

Desenvolvimento de uma Estação de Recarga Modo 3 para Veículos Elétricos

Jonas Menon da Rosa; Fernando Grassi; Cassiano Rech
Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC)
Universidade Federal de Santa Maria, UFSM
Santa Maria, Brasil
Email: jonas.menonrosa@gmail.com
Email: fernando_grassi7@hotmail.com
Email: rech.cassiano@gmail.com

Resumo—A quantidade de veículos elétricos (VE's) vendidos anualmente vem crescendo exponencialmente 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 juntamente com o VE, e a outra é a utilizar uma estação de recarga, sendo a segunda opção a forma mais rápida entre as duas. Pensando nisto, este trabalho possui o objetivo de desenvolver uma estação de recarga de veículo elétrico adequada para ser instalada em ambiente residencial. Seguindo as recomendações e exigências das normas internacionais foram projetados os circuitos de proteção, comunicação com o VE, e detecção do cabo 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.

Keywords – Carregador de veículo elétrico, estação de recarga de veículo elétrico, veículo elétrico.

I. INTRODUÇÃO

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 [1], 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 [2].

Por sua vez, os veículos elétricos (VE's) não emitem nenhum gás poluente ao circular, e devido ao aumento das preocupações ambientais o interesse nestes veículos vem aumentando nos últimos anos [3]. 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 [4].

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 do VE [5]. 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. A Fig. 1 ilustra cada um desses modos.

Os veículos elétricos novos costumam ser vendidos com um carregador portátil com proteção e controle em seu próprio cabo, comumente chamado de IC-CPD [7]. 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 [8]. Já as estações de recarga Modo 3 podem ser monofásicas ou trifásicas, e possuem corrente máxima de até 63 A, permitindo assim uma recarga mais rápida [9].

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

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001 e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (UFSM).

II. ESTAÇÕES DE RECARGA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Para serem comercializadas, as estações de recarga de veículos elétricos precisam estar adequadas as exigências das normas vigentes. O Brasil segue as recomendações das normas da International Electrotechnical Commission (IEC), sendo os requisitos apresentados nessas normas relacionados principalmente a segurança, comunicação e conexão com o VE.

A. Requisitos de segurança

Em relação a segurança, a IEC 61851-1 (2017) descreve os seguintes requisitos:

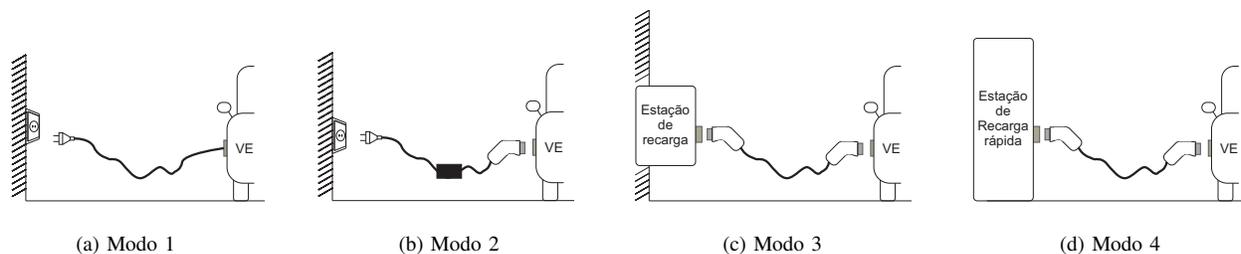


Figura 1. Modos de recarga.

1) *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) que descreve os requisitos mínimos relacionados a contadoras.

2) *Proteção contra sobrecarga*: A proteção contra sobrecarga deve ser realizada através de disjuntor. 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.

3) *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.

4) *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.

5) *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.

B. Plugues e Tomadas

Como os fabricantes de veículos elétricos estão espalhados pelo globo, e inicialmente não havia um padrão mundial de plugues e tomadas, cada região criou seu padrão e os veículos produzidos em sua área de influência seguiram seus modelos [10]. São ao menos 3 modelos de plugues para recarga em corrente alternada, e 5 para recarga em corrente contínua [11]. Como o foco aqui é recarga em corrente alternada, serão analisados apenas os dois principais plugues desse modo de recarga.

1) *SAE J1772 Tipo 1*: A América do Norte adotou o padrão SAE J1772 [12], em que o plugue e a tomada possuem 5 pinos, sendo eles: fase, neutro, de proteção, piloto, e proximidade.

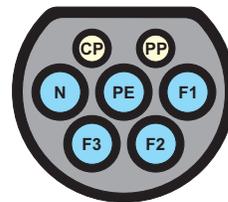


Figura 2. Plugue Tipo 2.

Sua trava de segurança é mecânica, e o travamento realizado pelo usuário, dessa forma permite erro humano.

2) *IEC 62196 Tipo 2*: Já na Europa o padrão mais utilizado é o Tipo 2, possuindo a vantagem com relação ao anterior de ter dois condutores fase a mais, como mostra a Fig. 2, possibilitando assim, a recarga trifásica. Além disso, a trava de segurança é eletrônica, sendo o travamento realizado pela estação de recarga.

Neste trabalho foi escolhido o padrão europeu de plugues e tomadas Tipo 2, visto que ele possui maior nível de segurança, e é adotado na maioria dos veículos elétricos comercializados no Brasil.

C. 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 tomadas Tipo 2, 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 (PP) e o proteção (PE).

D. 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 VE, sendo estas duas partes conectadas através do cabo de recarga, como ilustrado na Fig. 3.

E. Informações fornecidas pela estação e pelo VE

A estação de recarga informa ao veículo elétrico através da razão cíclica do sinal modulado por largura de pulso (PWM

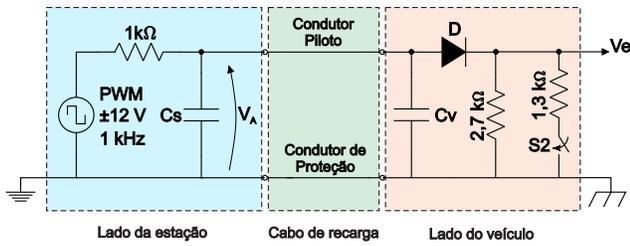


Figura 3. Circuito da função piloto.

- *Pulse Width Modulation*), 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.

O circuito piloto do lado do VE possui 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.

III. PROJETO DA ESTAÇÃO DE RECARGA

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;
- Tomada e cabo de recarga;
- Sistema de medição de energia;
- Interface homem-máquina;
- Gabinete.

Devido a limitação de páginas, neste artigo será apresentado apenas o projeto do circuito de controle e condicionamento do sinal, visto que esta é a parte da estação mais importante para a realização dos testes exigidos nas normas.

A. Circuito de controle e condicionamento do sinal

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. A Fig. 4 apresenta o circuito contendo um amplificador operacional *rail-to-rail* utilizado para resolver este problema.

2) *Função 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

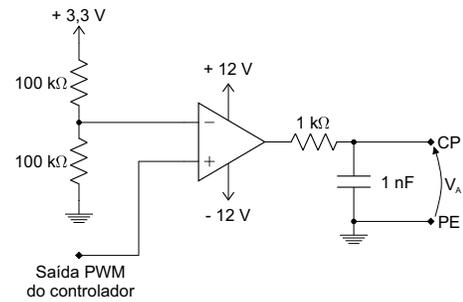


Figura 4. Circuito de condicionamento do sinal PWM.

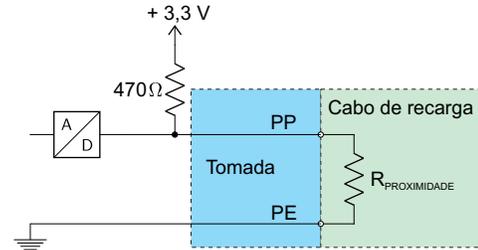


Figura 5. Circuito de medição da resistência presente no pino proximidade.

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 de tensão com um resistor em série e conectar este resistor ao pino proximidade, como mostra a Fig. 5. Assim haverá um 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.

3) *Condicionamento do sinal V_A* : Para identificar qual é o estado do veículo elétrico, é necessário medir a tensão presente em 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, apresentado na Fig. 6, porém desta vez deve-se reduzir a amplitude e adicionar um offset.

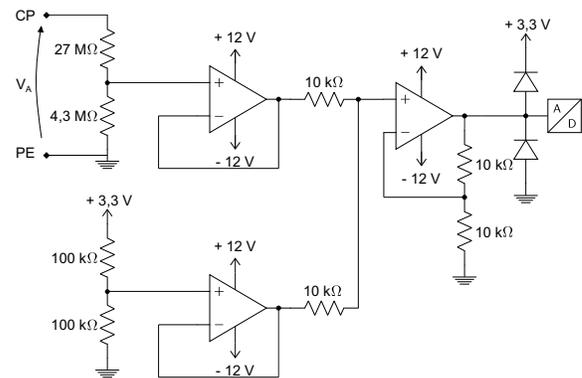


Figura 6. Circuito do sinal em V_A .

IV. PROJETO DO CIRCUITO DE TESTES

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.

A. Emulador do cabo

A norma internacional IEC 62196-2 (2016) [13] apresenta os valores nominais de resistência no contato proximidade para 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. O circuito implementado é mostrado na Fig. 7.

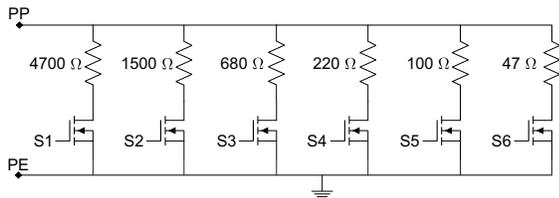


Figura 7. Circuito do emulador do cabo de recarga.

B. Emulador de estados

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. A Fig. 8 apresenta o circuito do emulador de estados utilizado.

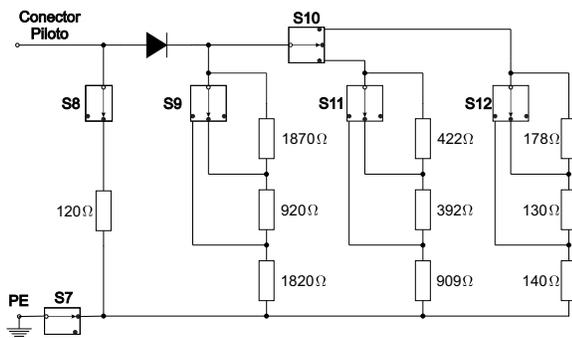


Figura 8. Emulador de estados utilizado.

V. RESULTADOS

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.

A. Resultados do emulador do cabo

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 estão adequados, como mostra a Tabela I.

Tabela I
RESULTADOS OBTIDOS DO EMULADOR DO CABO.

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

B. 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 sinal PWM com amplitude de ± 12 V, e impedância de saída de 1 kΩ, 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 II apresenta os valores desejados e os valores obtidos utilizando o emulador de estados. Como podemos ver, novamente os resultados alcançados estão adequados.

Tabela II
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
DX	Limite inferior	5	4,90
	Limite superior	4	3,91
E	Nominal	3	2,91
	Limite inferior	2	1,96
	Limite superior	1	0,97

C. Resultado da estação de recarga

Os testes foram divididos em 8 partes, as quais são listadas abaixo:

- frequência do sinal PWM;
- limites de tensão do 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 reação a perda do condutor de proteção;

- resposta da estação em reação a um curto-circuito no condutor piloto.

Devido a grande quantidade de informações, não serão apresentados neste artigo os resultados referentes a resposta da estação em reação as transições de estados.

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 Fig. 9 apresenta o resultado obtido para esse teste.

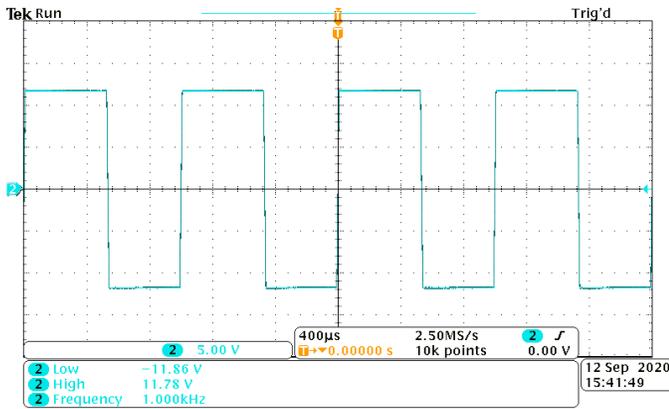


Figura 9. Frequência do sinal PWM gerado.

2) *Limites de tensão do sinal PWM:* O segundo teste é verificar se a amplitude do sinal PWM em V_A está de acordo com os valores estabelecidos nas normas. Como podemos perceber na A Tabela III apresenta os limites para cada estado do veículo elétrico e os valores obtidos nos testes.

Tabela III
LIMITES DE TENSÃO DO SINAL PWM PARA CADA ESTADO

	Estado	Tensão mínima (V)	Tensão máxima (V)	Tensão obtido (V)
Parte positiva	A1 e A2	11,4	12,6	11,79
	B1 e B2	8,37	9,59	8,66
	C1 e C2	5,47	6,53	5,6
Parte negativa	A2, B2 e C2	-12,6	-11,4	-11,85

3) *Codificação da corrente máxima disponível ao VE:* 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 Fig. 10 apresenta o PWM gerado pela estação de recarga para razão cíclica de 5%.

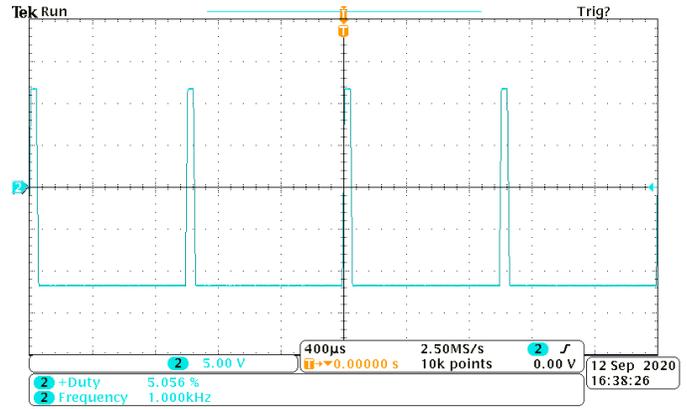


Figura 10. PWM com razão cíclica de 5 %.

Como pode-se perceber através da Fig. 10 a razão cíclica gerada foi de 5,05 %, valor que representa bem, visto que a faixa de razão cíclica deveria ficar entre 3 e 7 %. Para razão cíclica de 10 % o resultado obtido foi de 10,05 %, e para a razão cíclica máxima (53,33 %) o resultado obtido foi de 53,36 %, ambos os resultados estão dentro das exigências das normas.

4) *Tempo de subida a descida do sinal PWM:* Outra exigência das normas internacionais relacionadas a carregadores de veículos elétricos, é a verificação dos tempos de subida e de descida do sinal PWM. A Tabela IV apresenta os resultados obtidos para os teste dos tempos de subida e descida do sinal PWM.

Tabela IV
TEMPOS DE SUBIDA E DESCIDA DO PWM EM V_A .

	Estado	Tempo máximo	Tempo obtido
Tempos de subida	B2	10 μ s	11,5 μ s
	C2	7 μ s	11 μ s
Tempo de descida	B2 e C2	13 μ s	11,7 e 11,3 μ s

5) *Tempo de resposta da contatora:* 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. A Fig. 11 apresenta o sinal enviado pelo microcontrolador em azul escuro, e a tensão fornecida pela estação ao veículo elétrico em verde.

6) *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. Como mostra a Fig. 12, 51,21 ms após o sinal em azul escuro aumentar a sua amplitude, sinalizando que houve a perda do condutor de proteção, o microcontrolador alterou o nível do sinal de controle da contatora (em rosa) para que ela abra seus contatos.

7) *Resposta 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

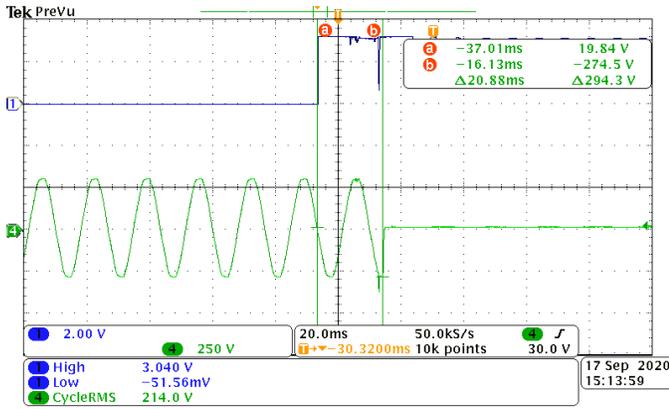


Figura 11. Tempo necessário para a abertura da contatos principais.

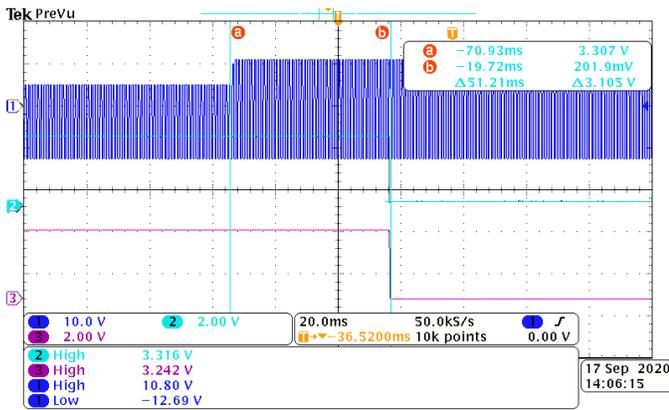


Figura 12. Resultado da interrupção do condutor de proteção.

do que ± 1 V, com isso a estação de recarga deve identificar o estado E, e tomar a ação de abrir a contatora em no máximo 3 segundos. Sabendo disso, foi realizado um curto circuito entre o condutor piloto e o condutor proximidade, com isso, foram obtidos os resultados apresentados na Fig. 13.

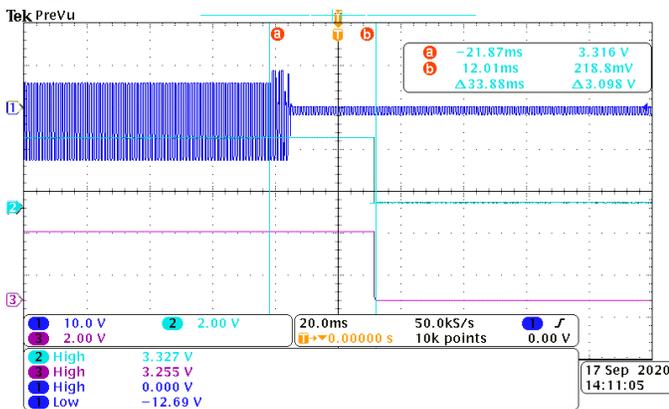


Figura 13. Resposta da estação em reação a um curto-circuito entre o condutor de proteção e o piloto.

VI. CONCLUSÃO

O projeto e os testes da estação de recarga apresentada neste projeto levaram em consideração as exigências estabelecidas nas normas internacionais IEC 61851-1 (2017) e SAE J1772 (2017) e a norma nacional NBR 5410 (2014). 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, 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 maior taxa de variação da tensão no tempo (slew rate).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a FAPERGS pela concessão da bolsa de iniciação científica PROBIC e ao PPGEE (UFSM) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores - ANFAVEA, "Anuário da indústria automobilística brasileira 2019," Ponto & Letra, p.152,2019.
- [2] T. Jacinto, B. Dias, T. Ramos, A. Marcato, I. Silva, L. Oliveira and B. Borba, "Impact of electric vehicles in electric costs considering the long-term operation planning," 2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), pp.1-6, May 2018.
- [3] B. H. de Castro and T. T. Ferreira, "Veículos elétricos : aspectos básicos, perspectivas e oportunidades," BNDES Setorial 32, pp. 267-310,2010.
- [4] C. O. Lafuente, "Carregador de baterias monofásico para aplicação em veículos elétricos," Universidade Federal do Ceará - UFC, p.154, 2011.
- [5] C. J. Sebastião, "Projeção e desenvolvimento de carregadores para veículos elétricos," Instituto Politécnico de Tomar, p. 100, 2014.
- [6] International Electrotechnical Commission (IEC), "Electric vehicle conductive charging system - Part 1: general requirements," Available: <https://webstore.iec.ch/publication/33644>, p. 141, ed. 3.0, 2017.
- [7] International Electrotechnical Commission (IEC), "In-cable control and protection device for mode 2 charging of electric road vehicles," Available: <https://webstore.iec.ch/publication/24284>, p.327, ed. 1.0, 2016.
- [8] APTIV, "User manual electric vehicle charging equipment IC-CPD," Aptiv Services Deutschland GmbH, p.21,2016.
- [9] ABVE, "Veículos elétricos: O que se deve levar em consideração antes de adquirir um," Associação brasileira do veículo elétrico, Available: <http://www.abve.org.br/veiculos-eletricos-o-que-se-deve-levar-em-consideracao-antes-de-adquirir-um/>.
- [10] A. M. Foley, I. J. WinningG and B. P. Ó. Ó Gallachóir, "State-of-the-art in electric vehicle charging infrastructure," 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, p.1-6, 2010.
- [11] H. Tu, H. Feng, S. Srdic and S. Lukic, "Extreme fast charging of electric vehicles: a technology overview," IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol.5, num. 4, pp. 861-878, 2019.
- [12] Society of Automotive Engineers - SAE, "SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler," Available: https://www.sae.org/standards/content/j1772_201710/, p. 116, October 2017.
- [13] International Electrotechnical Commission (IEC), "Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles," Available: <https://webstore.iec.ch/publication/60947>, p. 126, ed. 2.0, 2016.