação de recarga não foi projetada para utilizar comunicação digital, esta largura de pulso só será utilizada para fins de testes, não sendo uma razão cíclica utilizada durante a operação normal da estação de recarga. A Figura 5.5 apresenta o PWM gerado pela estação de recarga para essa razão cíclica.

Figura 5.5 – PWM com razão cíclica de 5 %.

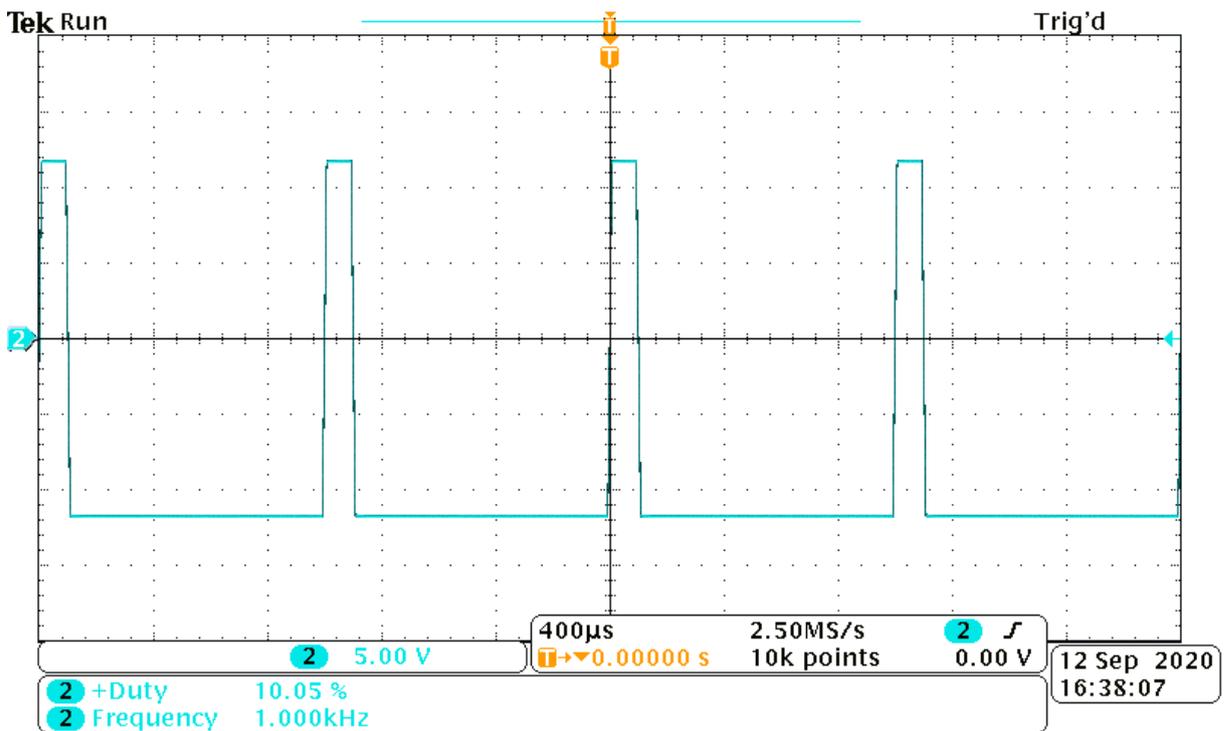


Fonte: Autor.

Como pode-se perceber através da Figura 5.5 a razão cíclica gerada foi de 5,05 %, valor que representa bem a informação de que a estação utilizará comunicação digital, visto que a faixa de razão cíclica para isso fica entre 3 e 7 %.

Em seguida foi realizado o teste para a razão cíclica de 10 %, esta razão cíclica indica que a estação de recarga pode fornecer no máximo 6 A naquele momento. A Figura 5.6 apresenta o resultado obtido através da codificação dessa corrente.

Figura 5.6 – PWM com razão cíclica de 10 %.

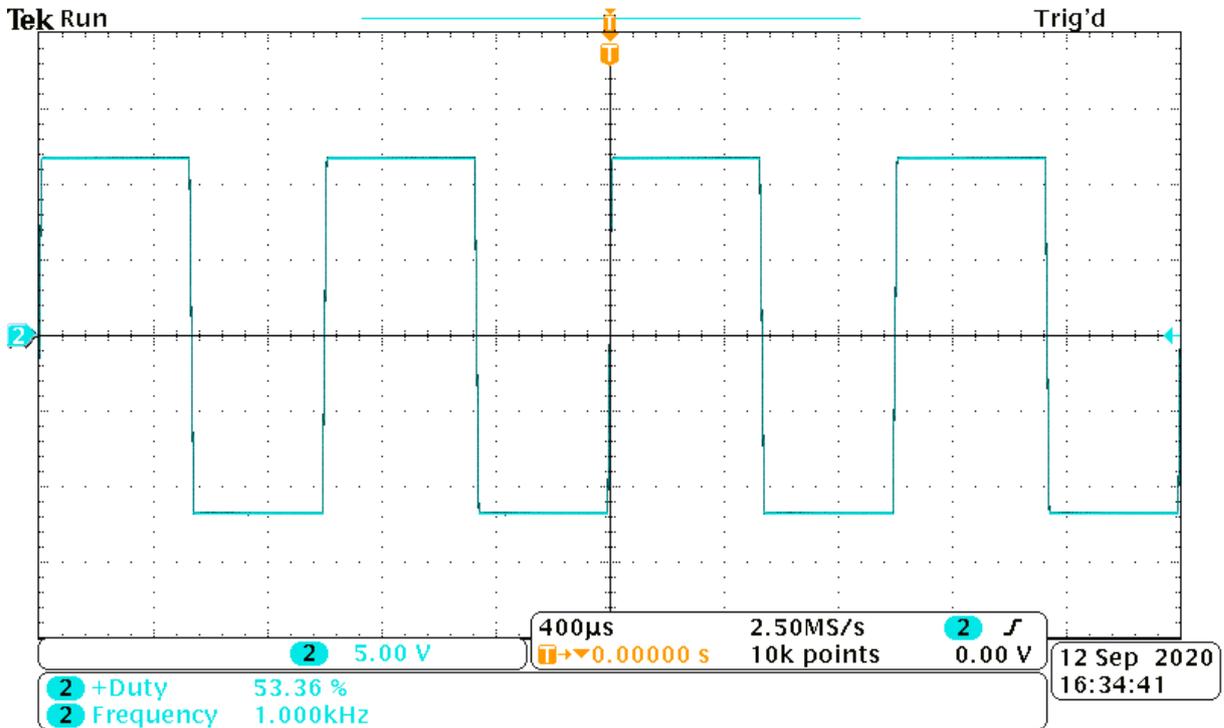


Fonte: Autor.

Analisando a Figura 5.6 percebe-se que a razão cíclica ficou em 10,05 %, representando muito bem a informação de que a corrente máxima que a estação pode fornecer naquele momento é de 6 A.

Em seguida, foi codificada através da razão cíclica do PWM a corrente máxima que a estação foi projetada para fornecer. Como a corrente máxima que esta estação pode fornecer é 32 A, a Tabela 2.5 foi utilizada para encontrar a razão cíclica que representa esta corrente, com isso chega-se ao valor de razão cíclica de 53,33 %. A Figura 5.7 apresenta como ficou a codificação dessa corrente.

Figura 5.7 – Codificação através da razão cíclica do PWM da corrente máxima que a estação pode fornecer.



Fonte: Autor.

Como pode-se perceber observando a Figura 5.7, a razão cíclica gerada foi de 53,36 %, muito próxima do valor calculado anteriormente, com isso, pode-se afirmar que ela está codificando adequadamente esta corrente, e analisando os resultados anteriores percebe-se que a estação de recarga passou nos testes de verificação da codificação da corrente através da razão cíclica.

Não serão apresentadas as figuras, porém foram testadas as codificações das correntes de 13 e 20 A, já que estes são valores de corrente nominal do cabo de recarga que a norma IEC 62196-2 (2016) permite, e que conseqüentemente podem ser conectados à estação de recarga. Logo, quando conectados eles passam a limitar a corrente máxima que ela pode fornecer, e essa informação deve ser repassada ao veículo elétrico. A Tabela 5.4 apresenta a razão cíclica que deve ser codificada, e o resultado obtido nos teste para cada uma das correntes.

Tabela 5.4 – Outras possíveis correntes máximas permitidas durante a recarga.

Corrente codificada	Razão cíclica calculada	Razão cíclica obtida
13 A	21,66 %	21,66 %
20 A	33,33 %	33,35 %

Fonte: Autor.

Como pode-se ver na Tabela 5.4 a codificação das correntes de 13 e 20 A tam-

bém apresentou baixíssimo erro, logo a codificação dessas correntes também está sendo realizada da forma correta.

5.3.4 Tempo de subida e descida do PWM

Outra exigência das normas internacionais relacionadas a carregadores de veículos elétricos, é a verificação do tempo de subida e o tempo de descida do sinal PWM. Devem ser verificados os tempos de subida e descida para os estados B2, C2, e caso a estação aceite veículos que recarregam com ventilação o estado D2. Como não é o caso desta estação aceitar veículos que necessitam de ventilação durante a recarga, serão apenas necessários os teste para os estados B2 e C2. O tempo de subida e de descida deve ser medido entre 10 e 90 % da amplitude do sinal PMW em V_A . A Tabela 5.5 apresenta os valores máximos permitidos.

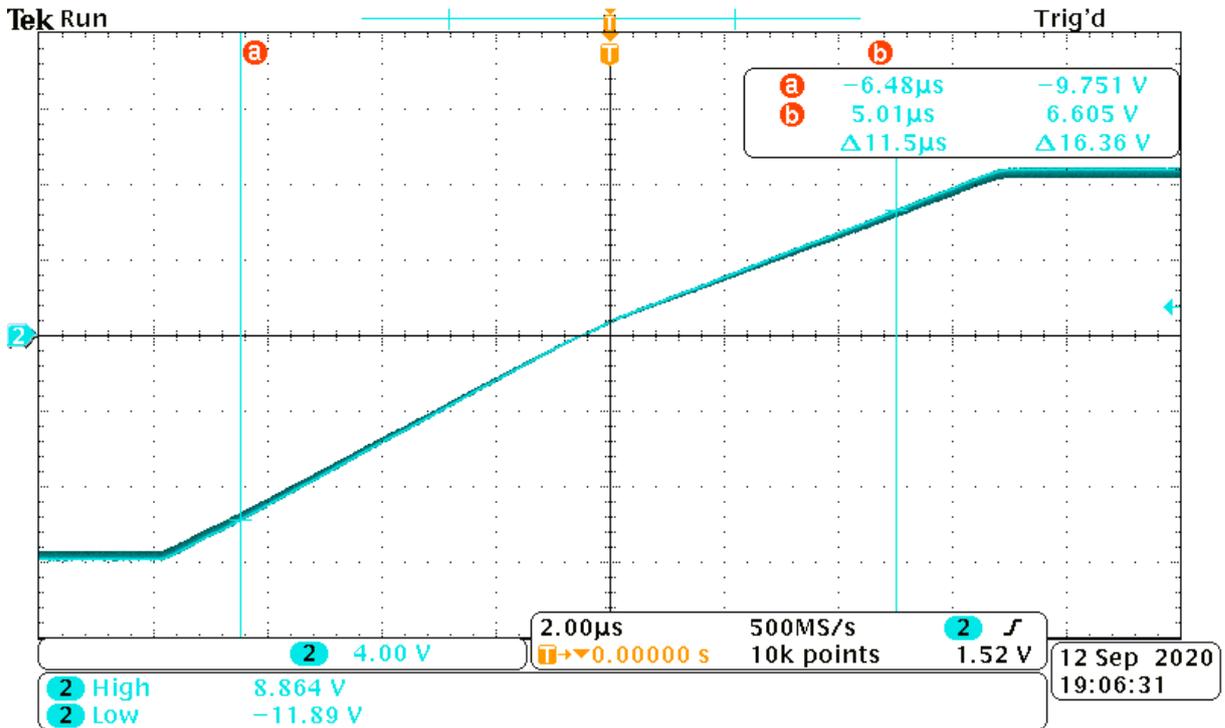
Tabela 5.5 – Tempo de subida e descida do PWM em V_A .

	Parâmetro do sinal	Estado	Valor máximo
Tempo de subida	De 10 % até 90 %	B2	10 μs
		C2	7 μs
Tempo de descida	De 90 % até 10 %	B2 e C2	13 μs

Fonte: Autor.

Sabendo disso, foram realizados os testes para verificar se os resultados obtidos estavam adequados as exigências das normas. O primeiro realizado foi para o estado B2. Considerando que a parcela positiva do PWM neste estado estava em 8,86 V e a parcela negativa estava em -11,89 V, deve-se medir o tempo de subida entre aproximadamente -9,81 V e 6,79 V. A Figura 5.8 apresenta o resultado obtido para o teste do tempo de subida para o estado B2.

Figura 5.8 – Tempo de subida para o estado B2.

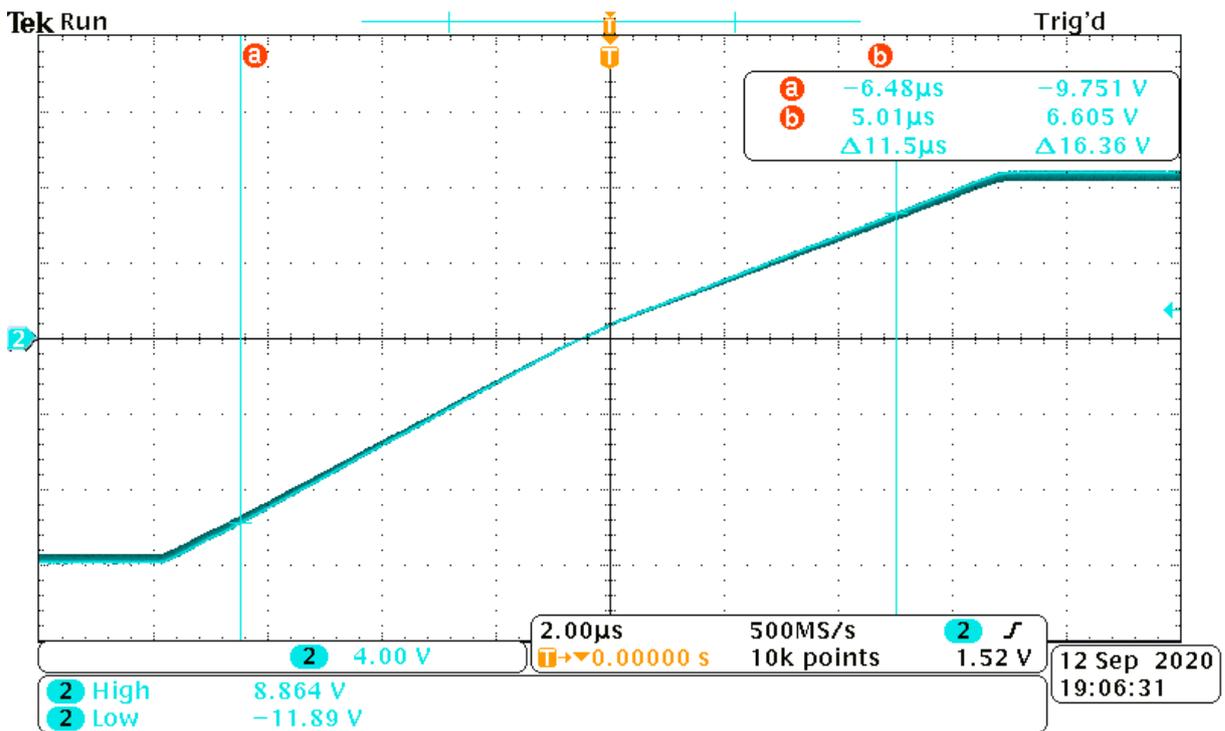


Fonte: Autor.

Como pode-se perceber através da Figura 5.8 o tempo de subida foi de $11,5 \mu\text{s}$, valor maior do que os $10 \mu\text{s}$ máximos exigidos pela norma. Logo esta exigência não foi cumprida, e o principal motivo para isso, é a taxa de variação da tensão no tempo (*slew rate*) do amplificador operacional *rail-to-rail* utilizado ser insuficiente para esta aplicação.

Em seguida, foi realizado o mesmo teste, agora para o estado C2. Como a parcela positiva do PWM estava em $5,76 \text{ V}$, e a parcela negativa em $-11,89 \text{ V}$, deve-se medir o tempo entre aproximadamente $-10,1 \text{ V}$ e $3,99 \text{ V}$. A Figura 5.9 apresenta o resultado deste teste.

Figura 5.9 – Tempo de subida para o estado C2.

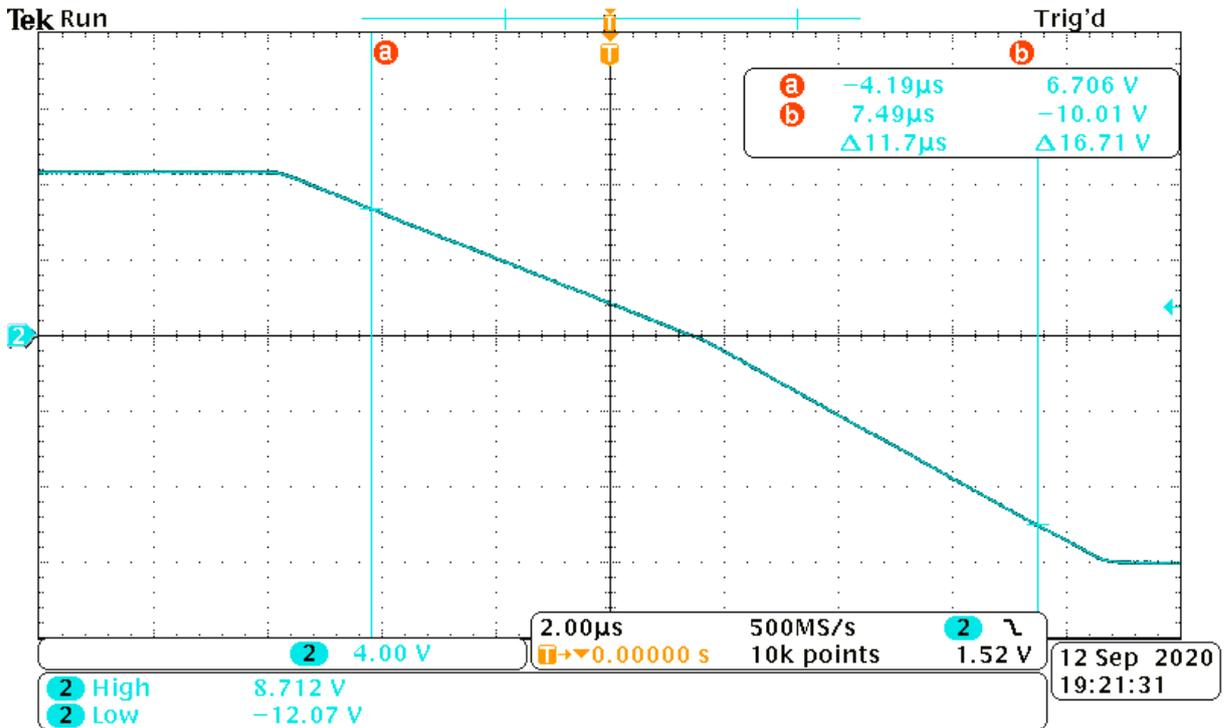


Fonte: Autor.

Como pode-se perceber na Figura 5.9 o tempo de subida ficou em 11 μs, muito acima dos 7 μs aceitos pelas normas, novamente o provável motivo é a *slew rate* do amplificador operacional. Desta forma, a estação de recarga não passou neste teste. Uma solução para isso, é substituir o amplificador operacional utilizado por outro com um valor de *slew rate* melhor.

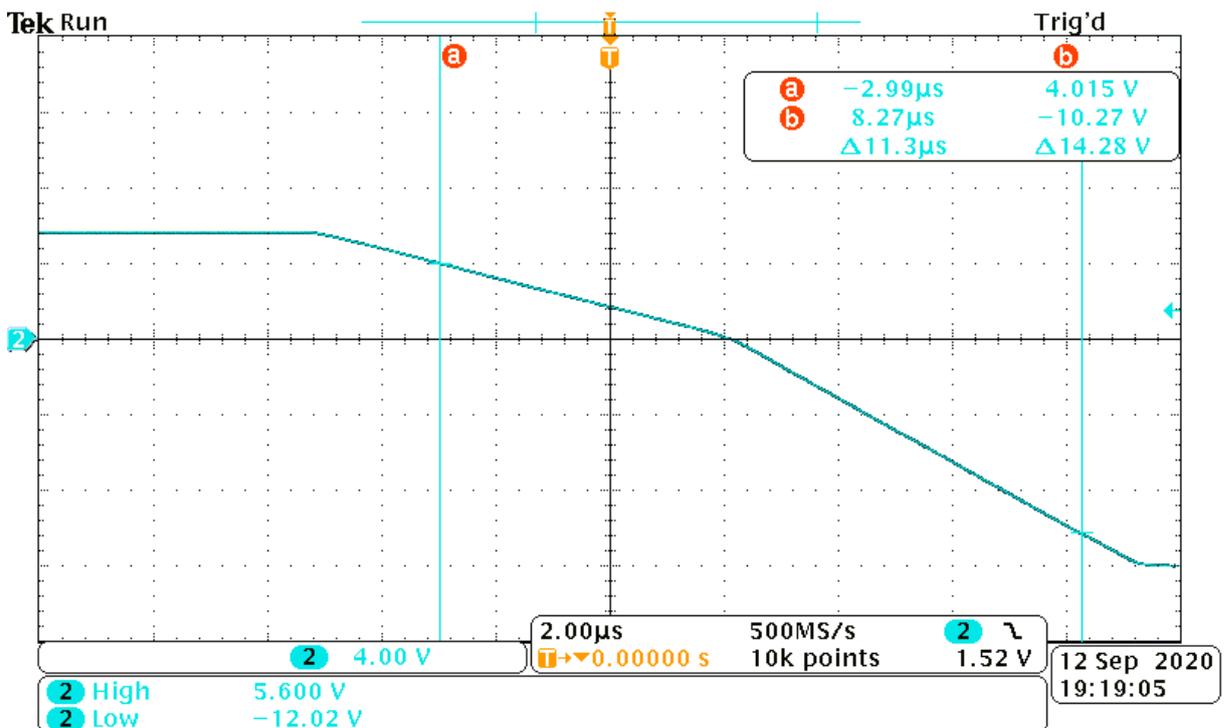
Por último foram realizados os teste do tempo de descida do sinal PWM para os estados B2 e C2. As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam os resultados obtidos.

Figura 5.10 – Tempo de descida para o estado B2.



Fonte: Autor.

Figura 5.11 – Tempo de descida para o estado C2.



Fonte: Autor.

Como pode-se perceber através das Figuras 5.10 e 5.11 o tempo dos estados B2

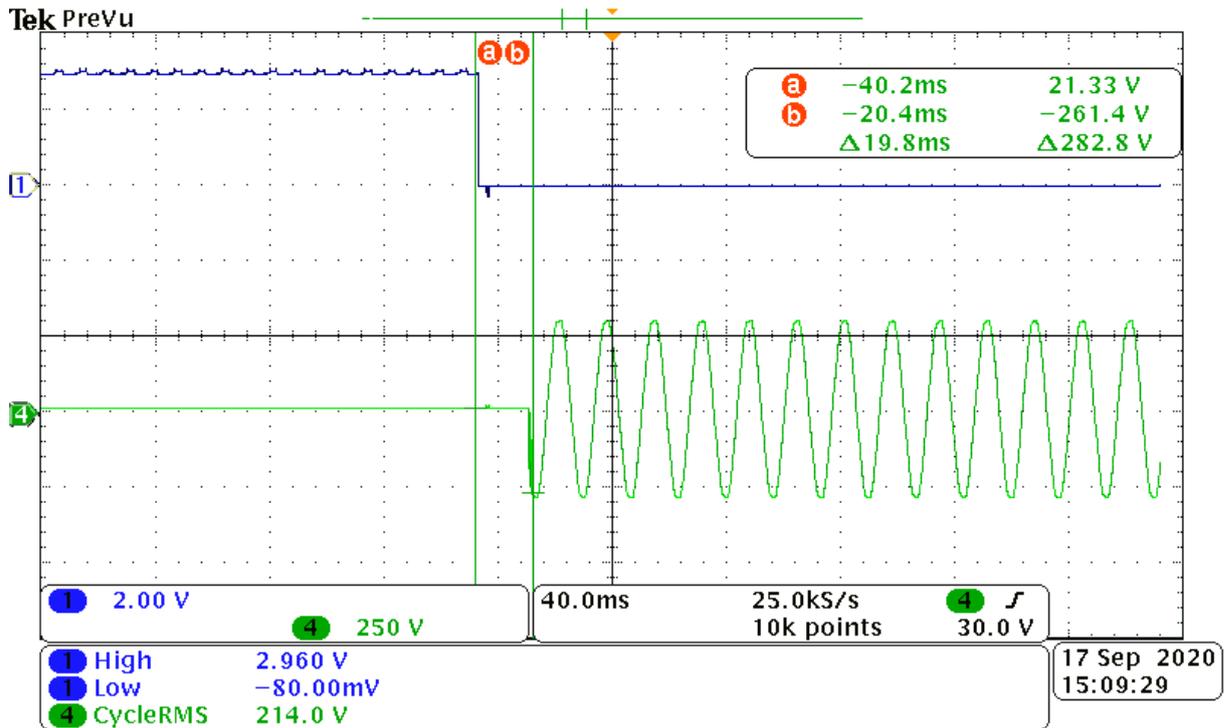
e C2 foram respectivamente 11,7 e 11,3 μs , ambos dentro do limite de 13 μs estabelecido nas normas internacionais. Com isso, pode-se concluir que o tempo de descida deste amplificador operacional *rail-to-rail* utilizado para geração do sinal PWM está adequado, porém não está adequado para o tempo de subida. Logo, para que esta estação de recarga seja aprovada em todos os testes exigidos é necessário substituir este amplificador operacional por outro com um maior valor de *slew rate*. Um possível modelo de amplificador operacional *rail-to-rail* que satisfaz essa especificação é o LM7321, que apresenta valor de *slew rate* de 18 V por microssegundo, bem melhor do que os 1,5 V por microssegundo do LM7341 utilizado.

5.3.5 Tempo de resposta da contatora

As normas internacionais que regulamentam o desenvolvimento de estações de recarga exigem que o período de tempo entre o momento em que o sinal é enviado, até o momento que a chave comutadora muda de posição não pode ser maior do que 100 ms. Realizando este teste pode-se saber qual é o tempo necessário desde o momento que a estação identifica que deve abrir ou fechar a contatora até o momento em que isso realmente acontece. Isso nos permite saber quando a estação está alimentando a entrada do carregador *on-board* do veículo elétrico, e quando não está.

Por esse motivo, deve-se medir o tempo de resposta no acionamento da contatora. A Figura 5.12 apresenta o sinal enviado pelo microcontrolador em azul escuro, e a tensão fornecida pela estação ao veículo elétrico em verde.

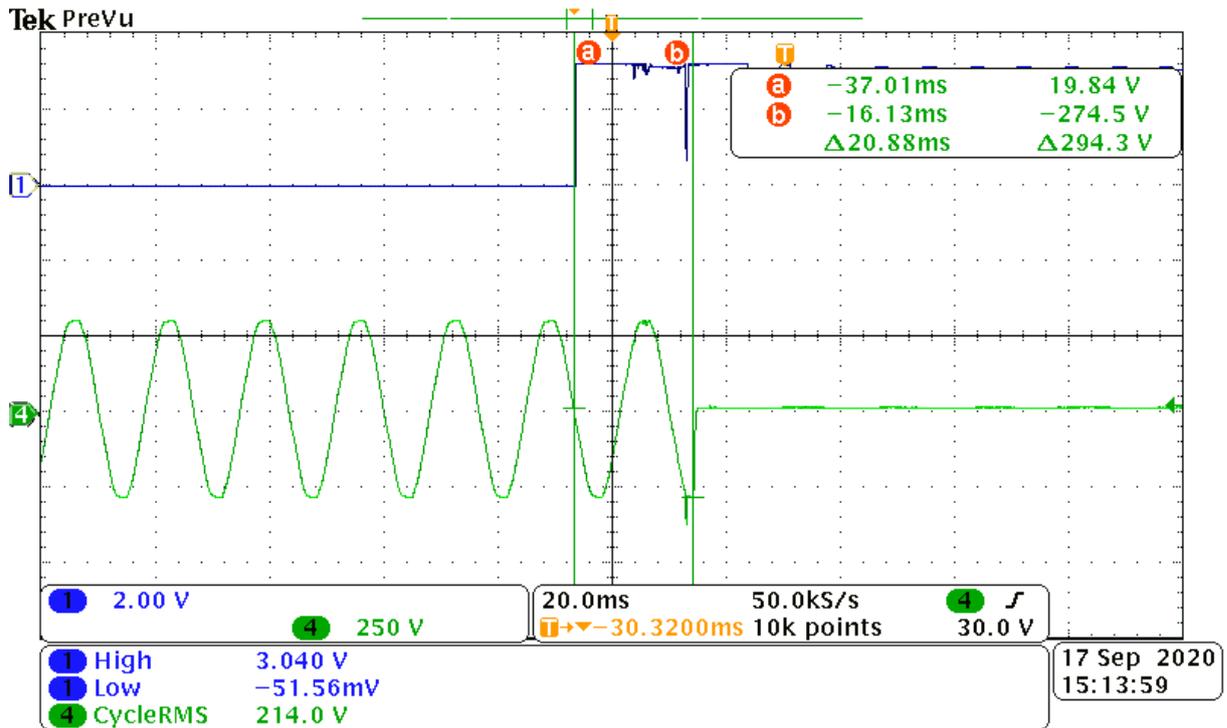
Figura 5.12 – Tempo necessário para o fechamento dos contatos principais da contatora.



Fonte: Autor.

Percebe-se que o período entre o momento em que o controlador envia o sinal para o fechamento até o momento em que a tensão é fornecida é de 19,8 ms, valor que é menor do que os 100 ms exigidos pelas normas, logo a estação passou por esse primeiro teste. Deve-se ainda testar o tempo necessário desde o momento em que o controlador envia o sinal para abrir os contatos principais da contatora, até o momento em que isso acontece. A Figura 5.13 apresenta o resultado para esse teste.

Figura 5.13 – Tempo necessário para a abertura dos contatos principais da contatora.



Fonte: Autor.

Percebe-se através da Figura 5.13 que o tempo necessário para abrir a contatora foi de pouco menos que 20,88 ms, logo também está adequado as exigências da norma. Por fim, pode-se concluir que a contatora escolhida, juntamente com o seu sistema de acionamento estão adequados para utilização como chave de controle no fornecimento de energia ao veículo elétrico.

5.3.6 Resposta da estação em reação as transições de estados

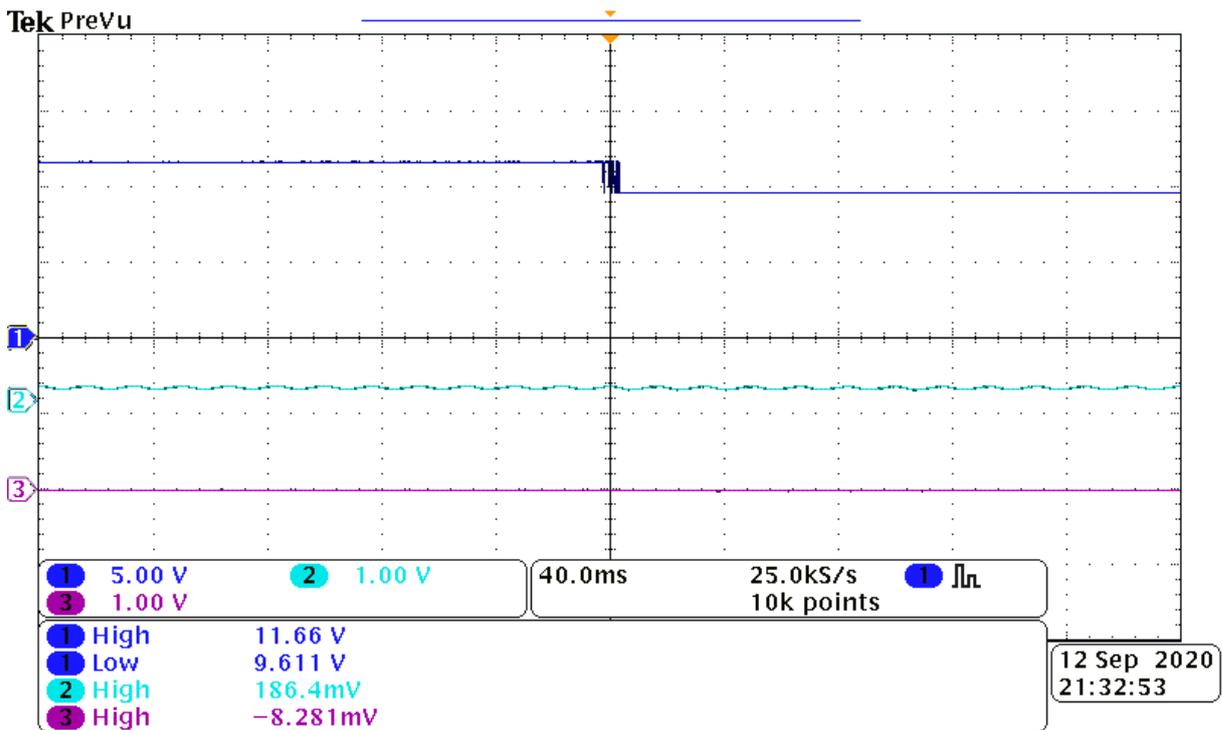
As normas IEC 61851-1 (2017) e SAE J1772 (2017) exigem que as estações realizem determinadas ações durante as transições entre os estados, sendo que algumas ações possuem tempo máximo ou mínimo para serem realizadas. Nesta subseção serão apresentadas as transições descritas nas normas citadas anteriormente que são necessárias para o teste de estações de recarga, assim como as ações que a estação deve realizar, e os resultados obtidos durante os testes.

Entre parenteses ao lado de cada transição, também será apresentado o número da sequência equivalente descrita na IEC 61851-1 (2017). Assim será mais fácil localizar-se na máquina de estados da Figura 2.8 e na Tabela 2.6, que servem de base para o entendimento de cada estado e cada transição.

5.3.6.1 Transição do estado AX para o BX (Sequência 1.1)

Uma transição do estado AX para o BX acontece quando a estação de recarga é conectada um veículo elétrico, e este veículo elétrico não está pronto para receber energia. Logo, a estação de recarga não pode fechar a contatora, nem travar o cabo de recarga na estação. A Figura 5.14 apresenta o sinal PWM em V_A em azul escuro, em ciano o sinal de comando da contatora, e em roxo o sinal de comando da trava do soquete da estação.

Figura 5.14 – Resultados da transição do estado A1 para o B1.



Fonte: Autor.

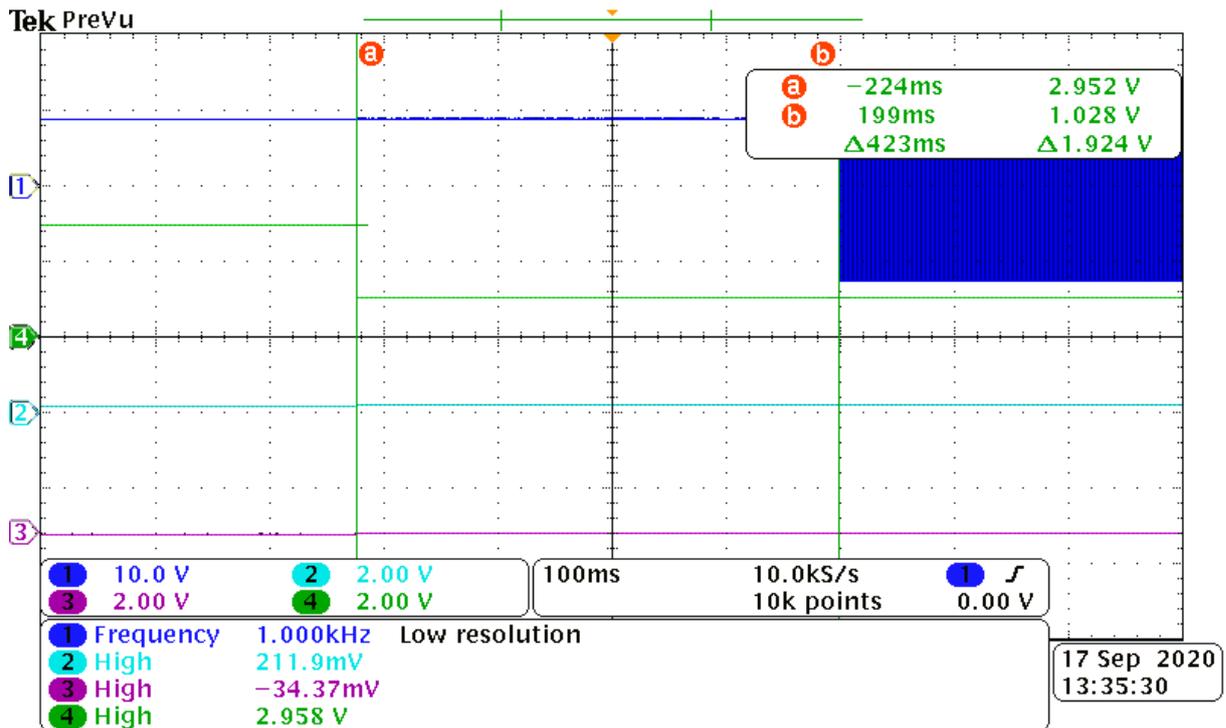
Como pode-se ver através das medidas da Figura 5.14, houve uma mudança de 11,66 V para 9,611 V na tensão em V_A , ou seja, passa-se do estado A1 para o estado B1, e os sinais da contatora e da trava do soquete da estação permaneceram em nível lógico baixo. Isso demonstra que eles estão realizando a ação correta para esta transição, já que o veículo não está pronto para carregar.

5.3.6.2 Transição do estado B1 para o B2 (Sequência 3.1)

Quando a estação de recarga está no estado B1, ou seja, já está conectada através do cabo de recarga ao VE, e ela identifica através do contato proximidade qual é a corrente nominal do cabo, ela deve gerar um sinal PWM que contenha na largura de pulso a corrente máxima que ela pode fornecer naquele momento. Com isso, ela passa do estado B1 para

o B2, ou seja, ela passa de não pronta para fornecer energia, para pronta para fornecer energia. A Figura 5.15 apresenta esta transição, novamente, como em todas as figuras dessa subseção o sinal de cor azul escuro representa o sinal PWM em V_A , a forma de onda em ciano representa o sinal de comando da contatora, a forma de onda em roxo representa o sinal de comando da trava do soquete da estação, e a forma de onda em verde representa a tensão no contato proximidade.

Figura 5.15 – Resultados da transição do estado B1 para o B2



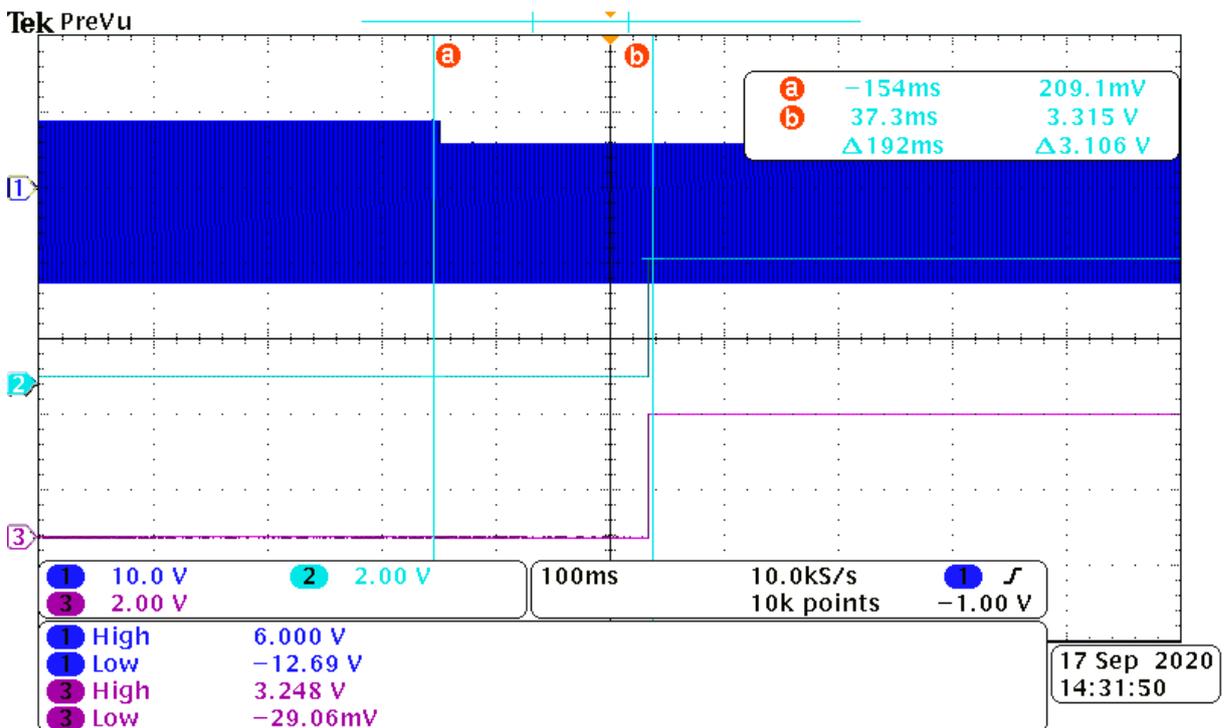
Fonte: Autor.

Como pode-se perceber na Figura 5.15 após 423 ms a estação de recarga receber a informação através do contato proximidade de que um cabo de recarga foi conectado à ela, a mesma passa a gerar um PWM com razão cíclica codificando a máxima corrente que ela pode fornecer ao veículo naquele momento, sendo o tempo máximo exigido em norma para isso de 10 segundos. Pode-se ver também que a contatora e a trava do cabo continuam com sinais baixos, o que indica que elas estão abertas, o que está adequado, visto que o veículo continua não estando pronto para receber energia. Com base nesses resultados, pode-se afirmar que a estação de recarga realizou as ações corretas durante esta transição.

5.3.6.3 Transição do estado B2 para o C2 (Sequência 4)

Estando a recarga no estado B2, ou seja, estação conectada ao veículo elétrico e pronta para fornecer energia, porém o veículo não está pronto para receber energia, caso o veículo passe a estar pronto para receber energia, ou seja, passe para o estado C2, a estação de recarga deve fechar a contatora e travar o cabo de recarga ao soquete de saída da estação em no máximo 3 segundos. A Figura 5.16 apresenta os resultados para esta transição.

Figura 5.16 – Resultados da transição do estado B2 para o C2.



Fonte: Autor.

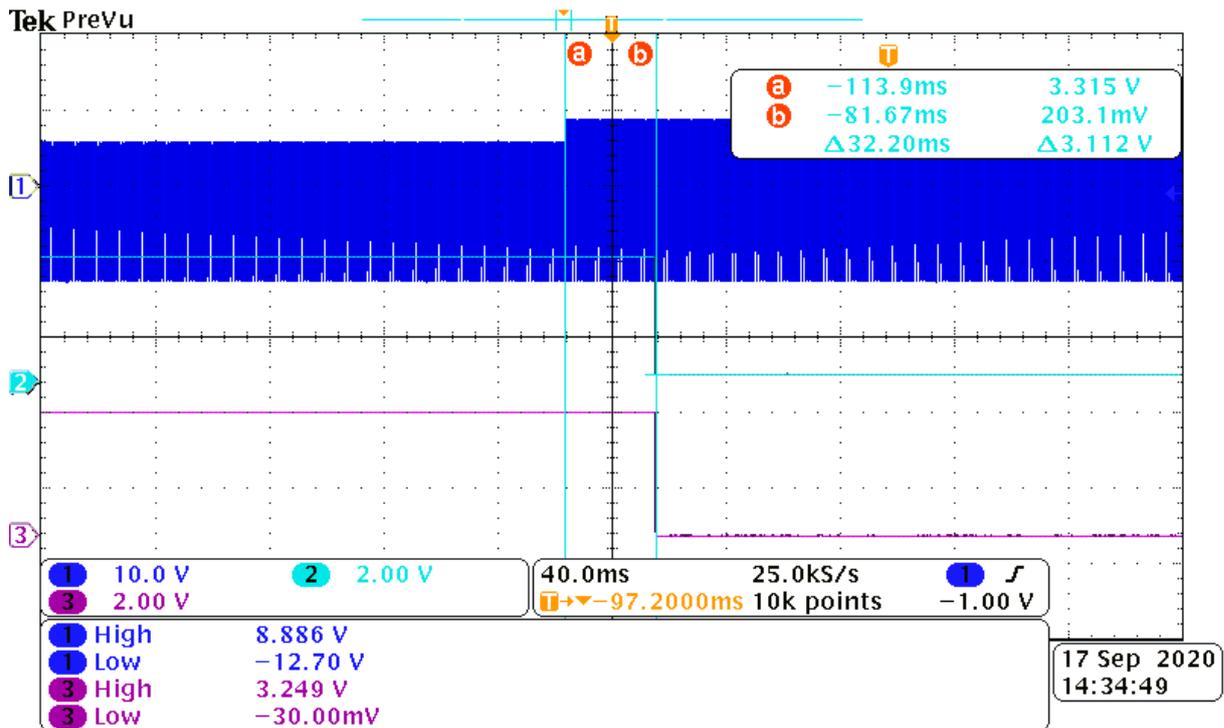
Como pode-se ver na Figura 5.16 a parcela positiva do PWM em V_A passou de aproximadamente 9 V para 6,6 V, ou seja, passou do estado B2 para o C2, e como resposta a esta transição a estação de recarga a estação de recarga enviou sinais lógicos após 192 ms, para que a contatora fechasse seus contatos principais, e a trava do soquete prendesse o cabo. Com base nesses resultados, pode-se afirmar que a estação de recarga realizou as ações corretas durante a transição do estado B2 para o estado C2.

5.3.6.4 Transição do estado C2 para o B2 (Sequência 8.1)

Quando o veículo está sendo recarregado, ou seja, está no estado C2, e pelo fato de a recarga ser concluída, ou por algum outro motivo ele passa a não mais estar pronto

para receber energia, ele sinaliza a estação a sua nova situação através da alteração da resistência no circuito piloto do lado do veículo. Com isso, a recarga passa do estado C2 para o estado B2. Quando isso acontece, a estação deve abrir a chave que disponibiliza energia ao veículo, neste caso a contatora, após no máximo 100 ms e deve destravar o cabo de recarga do soquete da estação. A Figura 5.17 apresenta o resultado para esta transição.

Figura 5.17 – Resultado da transição do estado C2 para o B2.



Fonte: Autor.

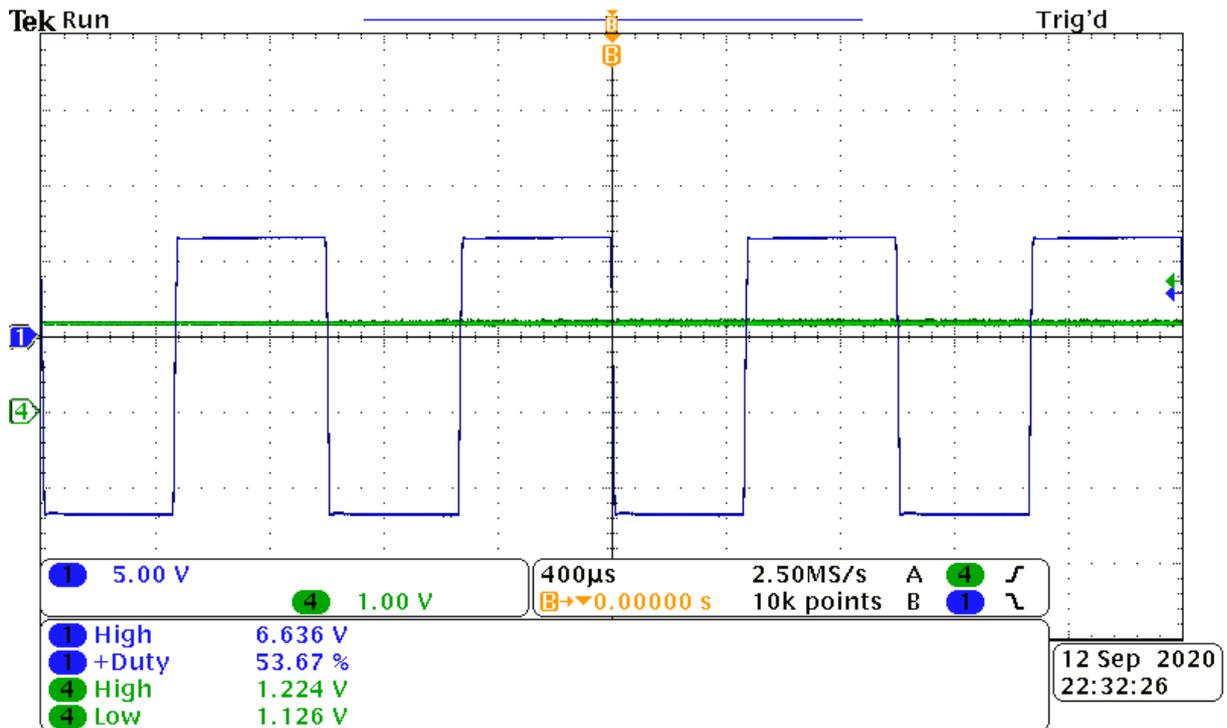
Como pode-se perceber ao analisar a Figura 5.17, a estação enviou os sinais para abrir a contatora e para destravar o cabo de recarga do soquete da estação 32,2 ms após a transição do estado C2 para o B2. Mesmo se levar em consideração que são necessários cerca de 20 ms segundos para o sinal enviado pela estação ter efeito na contatora, ainda assim a estação atendeu aos requisitos de tempo e realizou as ações corretas, logo ela passou neste teste.

5.3.6.5 Sequência 6 da IEC 61851-1

Na sequência 6 da IEC 61851-1 (2017) não há uma transição de estado, porém essa sequência deve ser testada pois há uma alteração na corrente máxima que a estação de recarga pode fornecer ao veículo elétrico. Com isso, a recarga que estava no estado C2, continua no estado C2, porém a razão cíclica do PWM deve ser alterada em até 10

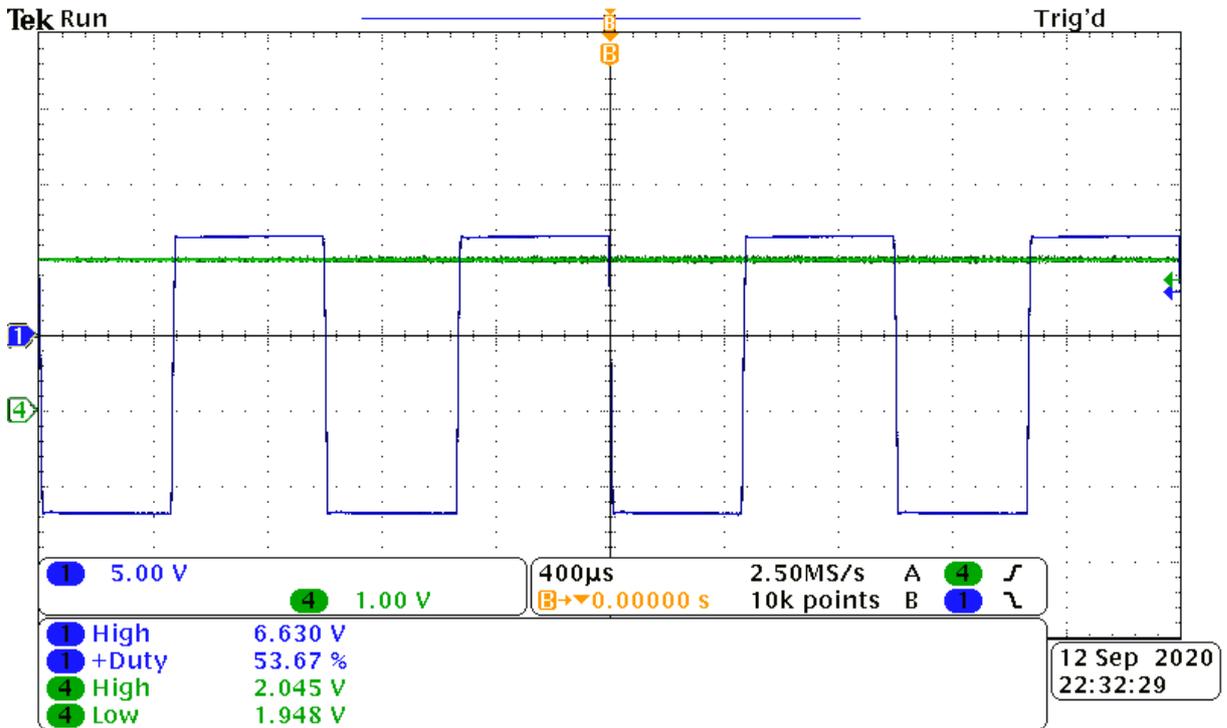
segundos após a detecção da nova corrente máxima. Para realizar este teste, foi alterada a corrente máxima permitida pelo cabo conectado à estação utilizando o emulador do cabo, sendo a corrente nominal inicialmente emulada pelo emulador do cabo de 32 A, e a corrente nominal do cabo emulado em seguida de 20 A. Com isso, a estação de recarga apresentou a seguinte sequência de ações mostradas da Figura 5.18 a Figura 5.20.

Figura 5.18 – Estado C2, com cabo emulado de 32 A, e razão cíclica representando 32 A.



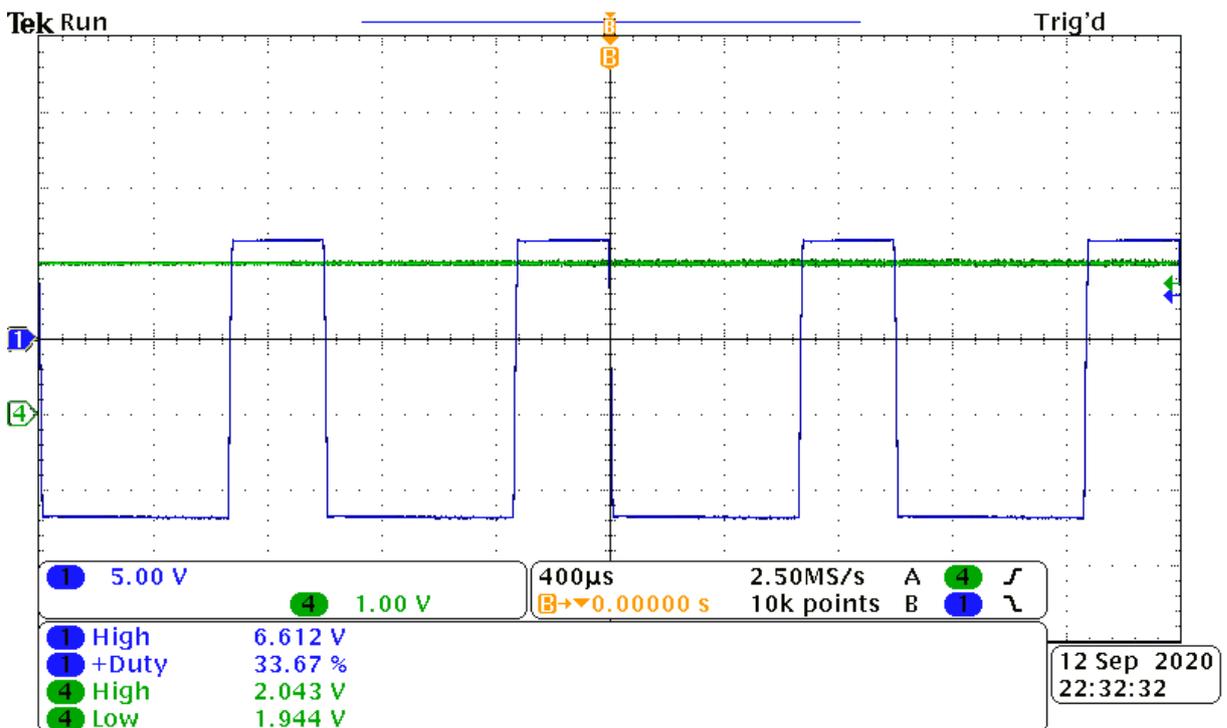
Fonte: Autor.

Figura 5.19 – Estado C2, com cabo emulado de 20 A, e razão cíclica representando 32 A.



Fonte: Autor.

Figura 5.20 – Estado C2, com cabo emulado de 20 A, e razão cíclica representando 20 A.



Fonte: Autor.

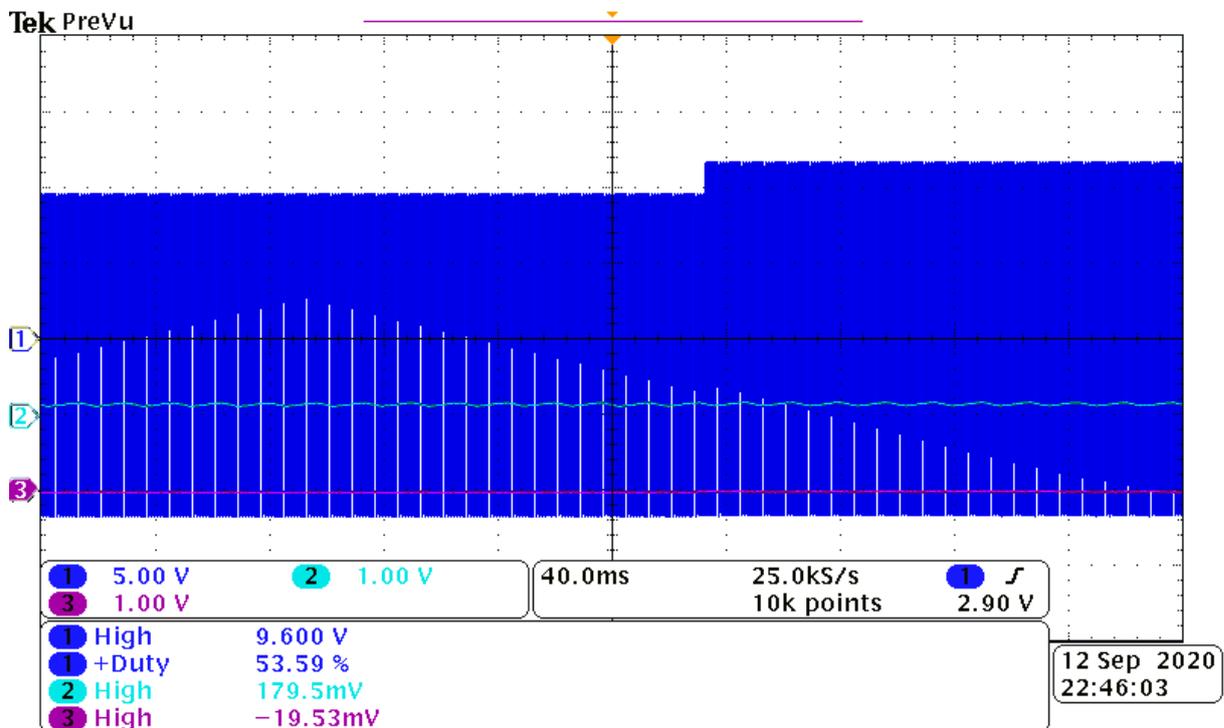
Percebe-se que na Figura 5.18 que a recarga está no estado C2, o cabo emulado

é o que apresenta corrente nominal de 32 A, e a razão cíclica do PWM está informando que a corrente máxima da estação é de 32 A. Três segundo após, a Figura 5.19 mostra que o cabo de recarga emulado agora apresenta corrente nominal de 20 A, a partir deste momento a estação de recarga tem no máximo 10 segundos para atualizar a razão cíclica do PWM. Porém observando a Figura 5.20 percebe-se que 3 segundos após receber a informação da nova corrente máxima permitida, a estação já atualizou a sua razão cíclica, e ela informa agora que a nova corrente máxima é de 20 A.

5.3.6.6 Transição do estado BX para o AX (Sequência 2.1)

Uma transição do estado BX para o AX representa que o veículo elétrico que estava inicialmente conectado à estação, agora está desconectado. Com isso, a tensão da parcela superior do PWM que era de aproximadamente 9 V passa para aproximadamente 12 V, e a contatora e a trava do cabo de recarga devem permanecer abertas. A Figura 5.21 apresenta o resultado obtido durante esta transição.

Figura 5.21 – Resultado da transição do estado B2 para o A2



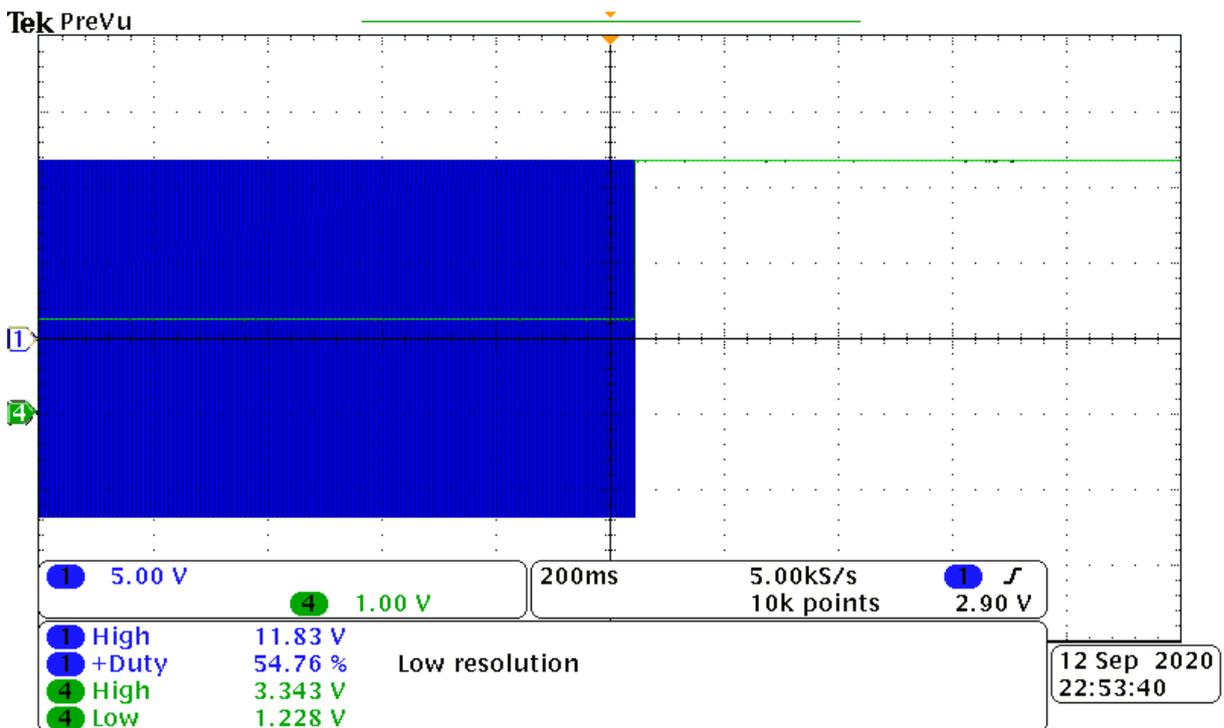
Fonte: Autor.

Como pode-se ver na Figura 5.21 houve a transição do estado B1 para o A1, e a estação de recarga permaneceu com os sinais no nível lógico baixo para as saídas da contatora e da trava do cabo de recarga. Logo está realizando as ações corretas para esta transição.

5.3.6.7 Transição do estado A2 para o A1 (Sequência 9.3)

Após o veículo já estar desconectado da estação, caso o cabo de recarga seja desconectado também da estação, a mesma perderá a informação da corrente máxima que pode fornecer, visto que o contato proximidade ficará aberto após a retirada do cabo, então a mesma deve conforme a norma SAE J1772 (2017) em até 2 segundos interromper a codificação da corrente máxima permitida através da razão cíclica, e gerar um PWM com razão cíclica de 100 %. A Figura 5.22 apresenta o resultado obtido durante esta transição.

Figura 5.22 – Resultado da transição do estado A2 para o A1.



Fonte: Autor.

Como pode-se ver na Figura 5.22 a estação interrompeu imediatamente a codificação da corrente máxima permitida por ela após a desconexão do cabo de recarga. Dessa forma pode-se afirmar que ela realizou a ação correta nesta transição.

5.3.6.8 Conclusões da resposta da estação as transições de estados

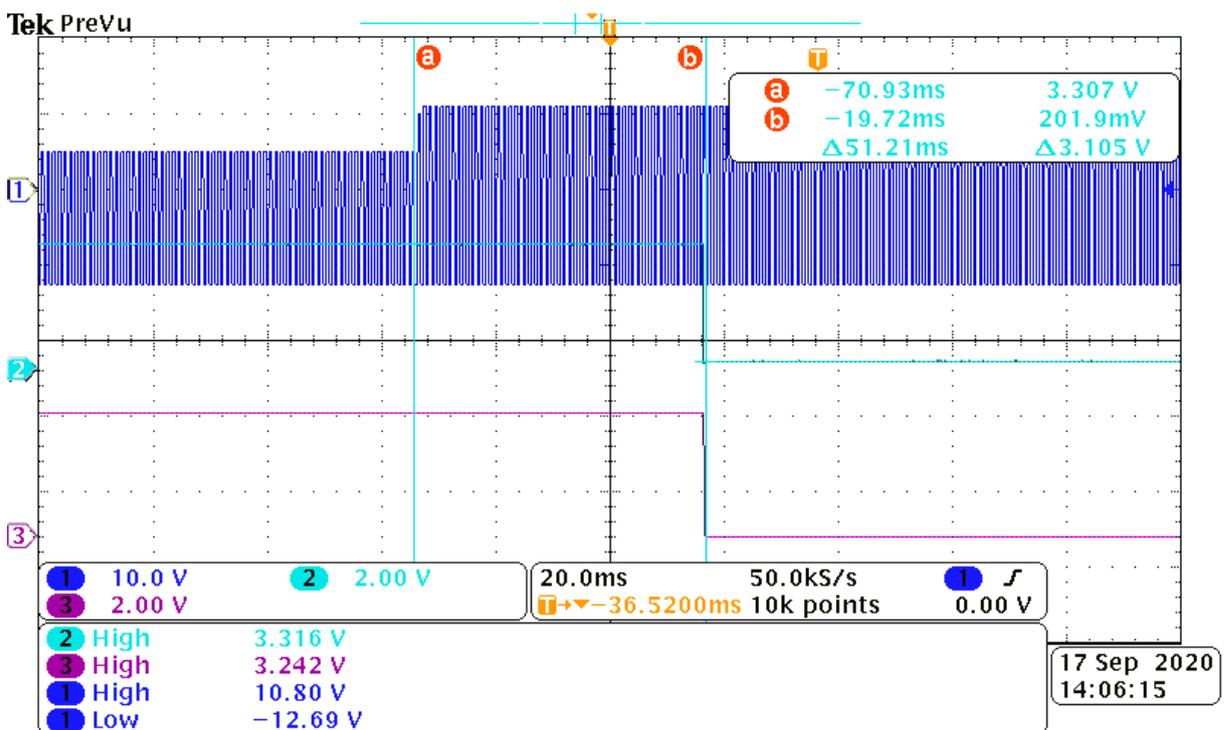
Após realizadas todas as transições necessárias para o teste da estação de recarga exigidos nas normas internacionais, foram testadas essas mesmas transições, porém desta vez utilizando os limites superiores e inferiores de tensão de cada estado, mesmo assim, a estação apresentou respostas adequadas as transições. Logo, pode-se afirmar que ela está funcionando adequadamente e que cumpriu com todas as exigências

descritas nas normas.

5.3.7 Resposta da estação em reação a perda do condutor de proteção

Caso durante a recarga do veículo elétrico, ou seja no estado C2, haja uma interrupção no condutor de proteção entre a estação de recarga e o veículo elétrico, a estação de recarga deve em menos de 100 ms cessar o fornecimento de energia ao VE através da abertura da contatora. A Figura 5.23 mostra o resultado obtido durante este teste.

Figura 5.23 – Resultado da interrupção do condutor de proteção.



Fonte: Autor.

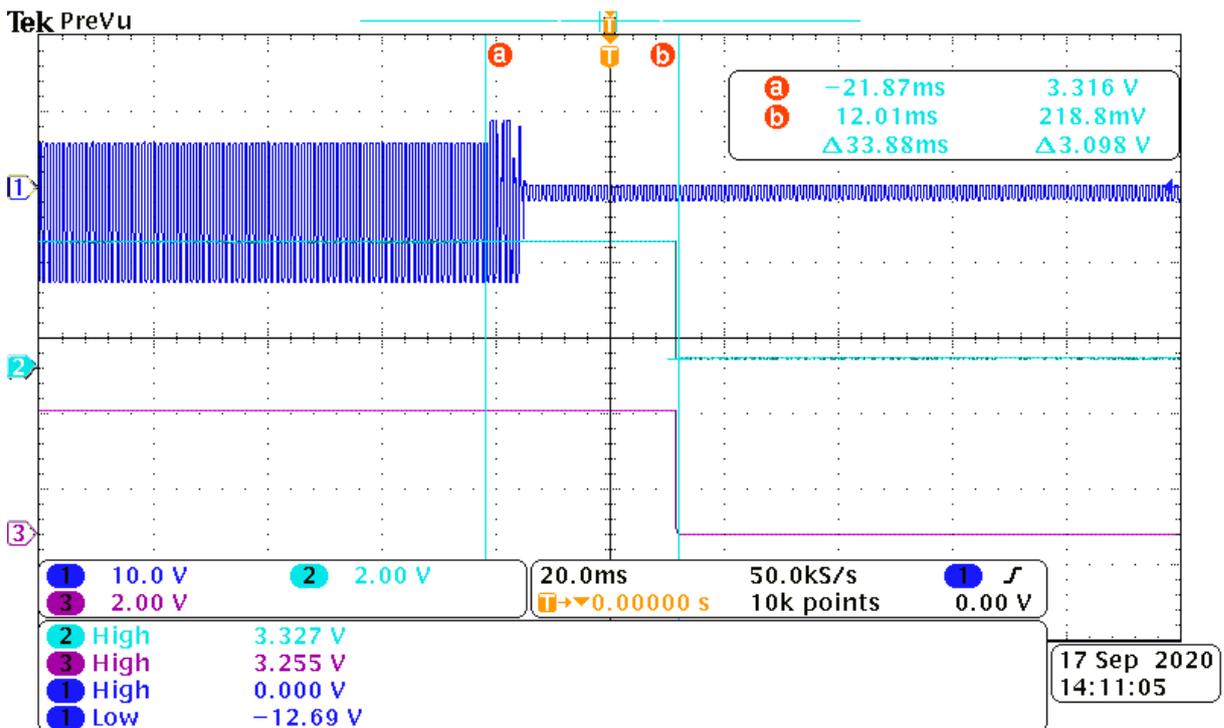
Como pode-se perceber na Figura 5.23 51,21 ms após o condutor de proteção ser interrompido, a estação de recarga enviou os sinais para a abertura da contatora e para destravar o cabo de recarga da estação.

5.3.8 Resposta da estação em reação a um curto-circuito no condutor piloto

Caso haja um curto-circuito entre o condutor piloto e o condutor de proteção a tensão V_A apresentará valores menores do que ± 1 V, com isso a estação de recarga deve identificar o estado E, e tomar as ações de abrir a contatora caso ela esteja fechada, e destravar a trava do soquete de saída da estação ambas as ações em no máximo 3

segundos. Sabendo disso, durante a emulação do estado C2, ou seja, veículo e estação prontos para realizarem a recarga, utilizando o emulador de veículos elétricos foi realizado um curto circuito entre o condutor piloto e o condutor proximidade, com isso, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 5.24.

Figura 5.24 – Resposta da estação em reação a um curto-circuito entre o condutor de proteção e o piloto.



Fonte: Autor.

Percebe-se ao analisar a Figura 5.24 que 33,88 ms após o curto-circuito ser simulado, a estação de recarga já enviou os sinais para a abertura da contatora e da trava do soquete. Percebe-se que durante a transição do estado C2 para o estado E houve uma oscilação na tensão em V_A , porém a estação de recarga deve ser capaz de descartar valores transitórios. Como as ações tomadas foram corretas, pode-se afirmar que ela está realizando as ações corretas tanto caso um curto-circuito entre o condutor de proteção e o piloto aconteça, quanto distúrbios transitórios aconteçam.

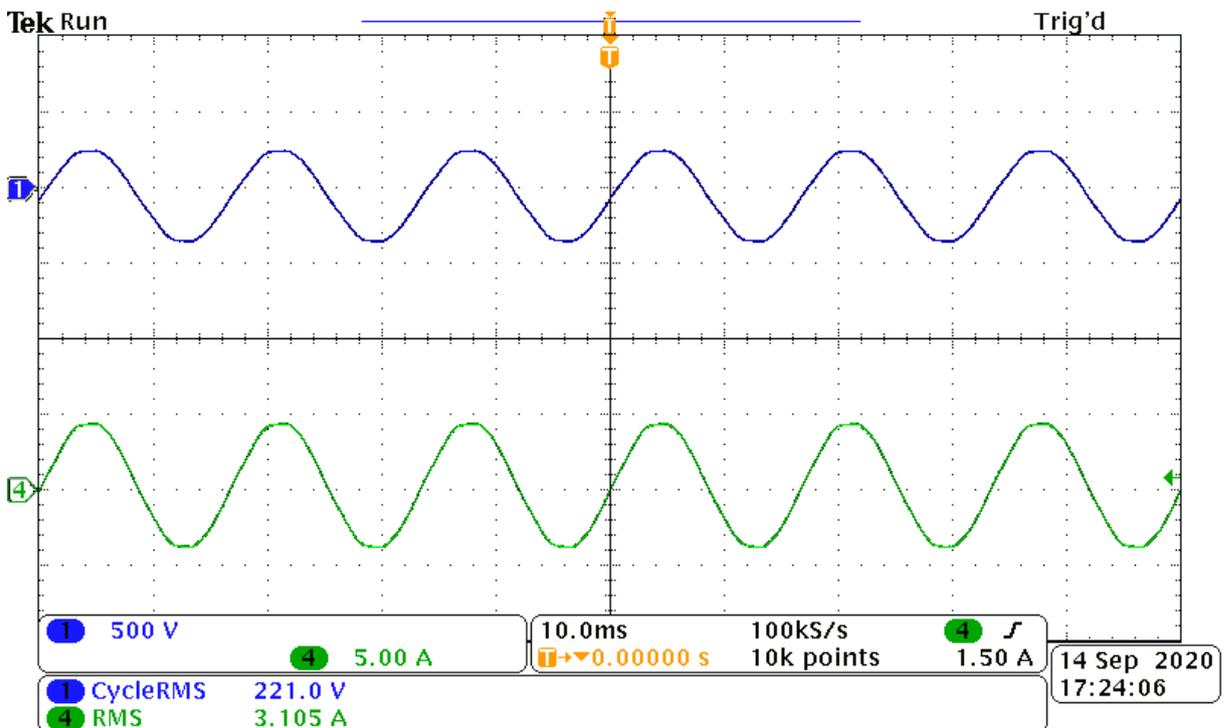
5.4 RESULTADOS DA MEDIÇÃO DE ENERGIA

Para verificar se o circuito de medição de energia está medindo e calculando o consumo de energia corretamente, foi adicionada uma carga a saída da estação de recarga que irá simular um veículo recarregando. Devido ao fato de o conversor interno ao veículo possuir correção do fator de potência, pode-se utilizar uma carga resistiva para simular

a corrente drenada pelo conversor. Em virtude de o Grupo de Eletrônica de Potência e Controle apenas apresentar no momento do teste resistores de até 1 kW, foi escolhido um resistor de 73 Ω que quando aplicado 220 V consumirá aproximadamente 660 W. Potência bem menor do que um veículo elétrico irá consumir, porém o suficiente para testar a medição de energia.

Após instalada essa carga resistiva, o primeiro teste feito foi verificar se a estação estava realmente fornecendo tensão a carga, e qual a corrente que a carga estava consumindo. A Figura 5.25 apresenta este resultado.

Figura 5.25 – Tensão e corrente na carga.



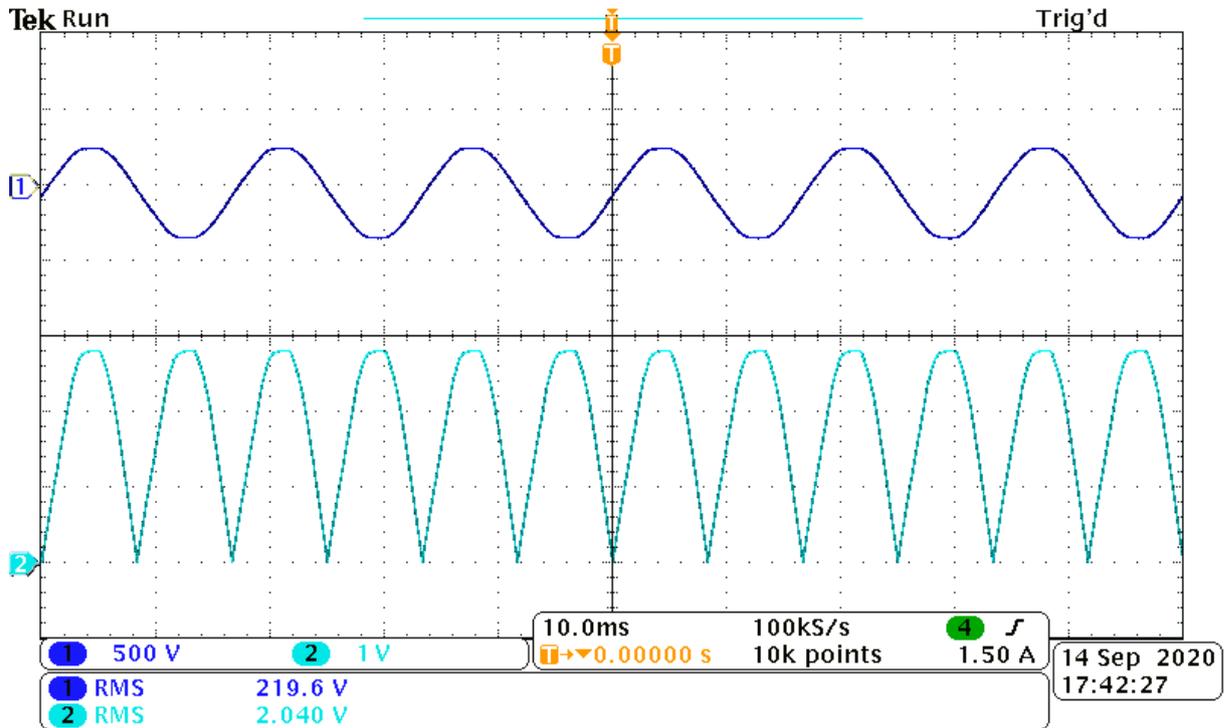
Fonte: Autor.

Como pode-se perceber na 5.25, a carga está sendo alimentada corretamente com tensão, e a corrente drenada por ela está em aproximadamente 3,1 A.

Lembrando que a estação de recarga não especifica a corrente que veículo elétrico deve drenar, ela apenas informa a corrente máxima que ela pode fornecer a ele naquele momento. Caso o veículo drene mais corrente do que ela informa, a estação deve mover-se para um estado X1, ou seja, seu PWM deve tornar-se 100 %, ou caso a corrente ultrapasse 130 % da corrente nominal da estação, a proteção contra sobrecarga deve atuar.

Em seguida, foi realizado o teste para verificar se o circuito de condicionamento da medição de tensão está funcionando adequadamente. A Figura 5.26 apresenta a tensão medida na carga, e a tensão na saída do circuito de condicionamento de tensão.

Figura 5.26 – Resultado do circuito de condicionamento de tensão.



Fonte: Autor.

Como pode-se ver na Figura 5.26 a tensão sobre a carga naquele momento era de 219,6 V, se multiplicar esse valor pelos ganhos do sensor de tensão, e do circuito de condicionamento chega-se ao seguinte valor de tensão na entrada do conversor analógico-digital do microcontrolador.

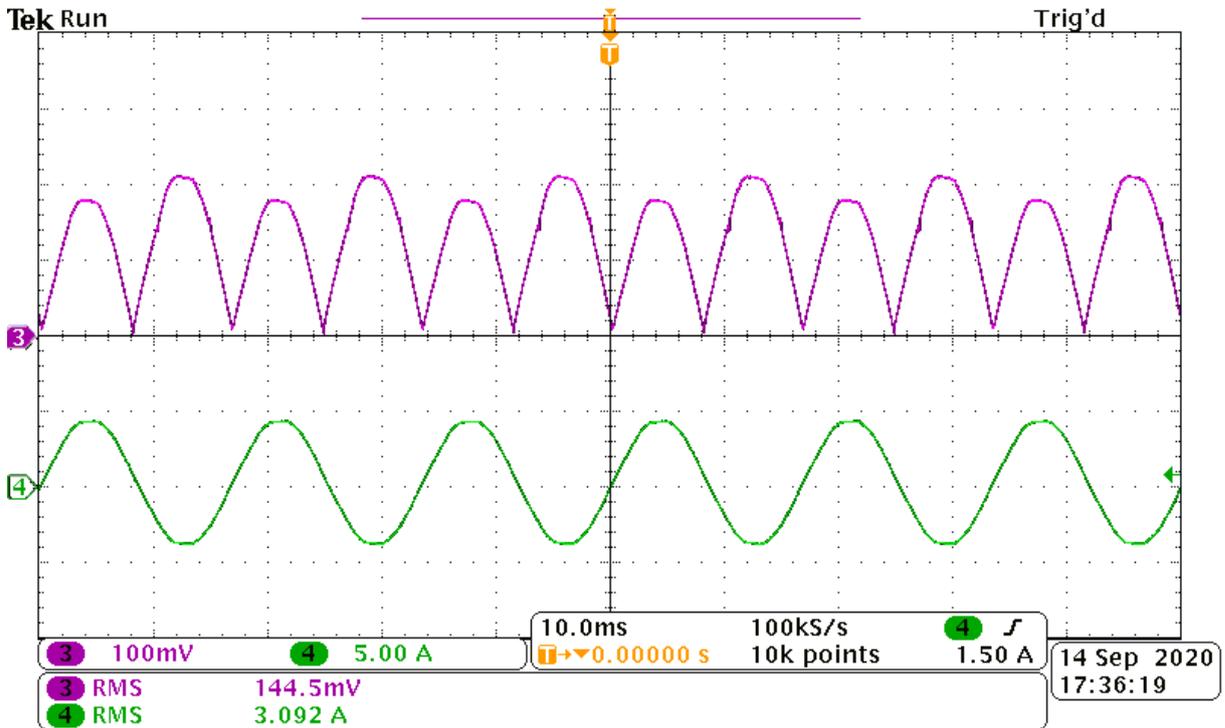
$$V_{AD_Tensão} = 219,6 V_{RMS} * A_{sensor_tensão} * A_{circuito_de_condicionamento} \quad (5.1)$$

$$V_{AD_Tensão} = 219,6 V_{RMS} * \frac{3}{220} * 0,68 = 2,036 V_{RMS} \quad (5.2)$$

A tensão na entrada do conversor AD do controlador deveria ser de 2,036 V_{RMS}, porém foi de 2,040 V_{RMS}, um erro menor do que 0,2 %. Dessa forma, pode-se afirmar que o circuito de condicionamento do sinal de tensão está funcionando corretamente, visto que o erro do sinal medido em relação ao sinal calculado foi muito pequeno.

Em seguida foi realizado o mesmo teste para o circuito de condicionamento da medição de corrente. A Figura 5.27 apresenta o resultado.

Figura 5.27 – Resultado do circuito de condicionamento de corrente.



Fonte: Autor.

Como pode-se ver através da Figura 5.27, a corrente drenada pela carga naquele momento era de 3,092 A, e a tensão na saída na entrada do conversor AD do microcontrolador era de 144,5 mV_{RMS}. É necessário verificar se essa tensão após o condicionamento do sinal está correta. Para isso, pode-se multiplicar a corrente da carga pelos ganhos do sensor e do circuito de condicionamento:

$$V_{AD_Corrente} = 3,092 \text{ A}_{\text{RMS}} * A_{\text{sensor_corrente}} * A_{\text{circuito_de_condicionamento}} \quad (5.3)$$

$$V_{AD_Corrente} = 3,092 \text{ A}_{\text{RMS}} * \frac{1 \text{ V}}{50 \text{ A}} * 2,35 = 145,3 \text{ mV}_{\text{RMS}} \quad (5.4)$$

Através dos cálculos chega-se que o valor de tensão deveria ser de 145,3 mV_{RMS}, porém foi de 144,5 mV_{RMS}, ou seja, apresentou um erro de aproximadamente 0,5 %. Valor que está adequado para a aplicação, visto que o cálculo do consumo de energia será utilizado apenas para o usuário saber qual foi a energia consumida durante a recarga.

6 CONCLUSÃO

Com o aumento no número de veículos elétricos circulando pelas ruas, haverá uma necessidade cada vez maior de carregadores de veículos elétricos. Dessa forma, todos aqueles que desejam recarregar seu VE em casa utilizarão estações de recarga, o que aumentará a procura por este equipamento. Tendo isso em vista, este trabalho apresentou o projeto, a implementação e os testes de uma estação de recarga projetada para quem deseja realizar a recarga do seu VE na própria residência. O projeto e os testes levaram em consideração as exigências estabelecidas nas normas internacionais IEC 61851-1 (2017) e SAE J1772 (2017). Os testes realizados nesta estação de recarga demonstraram que a mesma está realizando as ações corretas durante as transições entre os estados da recarga. A estação de recarga também está codificando corretamente a corrente máxima através da largura de pulso, gerando o sinal PWM com a frequência e a amplitude correta, mudando a posição dos contatos da chave comutadora dentro dos limites máximos de tempo, além de possuir circuitos de proteção que cumprem com todos os requisitos estabelecidos nas normas citadas anteriormente.

Em um único teste a estação de recarga não atendeu as exigências estabelecidas nas normas, que foi o teste do tempo de subida do sinal PWM medido em V_A , porém é possível resolver este problema através da simples substituição do amplificador operacional *rail-to-rail* presente no circuito de condicionamento por outro amplificador operacional que apresente uma melhor taxa de variação da tensão no tempo (*slew rate*).

Os circuitos propostos com o objetivo de fornecer mais informações sobre a recarga aos usuários funcionaram como o esperado, dando um destaque a esta estação de recarga quando comparada as concorrentes presentes no mercado. O cabo de recarga removível também trás a conveniência de poder ser utilizado em outras estações de recarga que não o possuem de forma nativa.

Como propostas futuras estão o projeto do gabinete e a utilização de comunicação sem fio para fornecer mais informações aos usuários da estação de recarga sobre o VE e sobre a recarga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Instalações elétricas de baixa tensão. In: . Rio de Janeiro, 2004. p. 209. Acesso em 21 abr. 2020. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=10146>>.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Dispositivo de manobra e comando de baixa tensão. parte 4-1: Contatores e chaves de partidas de motores - contatores e chaves de partidas de motores eletromecânicos. In: . Rio de Janeiro, 2018. p. 130. Acesso em 13 de mai. 2020. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=385758>>.

ABVE. Veículos elétricos: O que se deve levar em consideração antes de adquirir um. In: . [s.n.], 2020. Acesso em 15 de set. 2020. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/veiculos-eletricos-o-que-se-deve-levar-em-consideracao-antes-de-adquirir-um/>>.

APTIV. User manual electric vehicle charging equipment ic-cpd. In: APTIV SERVICES DEUTSCHLAND GMBH. Wuppertal, 2016. p. 21.

Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores - ANFAVEA. Anuário da indústria automobilística brasileira 2019. In: . Ponto & Letra, 2019. Acesso em 10 fev. 2020. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/anuario2019/anuario.pdf>>.

AZEVEDO, M. H. de. Carros elétricos: viabilidade econômica e ambiental de inserção competitiva no mercado brasileiro. In: . Ouro Preto: [s.n.], 2018. p. 54.

BALEN, G. et al. Estação de carregamento rápido com elemento armazenador de energia e filtro ativo de harmônicos para veículos elétricos. In: . [S.l.: s.n.], 2019. v. 24, p. 95–106.

BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. In: BNDES SETORIAL, 2011. Rio de Janeiro, 2011.

BARASSA, E. Trajetória tecnológica do veículo elétrico: atores, políticas e esforços tecnológicos no Brasil. In: . Campinas: [s.n.], 2015. p. 105. Acesso em 16 de set. 2020. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/287784>>.

BMW. autonomia-carregamento-eficiencia. In: . [s.n.], 2020. Acesso em 16 set. 2020. Disponível em: <<https://www.bmw.com.br/pt/all-models/bmw-i/i3/2017/autonomia-carregamento-eficiencia.html>>.

BRäUNL, T. Ev charging standards. In: . [s.n.], 2012. Acesso em 16 set. 2020. Disponível em: <<http://therevproject.com/doc/2012-EVcharging-s.pdf>>.

CASTRO, B. H. R. de; FERREIRA, T. T. Veículos elétricos : aspectos básicos , perspectivas e oportunidades. In: . [S.l.: s.n.], 2010. p. 267–310.

CHEVROLET. Bolt-ev 2020 0km. In: . [s.n.], 2020. Acesso em 16 set. 2020. Disponível em: <<https://www.chevrolet.com.br/eletrico/bolt-ev>>.

FALVO, M. C. et al. Ev charging stations and modes: International standards. In: **2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1134–1139.

FOLEY, A. M.; WINNING, I. J.; Ó GALLACHÓIR, B. P. . State-of-the-art in electric vehicle charging infrastructure. In: **2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference**. Lille: [s.n.], 2010. p. 1–6.

GRASSI, F. Estudo normativo de sistemas de recarga condutiva modo 2 para veículo elétrico. In: SEMINAR ON POWER ELECTRONICS AND CONTROL, 2019. Natal, 2019.

HANAUER, D. Mode 2 charging testing and certification for international market access. In: . [S.l.: s.n.], 2018. v. 9.

IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Electromechanical elementary relays - part 1: General and safety requirements. In: . 2015. p. 198. Acesso em 13 de mai. 2020. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=330422>>.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. In-cable control and protection device for mode 2 charging of electric road vehicles. In: . [S.l.], 2016. p. 327.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC. Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets conductive charging of electric vehicles. In: . [S.l.], 2016. p. 126.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). Electric vehicle conductive charging system - part 1: General requirements. international standard. In: . 2017. p. 141. Acesso em 8 jan. 2020. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/33644>>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global ev outlook 2020. In: . 2020. Acesso em 5 ago. 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/electric-vehicles>>.

JACINTO, T. et al. Impact of electric vehicles in electric costs considering the long-term operation planning. In: **2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**. Niterói: [s.n.], 2018. p. 1–6.

JACMOTORS. iev. In: . [s.n.], 2020. Acesso em 16 set. 2020. Disponível em: <<https://www.jacmotors.com.br/veiculos/eletricos-detalhes/iev20#>>.

LAFUENTE, C. O. Carregador de Baterias Monofásico para aplicação em Veículos Elétricos. In: . [S.l.: s.n.], 2011.

LUYTEN, S. et al. Standardization of conductive ac charging infrastructure for electric vehicles. In: **22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)**. Stockholm: [s.n.], 2013. p. 1–4.

NISSAN. Autonomia e recarga. In: . [s.n.], 2020. Acesso em 16 set. 2020. Disponível em: <<https://www.nissan.com.br/veiculos/modelos/leaf/autonomia-recarga.html>>.

POPOV, A.; TYBEL, M.; SCHUGT, M. Power hardware-in-the-loop test bench for tests and verification of ev and evse charging systems. In: **2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)**. Florence: [s.n.], 2014. p. 1–8.

RATA, M. et al. The electrical vehicle simulator for charging station in mode 3 of iec 61851-1 standard. In: . [S.l.: s.n.], 2020.

RENAULT. Autonomia e tempo de recarga. In: . [s.n.], 2020. Acesso em 16 set. 2020. Disponível em: <<https://www.renault.com.br/veiculos-eletricos/zoe/autonomia-e-carregamento.html>>.

RODRIGUES, M. do C. B. P. et al. Conexão de veículos elétricos à rede de energia elétrica para recarga de baterias: Uma visão geral. In: . [S.l.: s.n.], 2014.

SARLIOGLU, B. et al. Driving toward accessibility: A review of technological improvements for electric machines, power electronics, and batteries for electric and hybrid vehicles. In: . [S.l.: s.n.], 2017. v. 23, n. 1, p. 14–25.

SEBASTIÃO, C. J. Projeção e desenvolvimento de carregadores para veículos elétricos. In: . [S.l.: s.n.], 2014.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS - SAE. Sae electric vehicle and plug in hybrid electric vehicle conductive charge coupler. In: . 2017. p. 116. Acesso em 29 ago. 2020. Disponível em: <https://www.sae.org/standards/content/j1772_201710/>.

Tu, H. et al. Extreme fast charging of electric vehicles: A technology overview. In: . [S.l.: s.n.], 2019. v. 5, n. 4, p. 861–878.