

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DAELN - DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

DIEGO DE ANDRADE CARRILLO
GABRIEL CARON BASTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO
PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS: UMA PROVA DE CONCEITO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2019

DIEGO DE ANDRADE CARRILLO
GABRIEL CARON BASTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO
PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS: UMA PROVA DE CONCEITO**

Trabalho de Conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro.

Orientador: Prof. Hugo Vieira Neto

CURITIBA
2019

DIEGO DE ANDRADE CARRILLO

GABRIEL CARON BASTOS

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS: Uma prova de conceito

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletrônico, do curso de Engenharia Eletrônica do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN) outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Os alunos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Curitiba, 02 de Julho de 2019.

Prof. Dr. Robinson Vida Noronha
Coordenador de Curso
Engenharia Eletrônica

Prof^a. Dr^a. Carmen Caroline Raser
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Eletrônica do DAELN

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Hugo Vieira Neto
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Prof. Dr. André Eugenio Lazzaretti
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Carlos Gabriel Bianchin
Universidade Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Eletrônica.

Dedicamos esse trabalho a todos aqueles que lutam para contribuir com o avanço sustentável da ciência e tecnologia.

AGRADECIMENTOS

Nossos sinceros agradecimentos vão a todos aqueles que contribuíram, de forma direta ou indireta, com a realização deste trabalho.

Inicialmente, agradecemos ao nosso orientador Hugo Vieira Neto por todos os conselhos e pela confiança depositada em nós. Também agradecemos ao professor Carlos Gabriel Bianchin, da UFPR, pelas orientações e por nos disponibilizar, com muito bom grado, os veículos elétricos e o ambiente para realizarmos os testes finais do projeto.

Agradecemos também a Rafael Taubinger, da IAR Systems, pela disponibilização de duas licenças da IDE *IAR Workbench* para que pudéssemos realizar nosso desenvolvimento.

Agradecemos à empresa Copel, especialmente a Zeno Iensen Nadal, pelo empréstimo dos veículos elétricos utilizados nos testes.

Pelo constante suporte e motivação, além de toda a ajuda quando necessário, agradecemos aos nossos pais e familiares, especialmente: Maria Cristina Corrêa de Andrade Carrillo e Francisco Caro Carrillo, Rosângela Caron Bastos e Sérgio Bastos, e Eloir Caron. Também agradecemos por todo o carinho e apoio a Mariana Cestille e Aline Carvalho Hey. E também a todos os amigos e colegas que estiveram conosco durante todo o período da faculdade, principalmente a Carlo Sganzerla, Leonardo Furquim Lopes e Matheus Tadashi Natume.

Atingimos o limite do que é possível fazer com diesel e gasolina. Portanto, o tempo, penso eu, chegou para evoluirmos a uma nova geração tecnológica. (Elon Musk)

RESUMO

CARRILLO, Diego A.; BASTOS, Gabriel C.. Desenvolvimento de um sistema de alimentação para veículos elétricos: Uma prova de conceito. 2019. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Bacharelado em Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

O uso de carros elétricos já é uma opção de transporte urbano viável em alguns países. No Brasil, a adoção desse tipo de locomoção ainda caminha a passos muito curtos, mas espera-se que haja um aumento expressivo ao longo dos próximos anos. Por isso, entende-se que há uma janela de oportunidade para o desenvolvimento de tecnologia dentro desta área. Assim, esse trabalho apresenta o desenvolvimento de uma prova de conceito de um sistema de alimentação para veículos elétricos, capaz de intermediar o carregamento do veículo a partir da rede elétrica, como definido na norma IEC 61851. Essa estação de recarga implementa a comunicação através do fio-piloto, essencial para ler o estado do veículo e informá-lo sobre a corrente máxima que deve drenar, além de implementar um sistema de comunicação remota através do protocolo MQTT sobre uma conexão Wi-Fi à internet. Dessa forma, o usuário é capaz de monitorar o carregamento, determinar a corrente máxima, e acompanhar a potência consumida pelo veículo em tempo real. Foram desenvolvidos os módulos de hardware e software necessários, sendo este último implementado através de um sistema operacional de tempo real sobre a plataforma embarcada CC3220S, da *Texas Instruments*. Os testes com a prova de conceito em bancada e em dois veículos elétricos comprovaram seu funcionamento e mostraram que a solução desenvolvida teve um custo abaixo do que se encontra no mercado, indicando a viabilidade da criação de um produto a partir deste protótipo.

Palavras-chave: Veículos Elétricos. Estação de Carregamento. Prova de Conceito.

ABSTRACT

CARRILLO, Diego A.; BASTOS, Gabriel C.. Development of an electric vehicle supply equipment: A proof of concept. 2019. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Bacharelado em Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

The use of electric cars is already a viable urban transportation option in some countries. This is not quite the reality in Brazil yet, but there is an expectation about a huge increase of this kind of locomotion in the next years. Because of that, there is a perception of an opportunity window for the development of technology in this area. Given these reasons, this work presents the development of an electric vehicle supply equipment proof of concept, capable of intermediating the recharge of the vehicle on the electric grid, as defined in the IEC 61851 standard. This charging station implements a communication via a pilot signal, which is mandatory for knowing the current state of the vehicle and informing it about the maximum electric current it can drain, and also implements a remote communication system through the MQTT protocol over a Wi-Fi internet connection. In this way, the user can monitor the recharge, set the maximum current value, and keep track of the vehicle's power consumption in real time. Both the necessary hardware and software were developed, the latter being constructed over a real time operating system running in a Texas Instruments's embedded platform, the CC3220S. The proof of concept was tested on the workbench and also with two different electric vehicles, working as expected in all cases. Finally, the final cost of development was lower than similar solutions available at the market, giving a positive viability indication for the creation of a commercial product based on this prototype.

Keywords: Electric Vehicle. Charging Station. Proof of Concept.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Número de vendas global de VEs por ano	17
Figura 2 – Visão dos principais componentes de um VE	20
Figura 3 – Circuito-piloto típico de controle	27
Figura 4 – Ciclo típico de recarga nas condições normais de operação	29
Figura 5 – Modelo de publicação e assinatura do MQTT	31
Figura 6 – Foto do kit CC3220S-LAUNCHXL	34
Figura 7 – Diagrama de blocos do subsistema de rede do CC3220S	35
Figura 8 – Foto do medidor PZEM004T	36
Figura 9 – Esquema de ligação do medidor PZEM004T	36
Figura 10 – Regulador de fonte chaveada MC34063A	37
Figura 11 – Rede resistiva para normalização do nível de tensão do sinal da função-piloto de controle	40
Figura 12 – Layout da placa de condicionamento do sinal da função-piloto de controle e detecção dos estados	42
Figura 13 – Diagrama de ligação elétrica das alimentações, relé e contator	43
Figura 14 – Foto detalhada do SAVE montado	44
Figura 15 – Interação das camadas de software do sistema	46
Figura 16 – Divisão de tarefas no sistema operacional	47
Figura 17 – Diagrama de atividades da tarefa <i>mainThread()</i>	48
Figura 18 – Diagrama de atividades da tarefa <i>MqttClient()</i>	49
Figura 19 – Diagrama de atividades da tarefa <i>tarafaMedidorPotencia()</i>	51
Figura 20 – Diagrama de atividades da tarefa <i>tarafaControlePiloto()</i>	53
Figura 21 – Sinal da função-piloto de controle com veículo desconectado	56
Figura 22 – Sinal da função-piloto de controle com veículo conectado	57
Figura 23 – Sinal da função-piloto de controle com veículo conectado com SAVE informando a corrente máxima ao veículo de 16A	57
Figura 24 – Sinal da função-piloto de controle com veículo pronto para carga com SAVE informando a corrente máxima ao veículo de 16A	58
Figura 25 – Sinal da função-piloto de controle com veículo conectado com SAVE informando a corrente máxima ao veículo de 32A	58
Figura 26 – Sinal da função-piloto de controle com veículo pronto para carga com SAVE informando a corrente máxima ao veículo de 32A	59
Figura 27 – Captura de tela do aplicativo <i>MQTT Dash</i> durante os testes em bancada	60
Figura 28 – Foto do SAVE durante os testes	61
Figura 29 – Fotos dos VEs utilizados durante o carregamento: Renault Zoe (esquerda) e Renault Kangoo Z.E. (direita)	62

Figura 30 – Foto do painel do Renault Zoe durante o carregamento	63
Figura 31 – Foto do painel do Renault Kangoo Z.E. durante o carregamento	63
Figura 32 – Captura de tela do aplicativo <i>MQTT Dash</i> durante o teste no Renault Zoe com a corrente máxima de 8 A	64
Figura 33 – Captura de tela do aplicativo <i>MQTT Dash</i> durante o teste no Renault Zoe com a corrente máxima de 16 A	64
Figura 34 – Diagrama esquemático do circuito de condicionamento do sinal da função-piloto	71
Figura 35 – Diagrama esquemático do circuito da fonte simétrica de 12V	72
Figura 36 – Diagrama de componentes do software	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição da sequência de conexão para recarga	28
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre emissão de CO ₂ em veículos puramente elétricos e veículos movidos a motor de combustão interna	18
Tabela 2 – Ranking dos dez modelos de VEs mais vendidos no mundo	21
Tabela 3 – Tempos estimados de recarga	22
Tabela 4 – Corrente máxima consumida pelo veículo em função do ciclo de trabalho do sinal PWM	29
Tabela 5 – Tópicos nos quais o cliente publica	49
Tabela 6 – Valores numéricos dos estados da função-piloto	50
Tabela 7 – Custos do desenvolvimento do SAVE	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

VE	Veículo Elétrico
VPE	Veículo Puramente Elétrico
VHEP	Veículo Híbrido <i>Plug-In</i>
VHE	Veículo Híbrido Elétrico
MCI	Motor de Combustão Interna
PCI	Placa de Circuito Impresso
AC	<i>Alternating Current</i>
DC	<i>Direct Current</i>
SAVE	Sistema de Alimentação para Veículos Elétricos
EVSE	<i>Electric Vehicle Supply Equipment</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
IoT	<i>Internet Of Things</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
PTH	<i>Pin through hole</i>
MCU	<i>Microcontroller Unit</i>
RAM	<i>Random-access memory</i>
SO	Sistema Operacional
RTOS	<i>Real Time Operating System</i>
POSIX	<i>Portable Operating System Interface</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
SDK	<i>Software Development Kit</i>

DPL	<i>Data Porting Layer</i>
SSID	<i>Service Set Identifier</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	16
1.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS	16
1.1.1 IMPACTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS	18
1.1.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E ELÉTRICAS	19
1.1.3 SITUAÇÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NO MUNDO	19
1.2 VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL	20
1.3 SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS	21
1.4 MOTIVAÇÃO	23
1.5 OBJETIVOS	23
1.5.1 OBJETIVO GERAL	23
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.6 REQUISITOS DE PROJETO	24
1.6.1 REQUISITOS FUNCIONAIS	24
1.6.2 REQUISITOS NÃO FUNCIONAIS	24
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1 ANÁLISE DA NORMA IEC 61851	25
2.1.1 REVISÃO DO ANEXO A (FUNÇÃO-PILOTO POR MEIO DE UM CIRCUITO-PILOTO DE CONTROLE UTILIZANDO UM MODULAÇÃO PWM E UM FIO-PILOTO)	26
2.2 SISTEMAS DE TEMPO REAL	29
2.2.1 FREERTOS	30
2.3 PROTOCOLO MQTT	31
3 – METODOLOGIA	33
3.1 ESTRUTURA DE HARDWARE DO SISTEMA	33
3.1.1 MICROCONTROLADOR CC3220S	33
3.1.2 MEDIDOR PZEM004T	34
3.1.3 FONTES DE ALIMENTAÇÃO	36
3.1.4 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DO SINAL DA FUNÇÃO-PILOTO DE CONTROLE	38
3.1.5 ACOPLAMENTO À REDE ELÉTRICA	42
3.1.6 DETALHES DA MONTAGEM MECÂNICA	43
3.2 ESTRUTURA DE SOFTWARE DO SISTEMA	44
3.2.1 ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA OPERACIONAL DE TEMPO REAL	45
3.2.2 MÓDULO MQTT	48

3.2.3	MÓDULO DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA	51
3.2.4	MÓDULO DE CONTROLE DA FUNÇÃO-PILOTO	52
4	– ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	54
4.1	CUSTOS DE DESENVOLVIMENTO	54
4.2	TESTES EM BANCADA	55
4.3	TESTES DE CAMPO EM VEÍCULOS ELÉTRICOS	60
5	– CONCLUSÃO	65
5.1	TRABALHOS FUTUROS	65
5.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
	Referências	68
	Apêndices	70
	APÊNDICE A–Diagrama esquemático do circuito de condicionamento do sinal da função-piloto	71
	APÊNDICE B–Diagrama esquemático do circuito da fonte simétrica de 12V	72
	APÊNDICE C–Diagrama de componentes do software do sistema	73

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho trata do desenvolvimento de uma prova de conceito de um sistema de alimentação para veículos elétricos. Dessa forma, este capítulo introdutório procura situar o leitor sobre as definições e conceitos a respeito de veículos elétricos, além de prover um panorama geral sobre esta tecnologia no mundo e sua situação atual no Brasil, incluindo dados econômicos e ambientais. Também procura-se definir com clareza o que são os sistemas de alimentação para veículos elétricos e como são categorizados. A partir disso, ao final do capítulo são apresentadas as motivações e os objetivos deste projeto.

1.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS

O termo veículo elétrico (VE) engloba todos os veículos que podem ser alimentados completamente ou de forma parcial por uma bateria, e que podem ser conectados diretamente à rede de energia elétrica (DENTON, 2018). Isso inclui os veículos puramente elétricos (VPEs), que são alimentados apenas pela bateria, e os veículos híbridos *plug-in* (VHEPs), que possuem um motor de combustão interna e uma bateria geralmente de menor autonomia. Além disso, também existem os veículos híbridos elétricos (VHEs), nos quais não é possível conectar a bateria à rede, de modo que a recarga geralmente é realizada através de um sistema de frenagem regenerativa. Apesar de este último grupo de veículos atualmente ter presença mais forte no mercado brasileiro, não será tema deste trabalho, até por não estar compreendido na definição de VE citada acima.

Apesar de os veículos elétricos terem tido um destaque relativamente recente, quando comparados aos carros movidos a gasolina, sabe-se que o primeiro veículo elétrico foi fabricado por William Morrison, em 1890. No início do século XX, os carros elétricos já tinham uma certa popularidade, totalizando cerca de 38% do mercado de veículos dos EUA, contra 22% movidos a gasolina e os 40% restantes movido a vapor (RICHARDSON, 2018). Apesar do constante aumento do estoque global de veículos elétricos, seu declínio veio a partir da criação do modelo de produção em série do Ford Model T, idealizado em 1908 por Henry Ford, que reduziu o custo dos carros movidos a gasolina drasticamente e fez com que estes passassem a dominar toda a indústria global, trazendo o número de VEs no mercado praticamente a zero.

Durante a segunda metade do século XX, ocorreu o que se chama de “segunda era” dos veículos elétricos. O interesse nesse tipo de automóvel passou a aumentar novamente principalmente devido aos aumentos do preço do petróleo e dos níveis de poluição nas grandes cidades. Em 1966, por exemplo, o Congresso dos EUA introduziu uma lei recomendando VEs como uma forma de reduzir a poluição atmosférica. Já em 1973, o embargo da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) sobre o petróleo causou uma alta nos preços e atraso no fornecimento de combustível aos postos, novamente renovando o interesse em VEs

(DENTON, 2018). Apesar de ter-se feito um esforço nas áreas de pesquisa e desenvolvimento relacionadas a essa tecnologia, quase não houve casos de sucesso comercial. Até mesmo no Brasil, por exemplo, a empresa Gurgel Motores apresentou em 1974 o modelo Gurgel Itaipu, que veio a ser o primeiro automóvel elétrico desenvolvido na América Latina. O carro tinha baixa capacidade de desenvolver velocidade (máximo de 80 km/h) e baixa autonomia (cerca de 127 km por carga completa) quando comparado a veículos tradicionais, sem contar que a recarga completa poderia demorar até oito horas. Assim, não chegou nem mesmo a ser produzido em série. Somente em 1997, no Japão, a Toyota iniciou as vendas do primeiro carro híbrido comercial do mundo, com cerca de 18 mil unidades vendidas naquele ano.

Somente após o início do século XXI, iniciou-se o que se considera a terceira era dos veículos elétricos, a qual ainda estamos presenciando atualmente. O comprometimento com a eletrificação veicular passa a ocorrer a partir tanto de setores públicos como privados. Com o petróleo atingindo preços recorde, o mercado passou a receber diversos modelos relevantes de VEs de diferentes fabricantes, como o Nissan Leaf em 2010, o Chevrolet Bolt em 2012, e o Tesla Model S em 2014. Assim, o número de VEs circulando por todo o mundo cresce exponencialmente a cada ano, especialmente no mercado europeu, como mostra a Figura 1. Portanto, veículos elétricos demonstram-se cada vez mais como uma solução viável para o transporte pessoal e, cada vez mais que a tecnologia avance e permita que se mitiguem problemas relacionados principalmente à autonomia desses veículos, maior será a porcentagem ocupada por eles no mercado global.

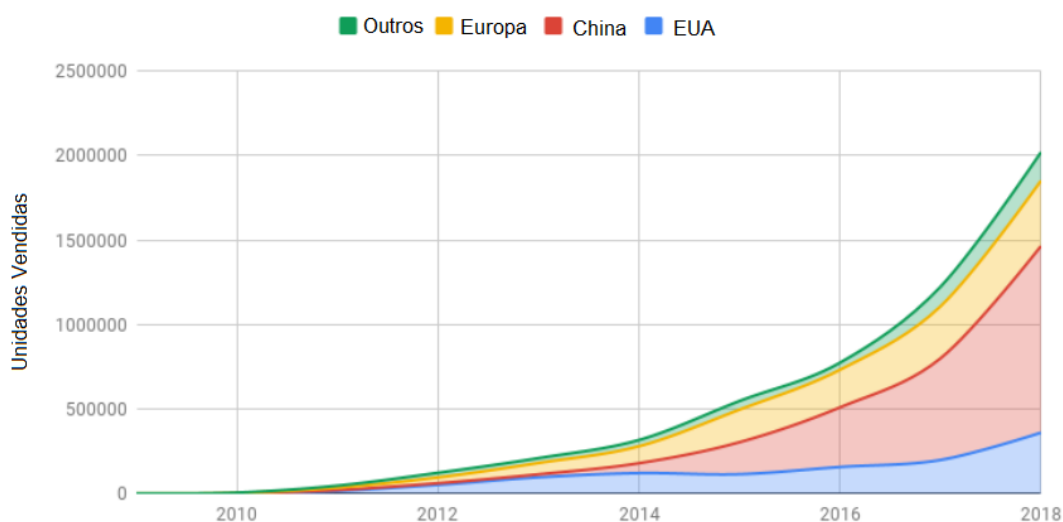


Figura 1 – Número de vendas global de VEs por ano

Fonte: Adaptado de Gerrard (2019)

1.1.1 IMPACTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

Os VEs podem trazer grandes impactos econômicos para seus usuários e, principalmente para aqueles que utilizam os veículos somente em contextos urbanos, seu uso pode ser uma alternativa para a diminuição no custo mensal com o veículo. Um estudo a respeito do custo de combustíveis, publicado pela universidade de Michigan, calcula que o custo para operar um VE nos Estados Unidos é de cerca de \$485 por ano, enquanto um veículo movido por motor a combustão tem custo de \$1117 (MCMAHON, 2018). O estudo analisou somente custos de abastecimento, mas sabe-se também que o custo de manutenção dos VEs pode ser consideravelmente menor, já que estes têm muito menos partes móveis, não possuem sistema de exaustão, não utilizam sistemas complexos de refrigeração, além de não possuírem a necessidade de troca constante de óleo, filtros de ar, junta do cabeçote, velas de ignição, e vários outros componentes. O aparente custo-benefício elevado de um VE quando comparado a um de combustão também pode ser posto em cheque quando tratam-se de países como o Brasil, onde ainda não existem políticas de incentivo consolidadas e os VEs têm custo de aquisição extremamente elevados. Além disso, deve-se levar em conta que o custo de recarga de um VE depende da capacidade da sua bateria, de quão descarregada ela está e o quão rápido se consegue carregá-la.

Quanto à questão ambiental, os veículos puramente elétricos, se destacam por possuírem emissão nula de gases no seu uso "tanque à roda". Quando é feita a análise "fonte à roda", ou seja, desde o instante da geração da energia elétrica até quando essa energia é transformada em movimento, pode-se incluir emissões relacionadas ao uso de combustíveis fósseis para gerar a energia elétrica. Assim, uma comparação justa entre veículos com motores de combustão interna (MCI) e veículos puramente elétricos exige que seja analisado o caso "fonte à roda". A Tabela 1 apresenta um comparativo de valores comuns de emissão de CO₂ em um VPE e um veículo com MCI médio. Ainda assim, deve-se levar em conta que a produção de energia elétrica tende a diminuir a quantidade de emissão de carbono, devido à redução do uso de petróleo e carvão em usinas, o que indica que a emissão total de VEs deve ser cada vez menor ao longo do tempo. E, sobretudo, os VEs não dependem de uma forma específica de geração de energia, de forma que a redução nos danos ambientais também depende da adoção de formas de produção de energias renováveis.

Tabela 1 – Comparação entre emissão de CO₂ em veículos puramente elétricos e veículos movidos a motor de combustão interna

	Tanque à roda	Fonte ao tanque	Fonte à roda
VPE	0 g CO ₂ /km	77 g CO ₂ /km	77 g CO ₂ /km
MCI	132,3 g CO ₂ /km	14,7 29,0 g CO ₂ /km	147,0 161,3 g CO ₂ /km

Fonte: Denton (2018)

Sabe-se também que a emissão de CO₂ proveniente de veículos terrestres é somente

uma parcela do total emitido por diversas outras indústrias como a de produção de energia e a agropecuária. Apesar disso, entende-se que a larga adoção de VEs é um passo fundamental para que se atinjam as metas globais de redução da emissão de carbono.

1.1.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E ELÉTRICAS

Existe uma série de diferentes configurações mecânicas e elétricas no que diz respeito a VEs. Quando tratamos especificamente de VPEs, a configuração clássica utiliza um único motor de indução para sua tração, podendo ser acoplado ao eixo traseiro ou dianteiro. Esses veículos não utilizam caixa de câmbio, já que o motor tem a característica de operar em um torque adequado para todas as velocidades que o veículo atinge. O motor de indução recebe uma tensão alternada trifásica, que por sua vez produz um campo magnético rotativo. Esse campo magnético induz corrente elétrica nas barras do rotor, de modo a fazê-lo girar. A velocidade de rotação do motor de indução varia somente de acordo com a frequência da tensão alternada que ele recebe, dessa forma o controle de velocidade dos VEs é simples e confiável, atingindo velocidades entre 0 e 18000 RPM (no caso do *Tesla Model S*), sem a necessidade de um motor de arranque. Para gerar a excitação correta no motor, a partir da carga acumulada na bateria do veículo, utiliza-se um inversor de frequência. Dessa forma, o controle do inversor acaba sendo primordial no controle de tração do veículo (DENTON, 2018).

Normalmente as baterias utilizadas nos veículos atuais são compostas de células de íons de Lítio, conectadas em série e paralelo, organizadas em módulos, de forma a cumprir os requisitos necessários de tensão e corrente para prover a energia elétrica utilizada pelo motor. Por esses módulos também percorre um sistema de refrigeração, normalmente conectado a um radiador na parte frontal do veículo. A bateria normalmente é distribuída ao longo do piso do veículo, trazendo seu centro de gravidade para mais perto do solo e otimizando sua estabilidade. Atualmente, as baterias de VEs constituem um de seus maiores limitadores tecnológicos, já que a autonomia depende diretamente da capacidade de armazenamento de energia do veículo. À medida que as baterias evoluem (e entende-se que ainda há muito o que elas evoluírem), os VEs evoluem juntamente e o número de usuários aumenta cada vez mais.

Um VE sempre inclui um carregador interno, capaz de retificar a energia elétrica AC da rede ao qual está conectado para uma tensão DC necessária para carregar suas baterias. Dessa forma se faz possível o carregamento de um VE através da conexão até mesmo com uma rede elétrica doméstica, o que é um dos pontos fundamentais no desenvolvimento deste trabalho. Os sistemas de alimentação de veículos serão discutidos mais detalhadamente na Seção 1.3.

1.1.3 SITUAÇÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NO MUNDO

Como comentado anteriormente, o número de veículos elétricos vendidos em todo o globo tem superado expectativas a cada ano. Somente em 2018, foram totalizadas 1,26 milhões de vendas, o que representa um crescimento de 73% em relação ao registrado no ano anterior,

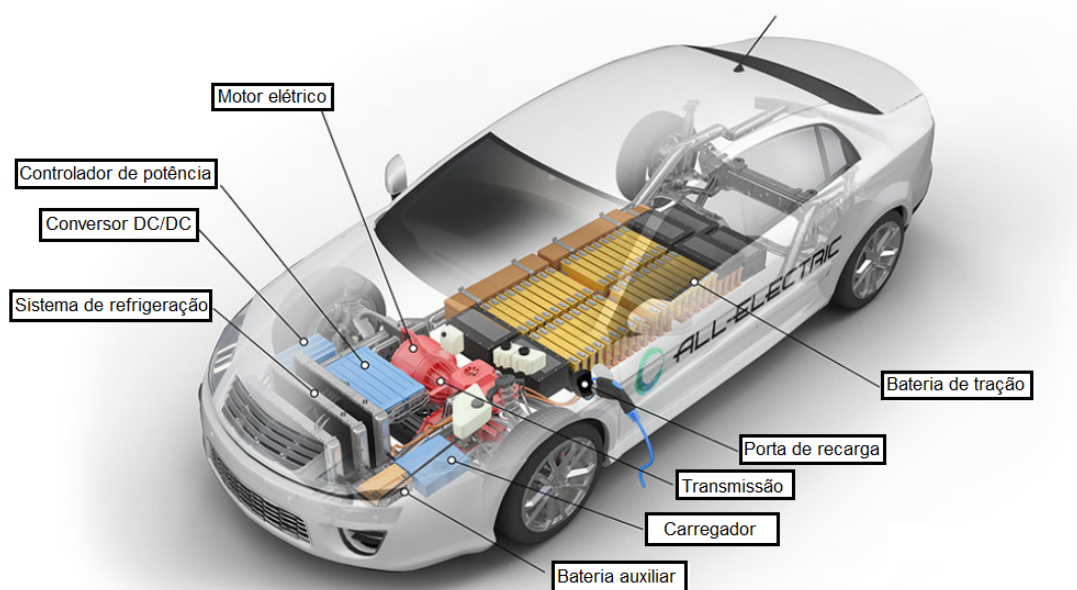


Figura 2 – Visão dos principais componentes de um VE

Fonte: Adaptado de Alternative Fuels Data Center (2019)

como já evidenciado na Figura 1. Já o número de carros convencionais vendidos totaliza cerca de 86,01 milhões, o que indica que ainda há um potencial enorme para o crescimento e penetração dos VEs no mercado. As maiores causas do aumento global de vendas de veículos elétricos em 2018 se devem, principalmente, às políticas de incentivo do governo chinês, ao lançamento do *Tesla Model 3*, e a crise do diesel na Europa. Assim, a China foi o país que mais comprou VEs em 2018, representando cerca de 61% das vendas globais, seguidos por 16,6% dos EUA, e em seguida a Noruega com 3,6%. A Noruega, por sinal, destaca-se por ser o país com maior penetração de VEs no mundo, sendo que praticamente um terço (31,2%) dos veículos comprados lá foram elétricos (CAR SALES BASE, 2019).

A fabricante mais expressiva tem sido a americana *Tesla*, principalmente devido ao lançamento em 2018 do *Tesla Model 3*. Destaca-se também a empresa chinesa BAIC, com seu modelo EC180 sendo este o segundo mais vendido em 2018, e com um mercado totalmente voltado para a China. A Tabela 2 destaca os modelos mais vendidos em 2018, trazendo seus números de vendas também em 2017. Nota-se que todos os veículos que já circulavam em 2017, com exceção do *Tesla Model S*, registraram um aumento no número de vendas.

1.2 VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL

A entrada de carros elétricos no Brasil ainda caminha a passos curtos. A combinação de elevados custos com baixa infraestrutura ainda é muito pouco atrativa para os consumidores brasileiros. Ao final de 2018, estima-se que circulavam 10 mil EVs no país, o que representa menos de 0,03% da frota total de 36 milhões de automóveis (FORBES, 2018). Apesar disso,

Tabela 2 – Ranking dos dez modelos de VEs mais vendidos no mundo

	Modelo	2018	2017
1	Tesla Model 3	145.846	0
2	BAIC EC180	90.637	78.079
3	Nissan Leaf	87.149	47.195
4	JAC iEV 3	55.570	28.262
5	Tesla Model S	50.045	54.715
6	Tesla Model X	49.349	46.535
7	Chery eQ EV	46.967	25.784
8	BYD e5	46.251	23.632
9	Renault Zoe	40.508	31.916
10	JMC E200	39.883	16.247

Fonte: Car Sales Base (2019)

não há falta de interesse por parte dos setores público e privado em trazer cada vez mais esse tipo de tecnologia para o Brasil. Somente em 2019, chegam aos mercados do país três modelos de grandes montadoras: o *Chevrolet Bolt* (vendido por cerca de 175 mil reais), o *Nissan Leaf* (200 mil reais), e o *Renault Zoe* (150 mil reais). Além disso, já circulam outros modelos como o *BMW i3* (custando em torno de 200 mil reais), que é vendido desde 2015 no Brasil. A BMW por sinal, é uma das responsáveis por financiar o corredor elétrico entre as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, com seis pontos de carregamento rápido ao longo dessa rodovia. No Paraná, uma eletrovia que liga as cidades de Paranaguá e Foz do Iguaçu possui oito eletropostos, concebida pela concessionária de energia elétrica paranaense Copel. Partindo também da iniciativa pública, o Sistema Fiep inaugurou ao final de 2018, em Curitiba, o Centro de Tecnologia de Veículos Híbridos e Elétricos, pronto para atender as demandas emergentes do setor industrial da região, fornecendo infraestrutura para o desenvolvimento tecnológico na área, além de ofertar cursos especializados.

Assim, verifica-se que o mercado brasileiro tem grande interesse nos VEs. Mas, para que se diminuam os custos, trazendo os VEs a preços competitivos e próximos aos dos veículos tradicionais, há uma necessidade de políticas de incentivo fiscais por parte do governo, ao mesmo tempo em que se realize a implementação de linhas de produção dentro do próprio país, seguindo modelos já bem sucedidos como os da China e Noruega.

1.3 SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

Existem diversas formas pelas quais um VE pode ser recarregado. É possível realizar a recarga tanto em ambientes domésticos quanto em estações públicas, através de recarga rápida ou lenta, com diversas configurações de cabos e plugues, ou até mesmo sem a utilização de cabos de energia, através da indução magnética. Como comentado na Seção 1.1.2, um VE possui um carregador interno, responsável por retificar a energia elétrica que recebe para os

níveis próprios à bateria. Assim, o VE pode ser conectado a uma rede de energia doméstica, já a partir de 127 VAC, sempre respeitando as limitações de corrente elétrica da instalação. Para que se alcancem potências maiores, e conseqüentemente tempos de recarga menores, podem-se utilizar redes de maior tensão ou trifásicas. Além disso, algumas estações de recarga, ou eletropostos, ditas de "recarga rápida", realizam uma retificação internamente e assim são capazes de fornecer uma altíssima potência ao veículo, já em corrente contínua. A Tabela 3 exemplifica como diferentes configurações de carregamento afetam o tempo necessário para dar autonomia de 100 km a uma bateria Íon-Lítio padrão de um VE.

Tabela 3 – Tempos estimados de recarga

Tempo de recarga (100 km)	Fonte	Potência	Tensão	Corrente Máx.
6-8 Horas	Monofásica	3,3 kW	230 V AC	16A
3-4 Horas	Monofásica	7,4 kW	230 V AC	32A
2-3 Horas	Trifásica	11 kW	400 V AC	16A
1-2 Horas	Trifásica	22 kW	400 V AC	32A
20-30 Minutos	Trifásica	43 kW	400 V AC	63A
20-30 Minutos	Contínua	50 kW	400–500 V DC	100–125 A
10 Minutos	Contínua	120 kW	300–500 V DC	300–350 A

Fonte: Denton (2018)

Uma das normas internacionalmente aceitas para a padronização dos modos de recarga, plugues para conexão com o veículo, cabos e instalações elétricas, além de outros requisitos de segurança, é a IEC 61851. Essa norma delimita todo o desenvolvimento deste trabalho, e por isso será comentada com mais detalhes no capítulo 2. Neste momento, é necessário somente definir um sistema de alimentação para veículos elétricos (SAVE), e também realizar a distinção entre os diferentes modos de recarga. Dessa forma, a norma traz a seguinte definição:

SAVE é conjunto de condutores, incluindo os condutores de fase, de neutro e de aterramento de proteção, os conjuntos conectores do VE, os plugues e todos os outros acessórios, dispositivos, tomadas ou aparelhos instalados especificamente com a finalidade de fornecer energia ao VE, a partir da rede de alimentação da edificação, e permitindo a comunicação entre eles, se necessário (ABNT, 2013, p. 5).

Além disso, são definidos os quatro diferentes modos de carga:

- Modo de recarga 1: Conexão do VE à rede de alimentação utilizando tomadas padronizadas que não excedam 16 A e não excedam 250 V em corrente alternada monofásica ou 480 V em corrente alternada trifásica, utilizando condutores de alimentação e de aterramento de proteção adequados.
- Modo de recarga 2: Conexão do VE à rede de alimentação utilizando tomadas padronizadas que não excedam 32 A e não excedam 250 V em corrente alternada monofásica ou 480 V em corrente alternada trifásica, utilizando os condutores de alimentação e de aterramento de proteção adequados com uma função-piloto de comando, e com o sistema de proteção

das pessoas contra choques elétricos entre o VE e o plugue ou como parte da caixa de controle integrada ao cabo. A caixa de controle integrada ao cabo deve estar situada a 0,3 m do plugue, ou do SAVE, ou do interior do plugue.

- Modo de recarga 3: Conexão do VE à rede de alimentação em corrente alternada utilizando o SAVE dedicado, onde a função-piloto de comando se estende aos dispositivos de controle situados no SAVE, conectados permanentemente à rede de alimentação de corrente alternada.
- Modo de recarga 4: Conexão do VE à rede de alimentação em corrente alternada utilizando um carregador externo, onde a função-piloto de comando se estende aos dispositivos conectados permanentemente à alimentação em corrente alternada.

1.4 MOTIVAÇÃO

Dado o panorama geral sobre a situação dos veículos elétricos no Brasil e no mundo, além das devidas definições técnicas necessárias, este trabalho se propõe a desenvolver uma prova de conceito de um sistema de alimentação para veículos elétricos (SAVE) que implemente o modo de recarga 3, implementando a comunicação com o veículo através da função-piloto de comando. Além disso, o SAVE desenvolvido terá as funções adicionais de medição da potência do carregamento executado, além da comunicação com um servidor remoto, permitindo a telemetria dos dados obtidos com a medição além do controle do usuário sobre a situação e condições da recarga.

A motivação do projeto decorre da identificação de uma janela de oportunidade para desenvolvimento de um produto na área de veículos elétricos, já que essa é uma tecnologia muito relevante em vários lugares do mundo porém ainda está somente começando a ser explorada no Brasil. O SAVE desenvolvido pode vir a ser uma alternativa simples e relativamente barata para quem deseja instalar um ponto de recarga em sua residência, ou até mesmo para a instalação em ambientes públicos ou compartilhados, como por exemplo um estacionamento de prédio ou condomínio, onde pode-se registrar quanta energia elétrica foi consumida por cada condômino durante seu carregamento para que se reparta a conta elétrica de maneira proporcional.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GERAL

- Desenvolver um sistema embarcado completo como prova de conceito para a recarga de veículos elétricos.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver o hardware necessário para realizar a comunicação com o VE, utilizando-se do sinal de função-piloto descrito na norma IEC 61851, além do hardware capaz de

permitir o carregamento do veículo.

- Desenvolver o software embarcado necessário para a comunicação via função-piloto entre o SAVE e o VE.
- Implementar a comunicação do sistema embarcado com um *broker* remoto, via protocolo MQTT e conectado à internet através de sinal *Wi-Fi*.
- Realizar a medição da potência consumida pelo VE durante o seu carregamento.
- Implementar a integração de todos os módulos em um kit de desenvolvimento que já integra um microcontrolador e periféricos necessários para a conexão *Wi-Fi*.
- Integrar alimentação elétrica de todos os componentes do SAVE em uma conexão única com a rede elétrica, por onde também é realizado o carregamento.
- Realizar a montagem de todos os componentes dentro de um único invólucro.
- Realizar testes de validação que comprovem o funcionamento da prova de conceito.
- Estimar a viabilidade com a qual esta prova de conceito apresentada possa se tornar, no futuro, um produto comercializável.

1.6 REQUISITOS DE PROJETO

1.6.1 REQUISITOS FUNCIONAIS

- A comunicação deve ser capaz de informar a corrente máxima com que o veículo pode demandar da rede elétrica, além de informar alterações de estado do SAVE para o veículo ou vice-versa.
- O sistema deve ser capaz de publicar uma mensagem ao *broker* informando cada vez que houver alguma alteração do estado de carregamento do veículo.
- O sistema deve ser capaz de publicar uma mensagem ao *broker* cada vez que executar uma medição da potência consumida durante o carregamento, informando o valor obtido já em watts.
- O sistema deve se inscrever em um tópico do *broker* para que possa ser comunicado quando o usuário inserir algum valor de corrente máxima a ser consumida pelo VE. O carregamento só deve ser iniciado quando for recebido algum valor válido nesse tópico.
- A medição de corrente e tensão deve ser feita por um módulo de hardware externo, ao qual o sistema embarcado deve ser capaz de se comunicar.

1.6.2 REQUISITOS NÃO FUNCIONAIS

- Os módulos de software devem ser executados na MCU paralelamente e se comunicar entre si através da implementação de um sistema operacional de tempo real.
- Para a montagem final do sistema, todos os módulos de hardware desenvolvidos devem ser implementados em placas de circuito impresso.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão discutidos, com a devida profundidade, os aspectos teóricos que fundamentam o desenvolvimento deste projeto. Inicia-se com uma apresentação geral da norma IEC61851 que, como já apresentado, especifica um sistema de alimentação para veículos elétricos. Ainda nesse tópico, apresenta-se uma revisão detalhada do Anexo A da norma, que descreve o protocolo de comunicação com o veículo via um sinal de função-piloto.

Na sequência, comenta-se sobre o que é um sistema de tempo real e sua relevância, apresentando o *FreeRTOS* como sistema operacional de tempo real utilizado no desenvolvimento deste projeto. Por fim, apresenta-se o protocolo de comunicação MQTT, utilizado para a comunicação do SAVE com um servidor (*broker*) remoto.

2.1 ANÁLISE DA NORMA IEC 61851

A norma IEC 61851 estabelece um padrão internacional para sistemas de recarga condutivos de veículos elétricos, criada pela Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission*). Sua primeira edição é de 2001, sendo composta das seguintes partes:

- IEC 61851-1: Requisitos gerais
- IEC 61851-21: Requisitos de veículos elétricos para a conexão condutiva a uma alimentação em corrente alternada ou contínua
- IEC 61851-22: Estação de recarga em corrente alternada para veículos elétricos
- IEC 61851-23: Estação de recarga em corrente contínua para veículos elétricos

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, publicou em 2013 a versão brasileira da norma internacional, inteiramente traduzida, sob o título geral ABNT NBR IEC 61851: “Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos” (ABNT, 2013). Ela se aplica aos sistemas embarcados ou não embarcados para a recarga de veículos elétricos rodoviários com tensões alternadas normalizadas até 1000 V e com tensões contínuas até 1500 V, assim como para a alimentação com energia elétrica a todos os serviços auxiliares do veículo durante a conexão à rede elétrica, se necessário.

A norma estabelece todos os termos e definições já apresentados na introdução deste trabalho, como as descrições de VE e de SAVE, e quais são seus modos de recarga. Também estabelece que, como requisito geral, o VE deve ser conectado ao SAVE de maneira que, em condições normais de utilização, a função de transferência de energia condutiva funcione com toda segurança. Assim, a norma é responsável por impor todos os requisitos pertinentes para que se alcance este objetivo. Apesar deste trabalho ser apenas uma prova de conceito, a norma define grande parte do desenvolvimento deste, sendo responsável por estabelecer os protocolos de comunicação utilizados entre o SAVE e o veículo, níveis de tensão utilizados, procedimentos,

e conexões físicas e elétricas.

A norma estabelece que qualquer SAVE que opere nos modos 2, 3, ou 4 deve obrigatoriamente implementar as seguintes funções:

- Função-piloto de controle, para comunicação entre o SAVE e o veículo, que permite a verificação de que o veículo está corretamente conectado e a verificação do momento em que o veículo está devidamente pronto para carga
- Verificação permanente da continuidade do condutor de aterramento de proteção
- Energização do sistema
- Desenergização do sistema

Além disso, a norma dá a opção para que sejam implementadas as seguintes funções adicionais:

- Seleção da intensidade de recarga
- Determinação dos requisitos de ventilação da área de recarga
- Detecção em tempo real da potência disponível no equipamento de alimentação
- Retenção/liberação do conjunto conector VE
- Controle do fluxo de potência bidirecional, para e a partir do veículo

Assim, para esta prova de conceito, serão implementadas todas as funções obrigatórias, além das funções adicionais de seleção de intensidade de carga e medição da potência consumida. O tópico de determinação dos requisitos de ventilação, diz respeito a um sistema de detecção de condições adequadas de ventilação do veículo durante a recarga, de forma que o SAVE não permita a recarga em ambientes sem as devidas condições de ventilação, protegendo o usuário e o veículo. Para a prova de conceito, entende-se que a recarga será feita em ambientes adequados e por isso tal função não foi implementada. O dispositivo de liberação e o controle de fluxo de potência também não foram implementados (com exceção de um sistema de disjuntor acoplado à rede para evitar qualquer pico de fornecimento de energia indesejado, protegendo o veículo).

A função-piloto estabelece a comunicação com o veículo propriamente dita. O Anexo A da norma estabelece todo o protocolo de comunicação entre o SAVE e o VE, sendo descrito com detalhes na Subseção 2.1.1.

2.1.1 REVISÃO DO ANEXO A (FUNÇÃO-PILOTO POR MEIO DE UM CIRCUITO-PILOTO DE CONTROLE UTILIZANDO UM MODULAÇÃO PWM E UM FIO-PILOTO)

O Anexo A da norma IEC 61851-1 define a função-piloto de controle como um circuito de condutor com uma modulação PWM, responsável por definir o nível de corrente disponível para os modos de recarga 2 e 3. Ele também descreve as funções e o sequenciamento dos eventos para este circuito (ABNT, 2013, p. 31).

A Figura 3 apresenta a configuração de hardware da função-piloto, tanto no SAVE quanto no veículo. Nota-se que o SAVE gera um sinal de 12V, modulado por um sinal PWM de 1 kHz. O ciclo de trabalho do PWM deste sinal é responsável por indicar ao veículo qual

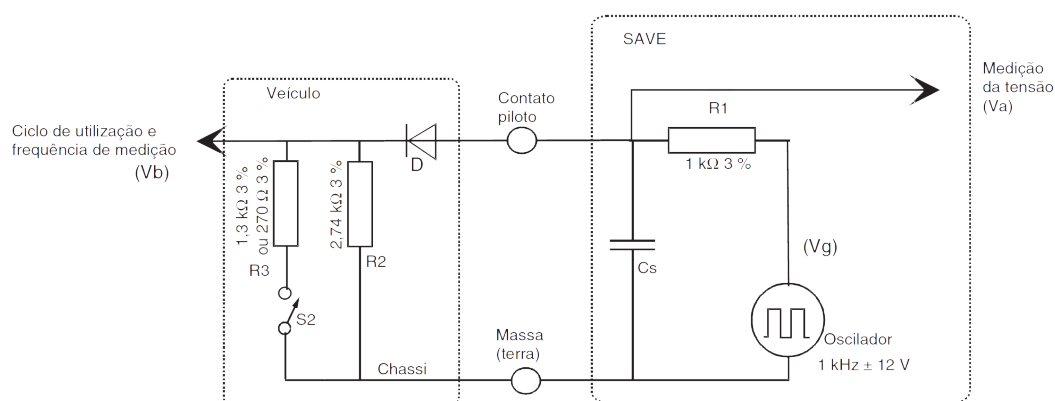


Figura 3 – Circuito-piloto típico de controle

Fonte: ??)

a corrente máxima que deve ser consumida da rede. Além disso, nota-se que o próprio SAVE realiza uma medição de tensão (V_a) sobre esse sinal aplicado a uma rede resistiva. Assim, o sinal acaba variando de amplitude de acordo com quais resistores estão conectados. Ou seja, quando o SAVE não está conectado ao veículo, mede-se somente os 12V. Já quando há a conexão, adiciona-se o resistor R2 à rede e a estação indica a conexão, a partir da tensão de 9V medida. Quando o veículo fecha a chave S2, adicionando o resistor R3 à rede e abaixando a tensão para 6V, ele indica ao SAVE que está pronto para iniciar a recarga.

Dessa forma, a norma define seis diferentes estados possíveis em que o veículo pode estar, identificados pelas letras A, B, C, D, E, e F. Cada um deles é definido pelas seguintes condições:

- Estado A: Veículo desconectado do SAVE. A tensão V_a no SAVE é de 12V.
- Estado B: Veículo conectado ao SAVE, porém ainda não pronto para a carga. O interruptor S2 ainda está aberto. A tensão V_a é de 9V, já que R2 foi conectado.
- Estado C: Veículo conectado ao SAVE, e pronto para a carga ou já carregando. O interruptor S2 está fechado. A tensão V_a é de 6V, já que R3 também foi conectado.
- Estado D: Da mesma forma que o estado C, o veículo conectado ao SAVE e pronto para a carga ou carregando. A tensão V_a é de 3V, com o veículo indicando a recarga na zona de ventilação.
- Estado E: Estado de erro, indicando problema na rede pública ou fio-piloto em curto-circuito com o terra. V_a mede 0V.
- Estado F: SAVE indica que está indisponível. V_a mede -12V.

Para exemplificar esses estados, a Figura 4 apresenta as variações do sinal de piloto em um ciclo completo de recarga. Cada momento de transição é marcado por um número de identificação. O Quadro 1 indica o que representa cada marcação.

Como já comentado, o ciclo de trabalho do sinal PWM, representado pela porcentagem do tempo de um ciclo em que o sinal está em nível alto, irá dizer ao veículo qual a corrente

Quadro 1 – Descrição da sequência de conexão para recarga

Número	Estado	Descrição das situações
1	A	Veículo não conectado: a tensão do gerador é medida pelo SAVE para a tensão V_a . O sinal do gerador V_g é uma tensão de 12 VDC.
2	B	O cabo de recarga está conectado ao veículo e ao SAVE. Esta condição é detectada pelo sinal de 9 V medido na tensão V_a . A tensão do gerador de sinal (V_g) pode ser constante, a 12 VCC, ou de forma quadrada, a ± 12 V, com sinal PWM de 1 kHz se o SAVE está imediatamente disponível para o fornecimento de energia.
3	B	O SAVE é agora capaz de fornecer energia e de indicar a corrente disponível para o veículo pelo ciclo contínuo. A presença do diodo D (ver Figura 3) é detectada pelo -12 V e dá mais garantia que o sinal de 9 V, sendo uma indicação confiável da conexão do veículo.
4	B \rightarrow C,D	S2 está fechado pelo veículo como função dos requerimentos para indicar que este pode receber energia. Não existe nenhum requisito de tempo para a passagem para a posição ON.
5	C,D	O SAVE fecha o circuito do veículo à rede elétrica. Os tempos de comutador fechado pode ser objeto de outros requisitos (pagamento, troca de dados). Se o estado D for detectado, o comutador se fechará somente se os requisitos de ventilação forem respeitados.
6	C,D	Corrente de saída do veículo. Os tempos e a forma da corrente são determinados pelo veículo. A corrente não pode ultrapassar aquela indicada pela informação do ciclo.
7	C,D	Demanda externa de redução de potência. Uma tal demanda pode ser da rede ou da regulação manual do SAVE. O veículo ajusta a demanda de corrente àquela indicada pela informação do ciclo.
8	C,D	Fim de recarga determinado pelo veículo.
9	C,D \rightarrow B	O veículo solicita o seccionamento. Isto pode ser o resultado de um contato de proximidade sendo aberto.
10	B	O SAVE detecta o estado B (criado pela abertura de S2 no veículo) e abre o contator.
11	A	A retirada total do cabo de recarga do veículo ou do SAVE é detectada pelo sinal de 12 V.

Fonte: ABNT (2013)

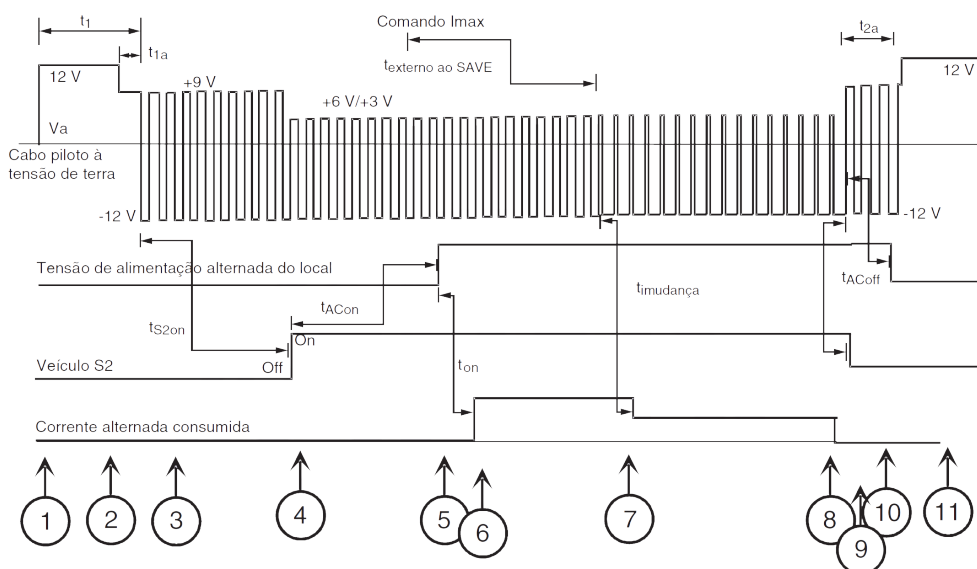


Figura 4 – Ciclo típico de recarga nas condições normais de operação

Fonte: ??)

máxima que ele poderá drenar da rede. A Tabela 4 apresenta como é calculado o valor da corrente, em amperes, de acordo com este ciclo de trabalho.

Tabela 4 – Corrente máxima consumida pelo veículo em função do ciclo de trabalho do sinal PWM

Ciclo de trabalho do PWM	Corrente máxima consumida pelo veículo
ciclo de trabalho < 8%	Recarga não autorizada
$8\% \leq$ ciclo de trabalho < 10%	6A
$10\% \leq$ ciclo de trabalho \leq 85%	Corrente disponível = (%ciclo de trabalho) x 0,6 A
$85\% <$ ciclo de trabalho \leq 96%	Corrente disponível = (%ciclo de trabalho - 64) x 2,5 A
$96\% <$ ciclo de trabalho \leq 97%	Corrente disponível = 80A
ciclo de trabalho > 97%	Recarga não autorizada

Fonte: ABNT (2013)

Com essas informações, o SAVE é capaz de estabelecer comunicação com o VE, sabendo se ele está conectado e pronto para carga, e indicando a ele os parâmetros para o consumo de energia. Assim, a função-piloto de controle é fundamental para o SAVE desenvolvido nesse trabalho, já que espera-se que o usuário possa controlar a sua recarga remotamente.

2.2 SISTEMAS DE TEMPO REAL

No contexto de sistemas embarcados, pode-se dizer que os sistemas de tempo real são aqueles capazes de cumprir suas tarefas e entregá-las dentro de um prazo determinado (LIU, 2000). Alguns exemplos incluem sistemas de controle digital, processamento de sinais, e

telecomunicações. Quando estamos em um avião, por exemplo, os sistemas de tempo real são responsáveis por planejar e monitorar a decolagem e aterrissagem, fazê-lo voar e manter sua trajetória, garantindo a segurança dos passageiros. Dessa forma, percebe-se a importância da confiabilidade e determinismo de sistemas desse tipo, já que qualquer falha no prazo de execução de alguma tarefa pode vir a ser fatal. Em geral, sistemas de tempo real são multitarefas, ou seja, são capazes de executar uma série de trabalhos paralelamente, ou melhor, pseudo-paralelamente. Isso pois, em contextos onde tem-se somente um processador de um único núcleo rodando múltiplas tarefas, o sistema deve ser capaz de chavear a tarefa que o processador executa em uma frequência elevada, fazendo com que as tarefas aparentem ser executadas "ao mesmo tempo". Por esse motivo, é necessário o uso de sistemas operacionais de tempo real, comumente chamados de RTOS (*Real Time Operating Systems*).

O *kernel*, ou núcleo, de um RTOS procura dar suporte para garantir que aplicações embarcadas possam ser desenvolvidas para que sejam cumpridos seus requisitos de tempo real. Ele é responsável por implementar o escalonador (*scheduler*), um algoritmo que determina qual tarefa deve ser executada em cada momento, chaveado o contexto entre elas quando necessário. Para tomar esse tipo de decisão, o escalonador deve levar em conta uma série de fatores pré-definidos no sistema, sendo um dos principais a prioridade de cada tarefa. Em um cenário simplificado, o desenvolvedor que utiliza um RTOS deve ser capaz de designar alta prioridade para tarefas que possuam maior criticidade temporal (*hard real time requirements*) e menor para aquelas que possuam um prazo mais folgado de execução (*soft real time requirements*).

Existem diversos critérios que o escalonador pode utilizar para determinar qual tarefa irá escolher, dentre as tarefas que estiverem aptas a serem executadas. Basicamente, um RTOS dinâmico pode ser preemptivo ou não-preemptivo. No sistema não-preemptivo, uma tarefa que está sendo executada irá utilizar os recursos do processador até que termine sua execução. Já em um preemptivo, o escalonador é capaz de interromper a tarefa, caso alguma outra com maior prioridade fique apta a ser executada durante esse período.

2.2.1 FREERTOS

O *FreeRTOS* é um kernel de tempo real desenvolvido inteiramente pela empresa britânica *Real Time Engineers Ltd.*, que trabalha em parceria com as maiores fabricantes de MCUs do mundo há mais de uma década, provendo um software gratuito e de qualidade. O sistema é reconhecido por ser simples, leve e robusto, o que o torna um dos RTOSs mais populares atualmente. Inclusive, a Amazon oferece uma versão estendida do *kernel* do *FreeRTOS*, com bibliotecas de software que facilitam a conexão segura de dispositivos pequenos e de baixo consumo a serviços em nuvem da AWS (Amazon Web Services). Ele é ideal para aplicações embarcadas com requisições de *hard real time* e *soft real time*, rodando em microcontroladores ou microprocessadores (BARRY, 2016).

Em um sistema embarcado, o kernel do *FreeRTOS* atua como uma camada de software sobre a qual podem ser desenvolvidas as aplicações de usuário, permitindo que essas sejam

organizadas como módulos de *threads* (tarefas) de execução independente. O escalonador irá decidir qual tarefa será executada examinando a prioridade dada a cada uma. Além disso, ele provê diversos recursos necessários para a comunicação segura entre tarefas de um sistema operacional, como filas de mensagens e semáforos.

2.3 PROTOCOLO MQTT

O MQTT (do inglês *Message Queue Telemetry Transport*) é um dos protocolos mais utilizados no contexto de internet das coisas (IoT). Isso pois ele é extremamente simples e leve, implementado através de um padrão de publicação e assinatura, sendo ideal para aplicações onde os dispositivos tem capacidades limitadas de processamento ou contextos em que se possui uma largura de banda restrita. Foi desenvolvido por engenheiros da IBM no final dos anos 90, com o intuito de conectar desde sensores em dutos de petróleo a satélites, vindo a se tornar um padrão aberto em 2014 (YUAN, 2017).

No modelo de publicação e assinatura temos duas figuras principais: o *message broker* e os clientes. O *broker* é o servidor principal, responsável por receber e repassar as mensagens de todos os clientes conectados a ele. Os clientes são os serviços que rodam em dispositivos conectados ao *broker* e se comunicam com ele. No momento em que um cliente se conecta, ele é capaz de realizar assinaturas em quantos tópicos desejar. Dessa forma, quando algum cliente faz uma publicação em alguns desses tópicos, todos os outros clientes que assinaram o mesmo receberão a mensagem. A Figura 5 ilustra essa dinâmica entre clientes e o *broker*. Tem-se um grupo de sensores (*Sensor*) assinando um tópico chamado "*config_change*". Assim, quando o administrador publica uma mensagem de configuração nesse tópico, os sensores recebem imediatamente. Da mesma forma os dispositivos publicam suas informações coletadas no tópico "*sensor_data*", encaminhando estas para a unidade de processamento e persistência de dados inscrita no tópico.

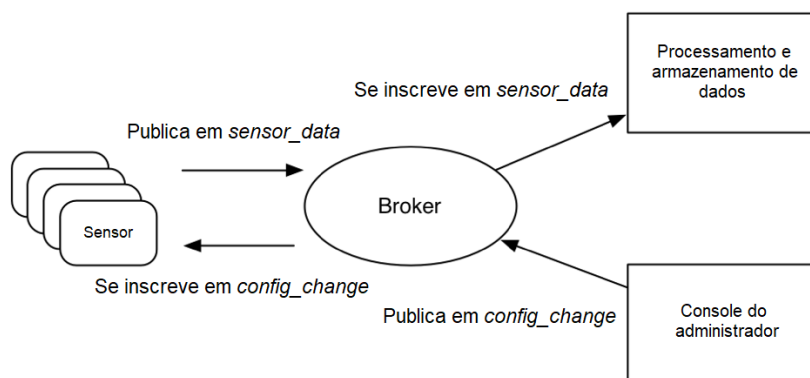


Figura 5 – Modelo de publicação e assinatura do MQTT

Fonte: Adaptado de Yuan (2017)

A vantagem do MQTT sobre outros protocolos da camada de aplicação, como o HTTP, é que o MQTT é assíncrono, bidirecional, leve, e capaz de transmitir uma mensagem de um para muitos. Assim, ele se torna mais escalável e capaz de ter uma latência muito menor durante a transmissão das mensagens. Por operar sobre uma camada TCP/IP ele também é capaz de implementar uma conexão TLS criptografada, garantindo segurança na transmissão de mensagens sigilosas.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritas com mais detalhes as particularidades técnicas do desenvolvimento da prova de conceito do SAVE. O capítulo divide-se em uma Seção sobre a implementação de hardware e outra de software.

Na Seção 3.1, detalham-se o kit de desenvolvimento (contendo MCU e módulo de comunicação Wi-Fi) e o módulo de medição de potência utilizados. Além disso, apresentam-se os circuitos desenvolvidos da fonte simétrica e de condicionamento do sinal da função-piloto. Por fim, são apresentados os detalhes da montagem elétrica e mecânica do equipamento. Já na Seção 3.2, apresenta-se um panorama geral sobre a estruturação do software desenvolvido, levando em conta as especificidades da MCU em questão e detalham-se cada uma das principais tarefas rodando no sistema operacional.

3.1 ESTRUTURA DE HARDWARE DO SISTEMA

3.1.1 MICROCONTROLADOR CC3220S

O CC3220S é um chip da linha *SimpleLink*, da empresa americana *Texas Instruments*, criado principalmente para o desenvolvimento de aplicações IoT embarcadas. Ele possui uma arquitetura de dois núcleos internos: uma MCU voltada para as aplicações de usuário e um processador de rede Wi-Fi integrado. Assim, o microcontrolador CC3220S demonstra-se uma solução adequada para o desenvolvimento inicial do sistema de alimentação descrito neste trabalho. Para fins de prototipagem, utiliza-se o kit de desenvolvimento CC3220S-LAUNCHXL, apresentado na Figura 6, que já conta com uma série de periféricos externos para facilitar o desenvolvimento, tais quais como um conjunto de leds, *push buttons*, interface JTAG para debug e programação da memória flash interna, conectores para pinos externos, e uma antena Wi-Fi. O módulo MCU do chip conta com um processador *ARM Cortex-M4* de 80 MHz, 256KB de memória RAM, e uma série de periféricos integrados como SPI, I2C, UART, ADCs, Timers, PWM, e GPIOs.

O subsistema de rede do chip possui soluções variadas de segurança e conectividade, como é ilustrado na Figura 7. Nota-se que já existe toda a implementação da pilha TCP/IP (com suporte a IPv4 e IPv6), implementação de camadas de aplicação como HTTP, DNS e DHCP (inclusive do protocolo MQTT, não apresentado na Figura 7), e outros serviços como o sistema de arquivos (*Secure Filesystem*), utilizado no desenvolvimento da estação de carga para realizar o armazenamento seguro de informações de rede e usuário. A comunicação física entre os módulos do chip ocorre através do barramento SPI e UART, e as chamadas feitas ao subsistema de rede pela aplicação de usuário são realizadas através da API *SimpleLink*. Sobre esta API são feitos comentários mais específicos na Seção 3.2.

Dessa forma, o CC3220S foi escolhido por apresentar-se como uma solução de conecti-

vidade completa e robusta para o que se deseja, além de já integrar no kit de desenvolvimento todos os periféricos necessários. Apesar disso, vale ressaltar que existem outras placas de desenvolvimento no mercado que também atendem os requisitos do projeto. Uma delas, por exemplo, é a *ESP32*, fabricada pela empresa *Espressif Systems*. Apesar de não possuir a mesma arquitetura *dual core* e APIs do produto da *Texas Instruments*, a placa já integra um microcontrolador com Wi-Fi integrado. A escolha do CC3220S foi realizada somente por entender-se que, no momento, ele apresenta uma melhor escalabilidade quando se trata de implementações dos recursos de rede e uso de periféricos externos.

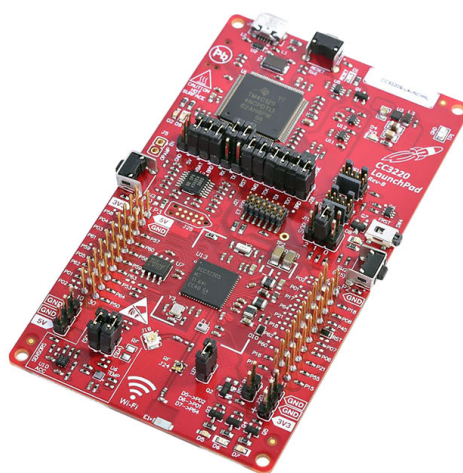


Figura 6 – Foto do kit CC3220S-LAUNCHXL

Fonte: Texas Instruments (2019)

3.1.2 MEDIDOR PZEM004T

O PZEM004T, fabricado pela empresa chinesa *Peacefair*, é um medidor de consumo de energia elétrica capaz de trabalhar com correntes de até 100A e tensões alternadas de até 260 V. Para possibilitar a comunicação com microcontroladores, contém uma interface serial. Pelas suas especificações, custo relativamente baixo (cerca de R\$ 100), e praticidade, ele se mostrou como uma solução muito útil para avaliar o consumo de potência do veículo elétrico durante seu carregamento. Além disso, é a única solução encontrada em mercado que não exige nenhum desenvolvimento extra para essa aplicação, de tal forma que o módulo cumpre o papel de facilitar o desenvolvimento para validar a funcionalidade de medição de potência dentro da prova de conceito.

Conforme indicado na Figura 8, O PZEM004T possui um transformador de corrente que, por efeito indutivo na sua bobina, é capaz de medir a corrente que percorre o fio que o atravessa, além de ter um medidor de tensão embutido. Assim, a partir de um microcontrolador interno, o dispositivo é capaz de determinar a potência real consumida pela carga conectada a

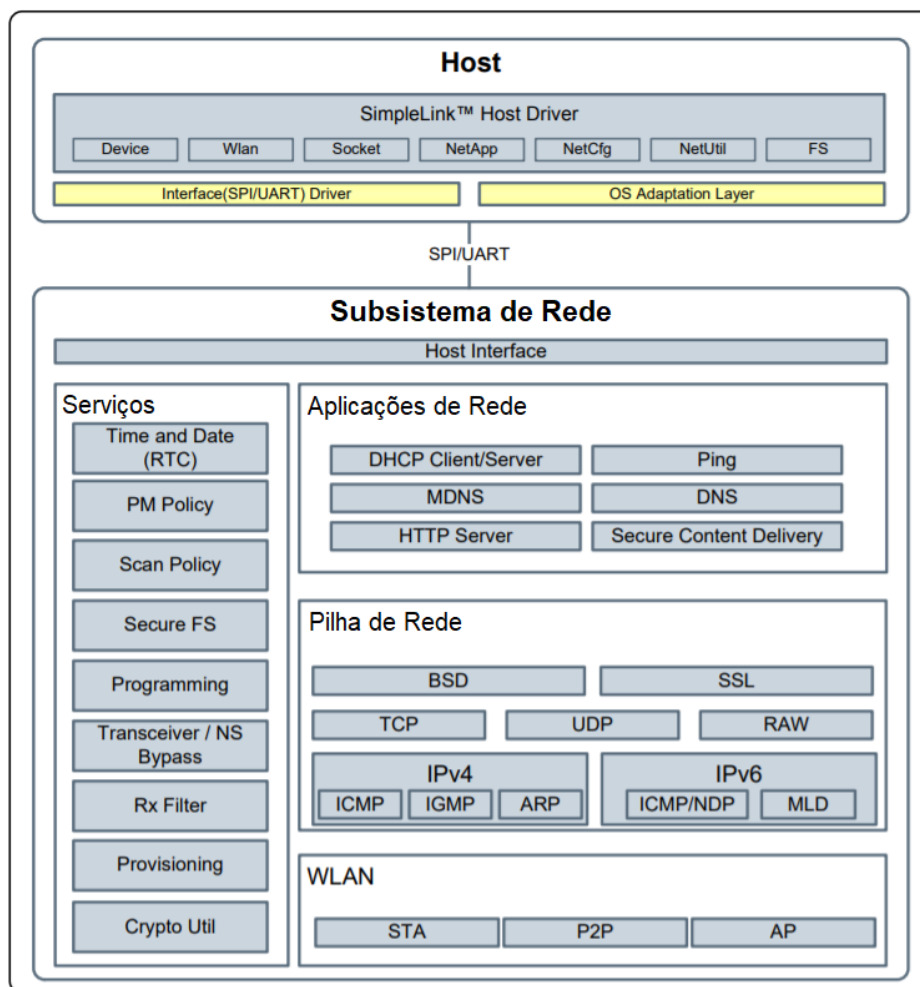


Figura 7 – Diagrama de blocos do subsistema de rede do CC3220S

Fonte: Adaptado de Texas Instruments (2019)

ele. A Figura 9 mostra como o medidor deve ser conectado a esta carga, que no caso representa o carregador do veículo.

Através da Equação (1), o medidor PZEM004T também é capaz de calcular internamente a energia elétrica consumida desde que é iniciado (instante de tempo $t1$) até o momento em que é solicitada a medição (instante de tempo $t2$), integrando no tempo o valor das potências instantâneas calculadas.

$$E = \int_{t1}^{t2} P(t) dt \quad (1)$$

O medidor comunica-se com o microcontrolador CC3220S através de comunicação serial TTL. Os detalhes de implementação de software da camada de comunicação entre os dispositivos são comentados na Subseção 3.2.3. Deve-se atentar para o detalhe de que tanto a comunicação quanto a alimentação do medidor PZEM004T são baseadas em uma tensão de 5V, enquanto a porta serial do microcontrolador CC3220S trabalha em 3,3V. Dessa forma,



Figura 8 – Foto do medidor PZEM004T

Fonte: Adaptado de Cintra (2017)

faz-se necessário o uso de um conversor lógico 3,3/5V entre ambos.

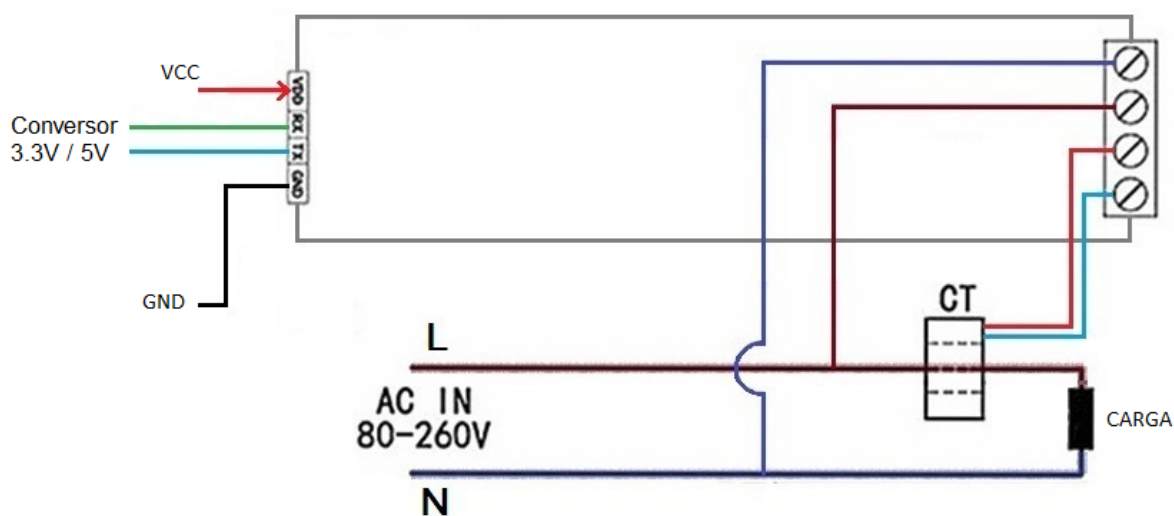


Figura 9 – Esquema de ligação do medidor PZEM004T

Fonte: Adaptado de Cintra (2017)

3.1.3 FONTES DE ALIMENTAÇÃO

A alimentação do sistema está dividida em duas partes: uma para o circuito de lógica de comunicação com o veículo e outra para o conjunto composto pelo CC3220S, PZEM004T e o conversor lógico de 3,3V/5V.

Para a parte do circuito de lógica, foi utilizada uma fonte chaveada convencional de 24V, que fornece até 1,5A. Esta fonte é utilizada como alimentação para a geração das

tensões simétricas de +12V e -12V necessárias para o sinal PWM de função-piloto. As tensões simétricas, por sua vez, são geradas através de um circuito com uma fonte *buck* e uma fonte inversora, projetadas utilizando dois reguladores de fonte chaveada MC34063A, da *Texas Instruments*, um para cada nível de tensão. A estrutura interna do regulador MC34063A é indicada na Figura 10.

O regulador MC34063A tem grande amplitude de tensão de entrada, podendo receber de 3V até 40V, com um chaveamento interno de até 100kHz, cujo valor pode ser alterado através de um capacitor externo acoplado ao regulador. Para os dois reguladores utilizados, a frequência de oscilação selecionada para chaveamento foi de 50kHz, com uma oscilação (*ripple*) de amplitude menor que 0,05V, além do fornecimento de uma corrente de saída de no máximo 500mA. Nas saídas de ambos foram adicionados um filtro LC para diminuir as oscilações dos valores de tensão e corrente de saída. Além disso, caso ocorra um curto-circuito entre a tensão de alimentação e o referencial de terra, a corrente máxima de saída é limitada, para proteção. No *datasheet* do regulador, encontram-se as fórmulas necessárias para o projeto das fontes, de acordo com os parâmetros desejados, por exemplo: oscilação de amplitude máxima desejada, corrente de saída e tensão de saída. É possível operar este regulador também como *boost*, além das configurações utilizadas neste projeto.

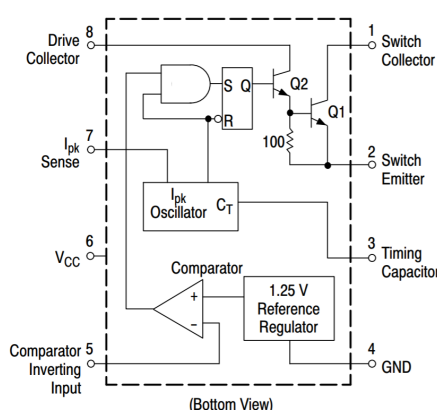


Figura 10 – Regulador de fonte chaveada MC34063A

Fonte: Texas Instruments

A escolha desta topologia de alimentação, utilizando uma fonte chaveada de 24V para alimentar dois reguladores para chaveamento, foi baseada no critério de permitir uma maior flexibilidade para o circuito de acionamento da carga para o carro, pois há bobinas de contadores que podem utilizar tanto as tensões alternadas de 110V e 220V, como bobinas de 12V ou 24V. Neste caso, todas as tensões estariam disponíveis para serem utilizadas, flexibilizando a escolha e troca de um contator caso se desejasse alterar a potência do equipamento, ao contrário da utilização de apenas uma fonte chaveada de 12V alimentando um regulador operando como inversor, por exemplo, para geração da tensão de -12V. Como o regulador MC34063A tem baixo custo, na ordem de \$0,20, e a diferença entre os preços das fontes chaveadas de 12V e

24V não é alta, compensa utilizar esta topologia em prol da flexibilidade. O objetivo é sempre facilitar a troca de contadores pois constituem um dos componentes críticos para a alteração da especificação da potência do equipamento, caso desejado. O circuito projetado está incluso no Apêndice B.

Uma alternativa para melhoria da topologia de alimentação do ponto de vista funcional seria a utilização de fontes chaveadas utilizando a topologia *flyback*, onde cada tensão de saída seria isolada por meio de cada conjunto de enrolamentos no secundário do transformador *flyback*. Porém, seria necessário projetar e especificar o transformador com a quantidade certa de enrolamentos para tornar esta topologia possível, tornando a alternativa mais complicada do ponto de vista comercial, pois dependeria de um fornecedor exclusivo para a fabricação do transformador, podendo aumentar o custo de produção.

Para alimentação do circuito que envolve o microcontrolador CC3220S, o medidor PZEM004T e o conversor de nível lógico, é utilizada uma fonte chaveada de 5V, comum em carregadores de celular. Esta fonte está isolada galvanicamente das outras fontes, para garantir o isolamento total entre o circuito de baixa tensão utilizado para lógica de comando e medição de potência e o circuito de tensão mais alta utilizado para comunicação com o carro e condicionamento do sinal analógico da função-piloto. Como o kit de desenvolvimento CC3220S-LAUNCHXL já contém um regulador interno de 3,3V, a fonte de 5V é suficiente para garantir toda alimentação da baixa tensão.

3.1.4 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DO SINAL DA FUNÇÃO-PILOTO DE CONTROLE

Para realizar a detecção dos diferentes estados possíveis do sinal da função-piloto de controle, optou-se por utilizar um circuito de condicionamento deste sinal, uma vez que o protocolo é todo analógico, onde os diferentes estados da carga são detectados através das variações de níveis de tensão. Este circuito, incluso no Apêndice A, condiciona tanto o sinal de PWM enviado pelo microcontrolador CC3220S para os níveis de tensão adequados, quanto realiza a detecção dos diferentes estados, enviando sinais de resposta.

De modo a garantir a faixa de +12V até -12V do sinal de PWM, conforme especificado pela norma IEC 61851-1, foi escolhido o amplificador operacional OPA171, da Texas Instruments, que possui saída *rail-to-rail*, ou seja, a saída do amplificador é saturada em níveis de tensão praticamente iguais aos níveis de tensão da fonte de alimentação simétrica. Este amplificador aceita tensões simétricas de até +18V e -18V. Além disso, possui um *slew rate* de $1,5V/\mu s$, suficiente para garantir o ciclo de trabalho alvo de acordo com a corrente configurada pelo usuário, considerando a frequência de operação do sinal da função-piloto de 1 kHz e a variação pico a pico máxima de 21V, uma vez que o PWM só precisa ser ativado quando passa para o estado B, onde oscila de -12V até 9V.

Neste circuito, o OPA171 opera como comparador. O sinal de PWM enviado pelo microcontrolador é transferido para a entrada não-inversora através de um optoacoplador, de

modo a isolar os pontos de referência do microcontrolador e do OPA171, pois o ponto de referência do circuito de condicionamento, onde o OPA171 está presente, deve ser aterrado. Desta forma, a parte digital do circuito fica completamente isolada da parte de condicionamento do sinal analógico. O resistor de base do optoacoplador se faz necessário para manter a polarização e garantir na saída um sinal com uma relação de ciclo de trabalho bem próxima à original gerada pela saída utilizada como PWM do microcontrolador CC3220S. Na entrada inversora do OPA171, há um divisor resistivo que resulta em uma tensão de referência de aproximadamente 6V. Assim, quando o PWM na entrada não-inversora tem um nível de tensão maior que o da entrada inversora, o amplificador satura com um nível próximo ao da fonte de alimentação positiva, em +12V, e quando tem um nível menor, satura com um nível bem próximo ao nível da fonte de alimentação negativa, em -12V. Assim, o PWM passa a variar entre os níveis desejados de +12V e -12V. Na saída do comparador, há uma resistência próxima ao valor de $1k\Omega$, conforme especificado pela norma, porém com um valor mais baixo para compensar a queda de tensão do OPA171 na saturação positiva.

Este circuito gera três sinais de resposta que são enviados para o microcontrolador CC3220S, que permitem identificar diretamente as seguintes situações: “veículo conectado”, “veículo pronto para carga” e “presença do diodo”. Além dessas situações, é possível identificar indiretamente um curto-circuito entre o fio-piloto e o terra. De modo a captar as mudanças de estado para geração destes sinais, é necessário que o sinal da função-piloto seja analisado sem interferir nos valores de resistência de saída do comparador. Para respeitar esta condição, utiliza-se uma pequena rede com valores de resistência elevados, apresentada na Figura 11, que também serve para normalizar o sinal analisado, cuja variação na saída da rede passa a ser de +12V a -12V para 9V a 0V. Esta é uma solução simples e bem eficaz para facilitar a interpretação da oscilação do sinal, embora ainda existam valores negativos de tensão no sinal. Para cada situação a ser identificada, utiliza-se um comparador. Como nesta etapa as tensões variam dentro de uma faixa que não está próxima ao limite da fonte positiva de +12V, há várias possibilidades de escolha para especificar o amplificador. O circuito integrado TL084A foi escolhido para esta etapa, por conter quatro amplificadores operacionais com entradas JFET, de alta impedância, além de aceitar uma alimentação de até +18V e -18V, similar aos limites do OPA171. Porém, neste caso, o VCC- do TL084A é conectado ao GND, ao invés de se utilizar uma fonte simétrica para alimentação. O VCC+ é conectado em +12V. Assim, cada amplificador interno pode ser utilizado como comparador pois estão de acordo com o nível de tensão da saída da malha resistiva. Na saída de cada comparador está acoplado um detector de pulsos formado por um diodo e um capacitor. Assim, ao invés de apenas utilizar um filtro RC e manter um sinal proporcional ao ciclo de trabalho, o sinal se mantém em um nível alto caso a saída do comparador seja pulsada, tornando-se independente do ciclo de trabalho. Este detalhe facilita a detecção, pois o PWM mínimo seria de 5% conforme especificação da norma. Para repassar estes sinais ao microcontrolador, utiliza-se um optoacoplador para cada, isolando o circuito do microcontrolador.

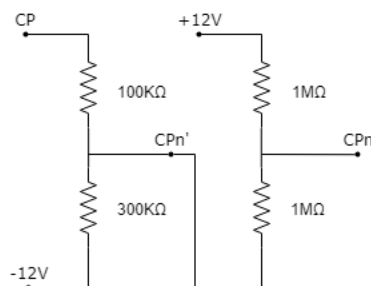


Figura 11 – Rede resistiva para normalização do nível de tensão do sinal da função-piloto de controle

Como o objetivo deste circuito é identificar três situações, os valores de comparação adequados para cada uma delas foi obtido através da análise do valor de saída da rede de normalização, no ponto “CPn”, correspondente ao nível de tensão do protocolo durante a situação a ser identificada, no ponto “CP”.

A primeira situação é a de “veículo conectado”. Como o nível de tensão do sinal cai de +12V para +9V e a norma IEC61851-1 especifica uma tolerância de +1V a -1V, sempre que o sinal estiver com valor máximo abaixo de 10V já é possível considerar que há um veículo conectado. Para manter uma pequena margem de segurança, o valor considerado é de 10,5V. Neste caso, se há um nível de 10,5V no ponto “CP” da rede, que está conectado diretamente ao fio-piloto, no ponto “CPn” que é a saída da rede, o nível de tensão está em 8,425V. Este é o valor utilizado como referência para um dos comparadores presentes no circuito integrado TL084A, responsável pela identificação da situação “veículo conectado”.

A segunda situação é a de “veículo pronto para carga”. Após o momento em que o ciclo de trabalho do PWM é configurado, o veículo inicia a identificação e deverá fazer a carga utilizando uma corrente correspondente, conforme especificado pela norma. No instante em que interpreta o valor de corrente desejado para carga através do ciclo de trabalho, o nível de tensão máximo do sinal da função-piloto é alterado para +6V, podendo variar entre +5V e +7V. Isto significa que quando o valor máximo do sinal da função-piloto é +7V, o veículo está pronto para carga e o SAVE já pode fechar o contator. Da mesma forma como projetado no caso anterior, para garantir uma margem de segurança, o valor considerado é de 7,5V. Se há 7,5V no ponto “CP” da rede, significa que o ponto “CPn” estará com um nível de tensão de aproximadamente 7,3V. Este é o valor utilizado como referência para o outro comparador presente no TL084A, responsável pela identificação da situação “veículo pronto para carga”.

A terceira situação consiste na detecção da presença do diodo, que deve estar contido no veículo. Este diodo faz com o que o sinal da função-piloto oscile mantendo seu nível mínimo sempre em -12V. Caso não houvesse o diodo, o PWM oscilaria com o valor mínimo correspondendo ao negativo do valor máximo. Esta diferença no nível de tensão negativa permite a detecção do diodo, e assim, caso necessário, a estação de carga pode agir adequadamente para interromper o processo de carga. Conforme especificado pela norma, a função do diodo é basicamente garantir que o elemento que está conectado ao circuito da estação de carga é um

veículo, e não outro elemento qualquer que contenha impedância de mesmo valor que a de um veículo, pois neste caso a estação de carga poderia fazer uma interpretação incorreta e ativar o contator, liberando a energia da rede no momento errado. A ideia utilizada para detecção está baseada nas duas situações anteriores. O diodo pode ser detectado sempre que há um veículo conectado e após o instante em que o microcontrolador ativa um PWM com ciclo de trabalho diferente de 0% ou 100%. O diodo estará presente se o sinal tiver valor mínimo de -12V, e não -9V, que seria o caso da falta de diodo. Nestas condições, pode-se utilizar o nível de -10,5V no ponto "CP" como referência para comparação. Isto equivale a utilizar o valor de 0,5625V no ponto "CPn" como referência para o terceiro comparador do TL084A, responsável pela identificação da situação "presença de diodo".

Com estes três sinais, também é possível inferir a situação de curto-circuito no fio-piloto com o terra. Neste caso, é interessante garantir um retorno de informação ao usuário, pois não haverá comunicação com o carro e o sistema ficará estagnado. Para detectar esta situação, basta verificar se os sinais de "veículo conectado" e "veículo pronto para carga" são ambos ativados em um intervalo curto de tempo. Caso esta situação ocorra, é um indicativo de que os sinais estão em nível alto apenas por conta do curto-circuito, que fez com que o valor máximo do sinal estivesse abaixo dos limites de comparação das duas situações. Uma vez que em uma situação normal de uso o intervalo entre as detecções dos dois sinais não tem um intervalo tão curto, na ordem de até centenas de milissegundos, infere-se que o fio-piloto está em curto-circuito com o terra.

De modo a facilitar a montagem e garantir o bom funcionamento, o layout do circuito foi feito de modo a reduzir a área útil da placa e garantir dois planos de GND isolados, no qual um deles, que é referência para o sinal de função-piloto, é aterrado, conforme apresentado na Figura 12. Vale salientar que por conta disso, é importante que este circuito esteja bem aterrado, pois os veículos dependem de um bom aterramento para o funcionamento correto do processo de carga. O SAVE deve ter a melhor conexão de GND com terra possível, porém há também a dependência do bom aterramento na instalação elétrica do local.

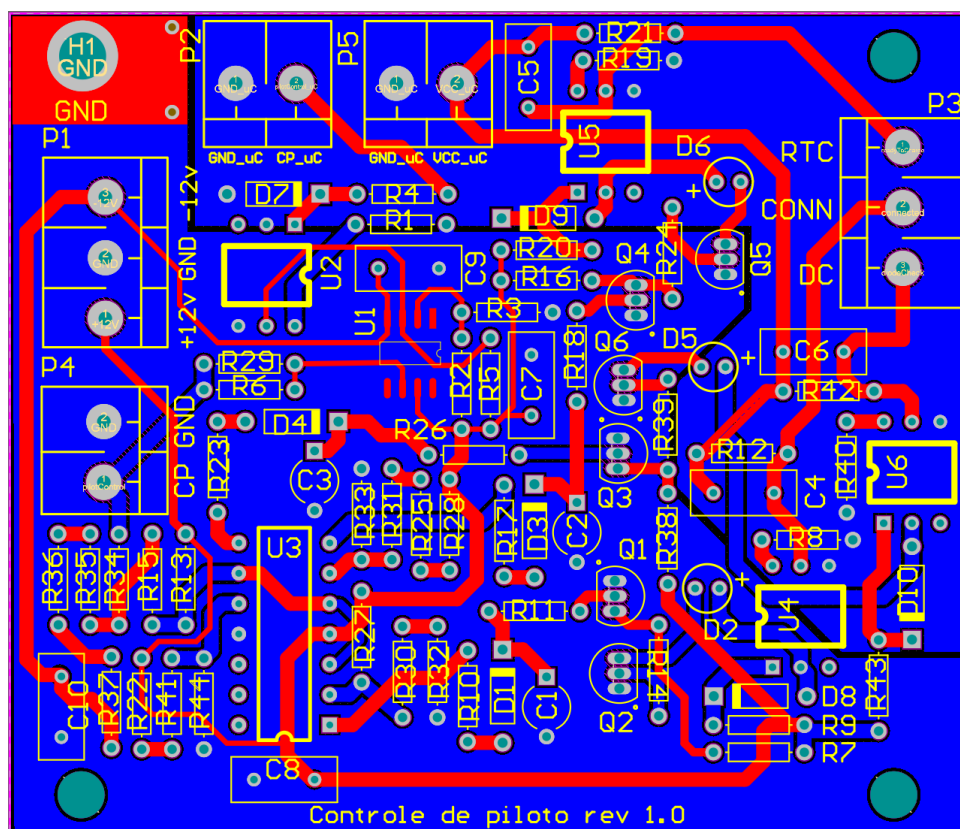


Figura 12 – Layout da placa de condicionamento do sinal da função-piloto de controle e detecção dos estados

Com o layout completo, os arquivos Gerber para fabricação foram gerados através do software Altium, incluindo os arquivos de furação. Foram projetados quatro furos nos cantos da placa para garantir a fixação mecânica, com apenas um deles aterrado, de forma a permitir uma flexibilidade caso não se desejasse aterrar o GND do circuito na chapa metálica, sem depender da utilização de outros elementos para isolamento, como arruelas de borracha.

Visto que o circuito para geração das tensões de alimentação de +12V e -12V utiliza poucos componentes, todos do tipo PTH, por economia de custos optou-se por uma fabricação artesanal. Um layout simplificado para referência de posicionamento dos componentes foi utilizado como base para a furação em uma placa de fenolite com cobre em apenas uma das faces (face simples). Após a furação, o layout foi reforçado e aprimorado com um marcador permanente, e em seguida a placa foi submersa em uma solução de percloroato de ferro durante 15 minutos, para corroer o cobre não protegido pelo marcador. Na sequência, foi realizada a limpeza da placa, com remoção da tinta permanente utilizando esponja de aço e todos os componentes foram soldados.

3.1.5 ACOPLAMENTO À REDE ELÉTRICA

A opção escolhida de ligação à rede para validar o sistema foi a monofásica, com 220V entre neutro e fase, embora o contator utilizado já seja tripolar, facilitando a alteração

da ligação desta estação de carga para utilizar o sistema trifásico, possibilitando uma potência maior a ser entregue ao veículo. Vale observar que caso se deseje transformar o sistema para trifásico, a medição de potência também deve ser alterada, pois atualmente se utiliza a medição para o sistema monofásico apenas. Os cabos utilizados têm bitola de 4mm, suportando correntes de até 20A sem sobreaquecimento.

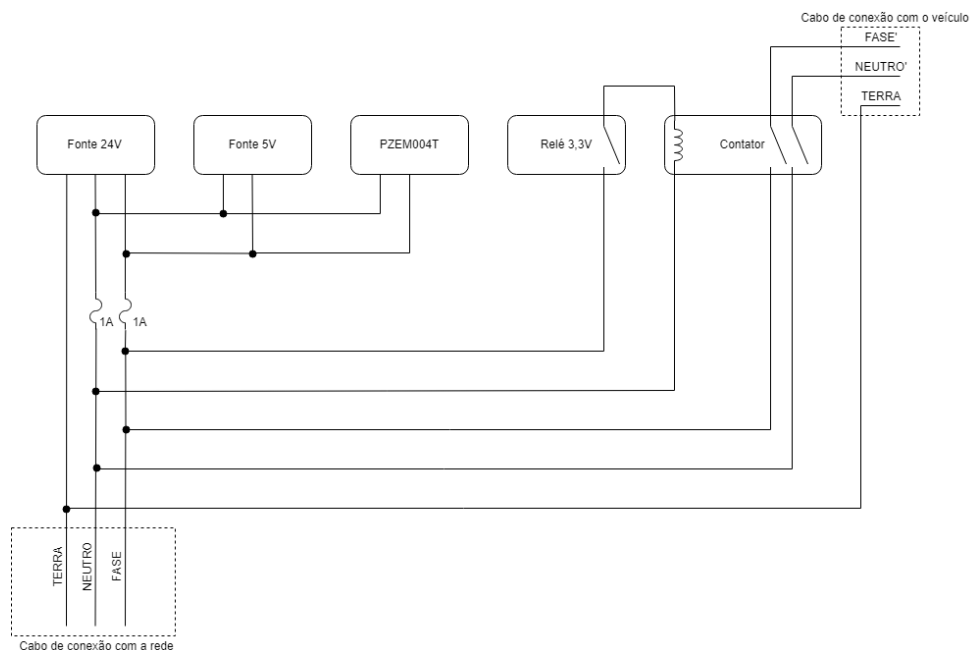


Figura 13 – Diagrama de ligação elétrica das alimentações, relé e contator

O contator utilizado é ativado com uma tensão alternada de 220V em sua bobina. Em série com a bobina do contator, há um pequeno relé cuja bobina é ativada com 3,3V, utilizando diretamente a alimentação do conversor *step-down* de 5V para 3,3V presente na placa de desenvolvimento do microcontrolador, o TPS62162. Este conversor é utilizado em aplicações de alta densidade de potência, pois tem alta frequência de chaveamento (tipicamente de 2,25 MHz) e é capaz de fornecer até 1A para tensões de saída de até 6V, suprindo a corrente necessária para consumo da bobina do relé, que é em média de 15 a 20 mA, assim como para o restante do circuito da placa de desenvolvimento.

A Figura 13 apresenta as conexões feitas no acoplamento à rede elétrica, incluindo as conexões da rede nas entradas das fontes de 24V e 5V, no medidor PZEM004T, no relé e no contator.

3.1.6 DETALHES DA MONTAGEM MECÂNICA

Sobre a montagem do equipamento, as placas de cada módulo do circuito estão dispostas de forma a separar os conjuntos de placas em duas regiões principais, com os cabos de potência concentrados na região inferior, onde está o contator; e ligeiramente afastados do microcontrolador, montado na parte superior do equipamento. Com o objetivo de organizar

a montagem, foi utilizada uma barra de distribuição localizada também na parte inferior do equipamento para facilitar a distribuição dos cabos de alimentação para as diversas fontes. Foram colocados dois prensa-cabos na parte inferior da caixa, no qual o da direita serve de passagem para o cabo que liga o SAVE na rede e o da esquerda serve de passagem para o cabo que vai servir de alimentação e controle para o veículo. A Figura 14 apresenta o SAVE montado.

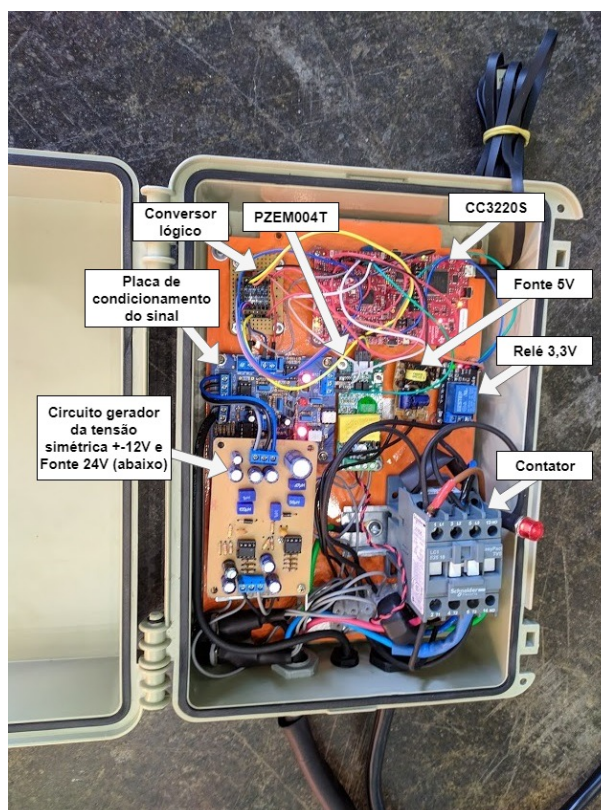


Figura 14 – Foto detalhada do SAVE montado

Vale ressaltar que a placa metálica para montagem do conjunto foi utilizada como base para aterramento das fontes de 24V, +12V e -12V, além do circuito de condicionamento do sinal da função-piloto de controle.

3.2 ESTRUTURA DE SOFTWARE DO SISTEMA

Todo o desenvolvimento de software do sistema foi realizado na linguagem C, a partir da IDE *IAR Embedded Workbench*. Para o uso adequado com a MCU escolhida, utiliza-se o SDK *SimpleLink™ CC32xx SDK 2.30.00.05*. Essa coleção, criada e disponibilizada gratuitamente pela própria *Texas Instruments*, fornece todos os *device drivers*, bibliotecas e a *toolchain* necessária para compilar os arquivos binários. Além disso, o SDK também disponibiliza uma série de exemplos de projetos utilizando as principais funcionalidades do microcontrolador. A partir disso, a estrutura de software deste projeto baseia-se no exemplo *MQTT Client*, para *FreeRTOS*.

Este exemplo é criado para demonstrar uma aplicação cliente MQTT e é capaz de realizar uma conexão com uma rede *Wi-Fi* e também com um *broker* MQTT, fazendo a subscrição aos tópicos adequados. Após realizadas as conexões, é possível controlar os LEDs do microcontrolador através da publicação em tópicos específicos do broker. Além disso, a aplicação roda a partir de uma camada POSIX atuando sobre o sistema operacional de tempo real FreeRTOS. Desta forma, o exemplo traz uma base muito útil para o que deseja-se implementar no SAVE, fornecendo uma aplicação de demonstração funcional para o uso do MQTT, e por isso foi escolhido como referência principal.

Nas próximas subseções, são apresentados todos os detalhes referentes à arquitetura de software utilizada.

3.2.1 ESTRUTURAÇÃO DO SISTEMA OPERACIONAL DE TEMPO REAL

Um sistema operacional de tempo real (RTOS) é um sistema operacional capaz de dar suporte à execução de suas tarefas dentro de um determinado intervalo de tempo, garantindo um processamento determinístico, como citado na Seção 2.2. Como o desenvolvimento em questão exige o controle em paralelo de diferentes tarefas que devem ter seus intervalos de execução bem definidos, o uso de um RTOS é extremamente adequado. Assim, a partir dessas necessidades, optou-se pelo uso do FreeRTOS, também já descrito na Seção 2.2.1. Como o *SimpleLink SDK*, fornecido pela *Texas Instruments*, suporta diferentes sistemas operacionais, utiliza-se uma camada POSIX para o interfaceamento entre a aplicação de usuário e o FreeRTOS, neste caso. O POSIX (*Portable Operating System Interface*) é uma API padrão da IEEE para compatibilidade de sistemas operacionais. Dessa forma, comandos POSIX podem ser chamados independentemente do RTOS rodando em um nível inferior, tendo o papel de uma camada de abstração de SO.

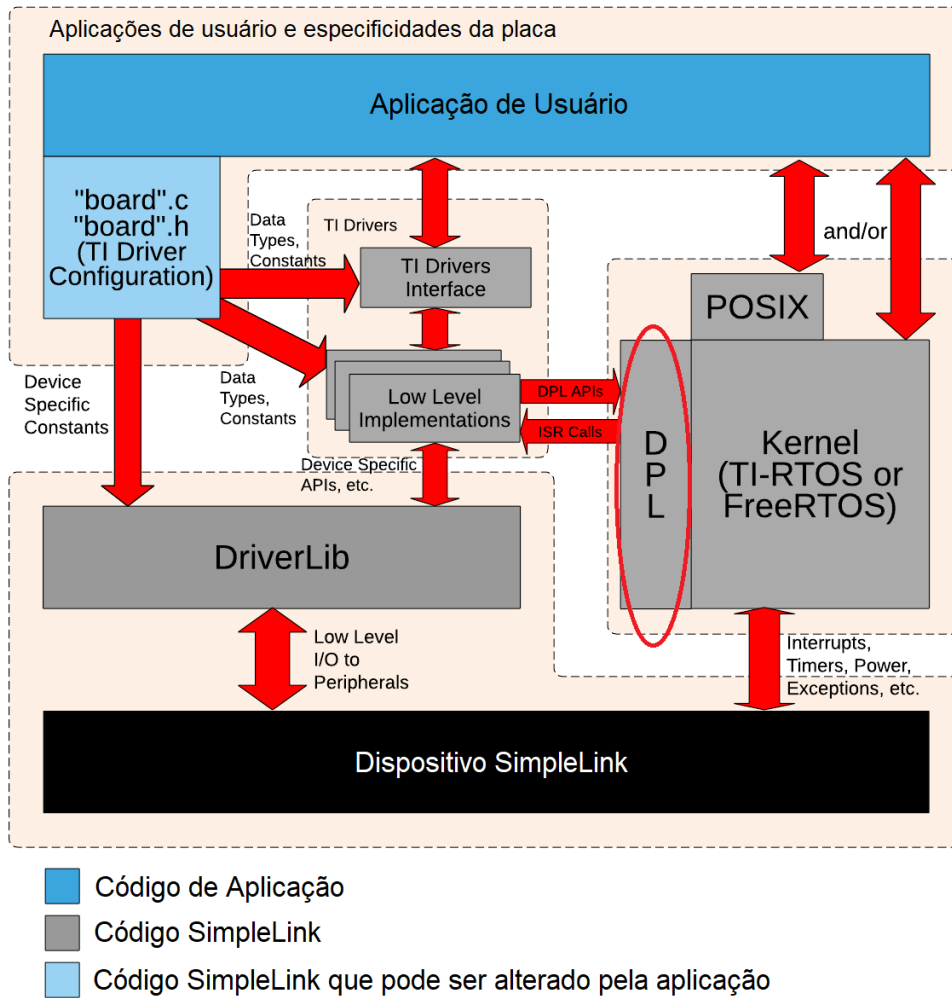


Figura 15 – Interação das camadas de software do sistema

Fonte: Adaptado de Texas Instruments

A Figura 15 apresenta a interação entre a API POSIX e o FreeRTOS na arquitetura do sistema. Nota-se que a aplicação de usuário pode comunicar-se tanto com a camada POSIX quanto com o núcleo do FreeRTOS. No desenvolvimento em questão, utiliza-se somente o primeiro caso. Além disso, a aplicação de usuário também pode fazer chamadas ao conjunto de *TI Drivers*, que são os *device drivers* fornecidos pelo SDK para acesso de periféricos tais como GPIO, PWM e UART. Estes são escritos para serem integrados com o RTOS através da camada de portabilidade de *driver* (DPL). A biblioteca dos *TI Drivers* também inclui os chamados *SimpleLink Drivers*. Estes disponibilizam comandos específicos para o acesso às camadas de rede do sistema, além da estrutura de armazenamento de arquivos (*FileSystem*) do dispositivo. Já o mapeamento genérico de endereços de acesso aos periféricos é feito pelos arquivos "*board.c*" e "*board.h*", sendo que estes fazem o interfaceamento para o mapeamento específico dos periféricos do módulo utilizado, que consta nos arquivos "*CC3220S_LAUNCHXL.c*" e "*CC3220S_LAUNCHXL.h*". Em uma camada ainda mais inferior, a biblioteca de *drivers* "*DriverLib*" possui as APIs específicas de cada dispositivo *SimpleLink*, no

caso o microcontrolador.

A aplicação de usuário organiza-se em três grandes módulos: o de comunicação através do cliente MQTT, o de controle do circuito da função-piloto, e o de medição de potência. Os três são controlados por tarefas rodando em paralelo no sistema operacional, durante todo o ciclo de operação do SAVE. A comunicação entre essas tarefas é realizada unicamente através de filas de mensagem (*message queue*) do sistema operacional. Na Figura 16, são indicadas as principais tarefas do sistema operacional e qual a hierarquia de criação entre elas.

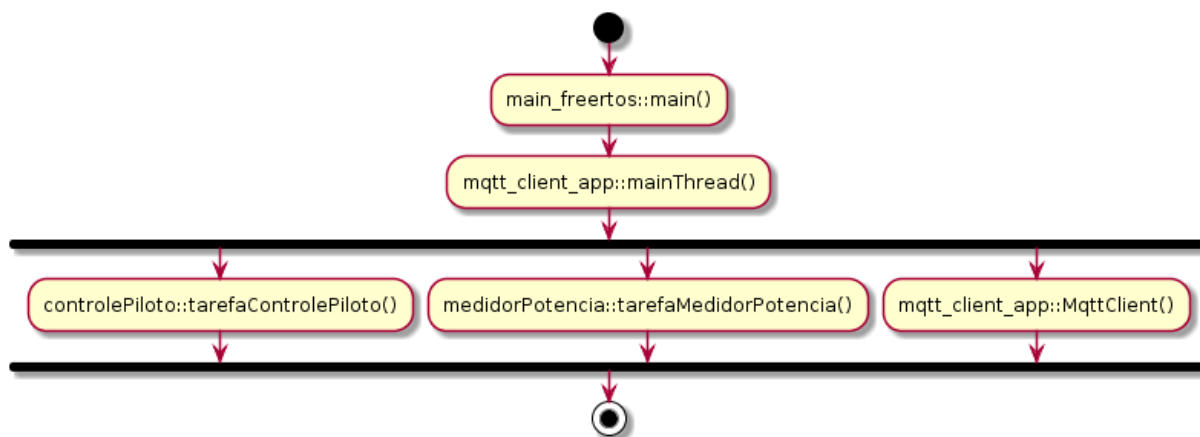


Figura 16 – Divisão de tarefas no sistema operacional

O ponto inicial do sistema é a função *main()* dentro do arquivo *main_freertos.c*. Esta é responsável por iniciar módulos da placa, criar a tarefa *mainThread()*, além de configurar e iniciar o escalonador do sistema operacional. A partir disso, tem-se a instância da tarefa principal do cliente MQTT ativa. Essa instância tem a responsabilidade de iniciar os *device drivers* de todos os periféricos, criar todas as estruturas do sistema (tais como filas de mensagens e atributos de *threads*), e começar as tarefas da aplicação em si, de acordo com o que é mostrado na figura anterior. Por fim, a tarefa entra em um loop onde realiza a conexão TCP/IP à rede internet via Wi-Fi (através da API *SimpleLink*), inicia o serviço de cliente, e indica ao sistema que o SAVE está devidamente conectada à rede, através da variável global *evseConectado*. Caso haja uma desconexão com o broker por qualquer motivo, a aplicação é resetada, encerrando o cliente e voltando ao início do loop novamente. A Figura 17 representa o diagrama de atividades descrito para esta tarefa.

O Apêndice C apresenta com mais detalhes a arquitetura de software de todo o sistema, indicando as principais funções de cada arquivo e como estas se comunicam entre si e com os *device drivers*. O funcionamento de cada um dos módulos principais já descritos é comentado com mais detalhes nas seguintes subseções.

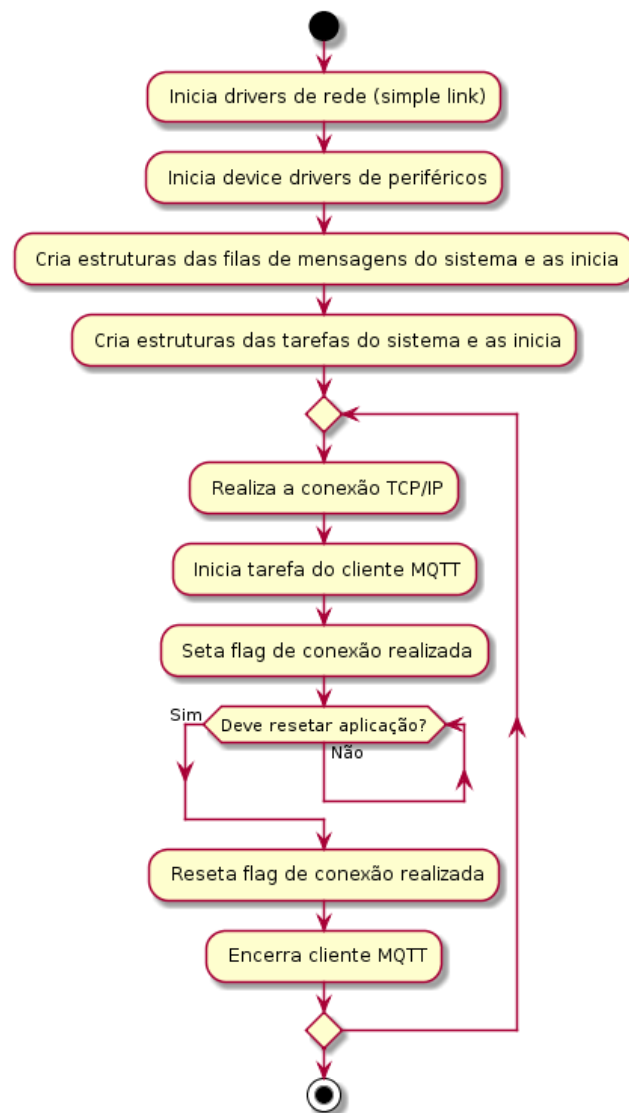


Figura 17 – Diagrama de atividades da tarefa *mainThread()*

A API *SimpleLink* também possui funções próprias para o gerenciamento do *File System* (sistema de arquivos), permitindo que dados sejam facilmente escritos e lidos em um conjunto específico de arquivos na memória flash da MCU. Nesse desenvolvimento, utilizam-se essas funções para armazenar dados do usuário pertinentes à conexão com a rede Wi-Fi, como SSID e senha.

3.2.2 MÓDULO MQTT

O núcleo do funcionamento do módulo MQTT, responsável por realizar a comunicação com o *broker* de fato, ocorre dentro da tarefa *MqttClient*, implementada no arquivo *mqtt_client_app.c*, apresentada como uma das tarefas principais da aplicação de usuário na Figura 16. O diagrama de atividades dessa tarefa é apresentado na Figura 18.

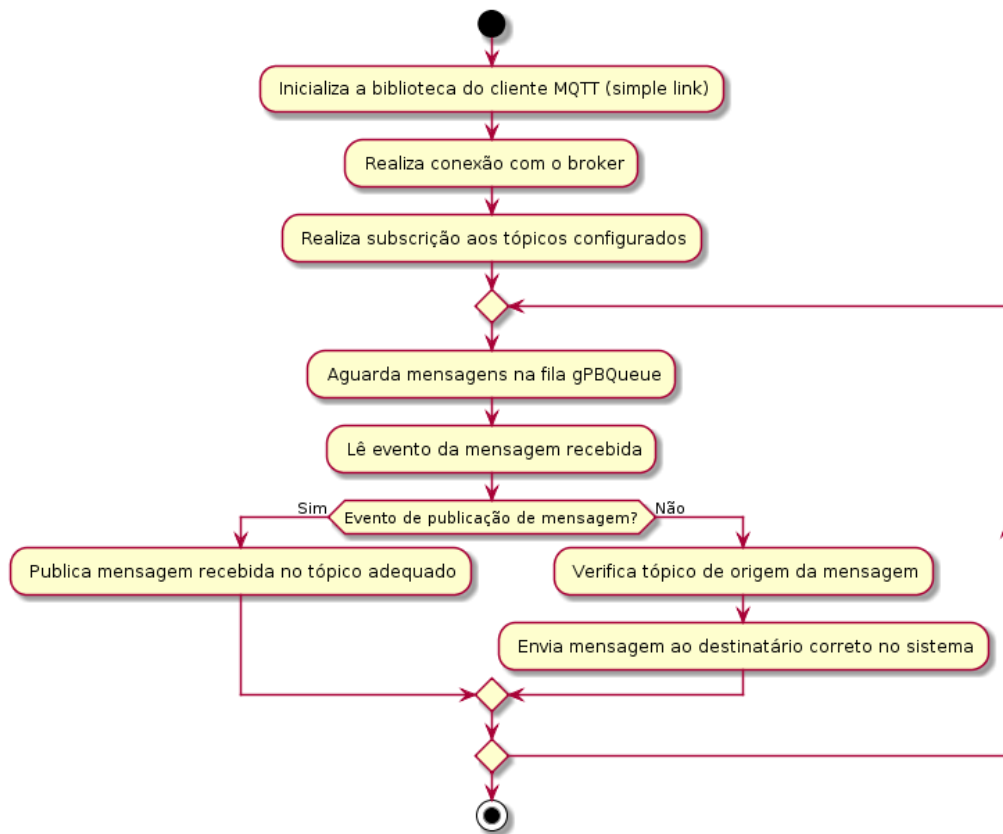


Figura 18 – Diagrama de atividades da tarefa *MqttClient()*

Percebe-se que, antes de entrar no laço principal, a tarefa tem a responsabilidade de iniciar os componentes da API *SimpleLink* relativos ao cliente, e logo após conectar-se ao *broker* MQTT, a partir dos parâmetros pré-configurados. Dessa forma, a tarefa aguarda, através de uma função bloqueante de leitura da fila *qPBQueue* (ver Apêndice C), o recebimento de alguma mensagem pelo sistema. Essa mensagem possui três aspectos: o evento que a originou, o tópico a qual ela corresponde, e os dados propriamente ditos (*payload*). Essa estrutura pode chegar à tarefa em questão de duas formas distintas. A primeira é quando alguma das outras tarefas rodando em paralelo no sistema solicita a publicação de alguma informação em um tópico específico do *broker*. A partir dos tópicos configurados, existem somente dois onde pode ser publicada a informação, indicados na Tabela 5.

Tabela 5 – Tópicos nos quais o cliente publica.

Índice	Tópico
0	/evse/estadoPiloto
1	/evse/potenciaMedida

No tópico 0, */evse/estadoPiloto*, são publicadas informações referentes à comunicação com o veículo a partir da função-piloto. Cada vez em que ocorre uma alteração no estado

do veículo, a informação atualizada é publicada. Cada estado corresponde a um número, de acordo com a enumeração apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores numéricos dos estados da função-piloto.

Valor	Estado	Significado
0	A	Veículo não conectado
1	B	Veículo conectado
2	C	Veículo pronto para recarga
3	D	Veículo pronto para recarga na zona de ventilação
4	E	Problema na rede pública, fio-piloto em curto
5	F	não disponível

Já no tópico 1, */evse/potenciaMedida*, são publicados os valores de potência instantânea medida pelo PZEM004T, em watts, a cada vez que ocorra uma nova leitura.

A outra forma pela qual uma mensagem é enviada à fila *qPBQueue*, causando uma execução do laço da tarefa *MqttClient()*, é quando o sistema verifica o recebimento de uma mensagem em algum dos tópicos do qual é assinante. No caso, a assinatura é feita somente no tópico */evse/correnteMax*.

No momento em que a mensagem chega ao tópico, o função de *callback MqttClient-Callback()*, presente no arquivo *client_cbs.c* é acionada, realizando o tratamento da mensagem e postando a estrutura correta na fila de mensagens. Esse *callback* também é responsável, entre outras coisas, por reagir à desconexão com *broker*, encerrando o cliente, conforme já comentado na Subseção 3.2.1. Assim, uma mensagem no tópico */evse/correnteMax* diz respeito ao valor máximo da corrente que deve ser fornecida ao veículo elétrico durante seu carregamento, em amperes. O recebimento dessa mensagem também é essencial para o início do carregamento, como será comentado na Seção 3.2.4.

É importante ressaltar que o tópico pode receber qualquer nome, e ser organizado em quantos subtópicos forem necessários, contanto obviamente que esses nomes sejam os mesmos entre o cliente e o *broker*. A partir dessa estrutura de subtópicos, pode ser realizada a identificação de cada dispositivo. Ou seja, para o desenvolvimento da prova em conceito em questão, o SAVE é identificado somente pelo prefixo */evse*. Caso houvesse mais dispositivos clientes conectados ao mesmo *broker*, estes poderiam ser distinguidos a partir de diferentes prefixos, como */evse1* e */evse2*, ou preferencialmente com um número único de série, já pensando em uma linha de produtos.

Como forma de validar o desenvolvimento, utiliza-se o serviço *CloudMQTT* (disponível em www.cloudmqtt.com), um *broker* MQTT online e gratuito. Nele, é possível criar instâncias para vários projetos. A partir de uma instância criada, o próprio site fornece os parâmetros necessários para que seja configurado o software do microcontrolador e realizada a conexão, como o endereço do servidor, usuário, senha e porta de conexão. A partir do site é possível publicar mensagens em qualquer tópico (sem a necessidade de criar o tópico explicitamente)

além de acompanhar todas as mensagens publicadas em qualquer tópico. A versão gratuita do serviço não permite que os parâmetros de conexão sejam alterados, além de permitir somente um número máximo de cinco conexões ativas de clientes. Apesar disso, supre totalmente as necessidades para o desenvolvimento da prova de conceito em questão.

Além disso, também utiliza-se como cliente MQTT o aplicativo *MQTT Dash*, disponível gratuitamente para Android na *Play Store*. Com ele, é possível conectar-se a um *broker* e se inscrever em tópicos para receber ou publicar mensagens. Dessa forma, ele faz o papel de um aplicativo móvel para o controle remoto do SAVE.

3.2.3 MÓDULO DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA

O módulo de medição de potência é implementado pela tarefa *tarefaMedidorPotencia()*, no arquivo *medidorPotencia.c*. A tarefa em si é extremamente simples, sendo que ela somente tem a responsabilidade de configurar o PZEM004T, solicitar uma medição e enviá-la à fila de mensagens para publicação no cliente MQTT. A cada novo laço de medição são aguardados cinco segundos. O PZEM004T, conforme já comentado na Seção 3.1, tem a capacidade de armazenar internamente os valores de potência instantânea e integrá-los no tempo para obter um valor de energia elétrica em kWh. Assim, esse é o valor lido pela tarefa e enviado ao *broker*. A Figura 19 apresenta esta tarefa a partir de seu diagrama de atividades.

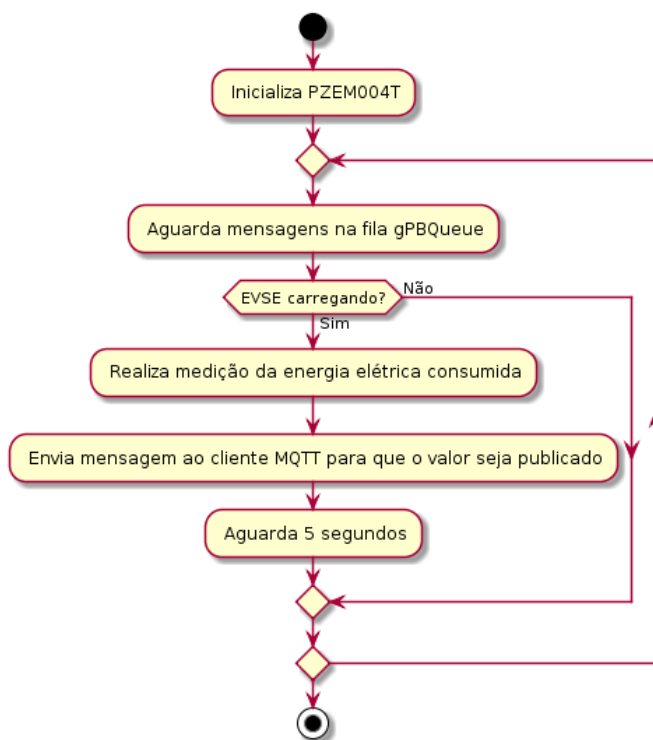


Figura 19 – Diagrama de atividades da tarefa *tarefaMedidorPotencia()*

A parte mais crítica em relação à obtenção de dados do medidor de potência é, de fato, a comunicação com o hardware, realizada via comunicação serial TTL. Assim, também é

desenvolvido um *device driver* específico para o módulo, configurando a UART e implementando seu protocolo de comunicação proprietário. As funções do *device driver* estão presentes no arquivo *PZEM004T.c*, incluindo funções de configuração do periférico da UART, leituras de corrente, tensão, potência instantânea e energia elétrica total, além das funções privadas de envio e leitura de dados na porta serial. O protocolo de comunicação com o dispositivo especifica alguns endereços de comprimento de um byte para realizar a solicitação e recebimento dos dados. Por exemplo, no caso da leitura de energia, a aplicação deve solicitar ao PZEM004T uma leitura com o identificador 0xB2, sendo que a resposta é retornada com identificador 0xA2, seguido dos respectivos dados e um CRC, para detectar e corrigir erros de comunicação.

3.2.4 MÓDULO DE CONTROLE DA FUNÇÃO-PILOTO

O controle do circuito de comunicação com o veículo elétrico, que ocorre através do sinal da função-piloto, é implementado na tarefa do sistema *tarefaControlePiloto()*, no arquivo *controlePiloto.c*. Esse arquivo também implementa outras funções essenciais para o controle do circuito, como a configuração do PWM, comando do relé de carregamento, e leitura de interrupção nos sinais de piloto conectado e pronto para carregar (ver Subseção 3.1.4), ambas com timer de *debounce* de 10 ms.

A Figura 20 apresenta o diagrama de atividades dessa tarefa. Percebe-se que, para que a execução tenha início, é mandatório que o SAVE esteja conectado à rede. Essa verificação ocorre a partir do estado da *flag* global *evseConectado*, setada somente pela tarefa *mainThread*. Com o dispositivo conectado, o circuito é configurado para seu estado de inicialização. Isso inclui: forçar o estado de piloto para o estado A (veículo não conectado) ou para estado B (veículo conectado sem estar pronto para carregar) se o pino de veículo conectado estiver energizado, inicializar PWM com nível DC (ciclo de trabalho de 100%), e desligar o relé de carregamento. Após isso, é sempre enviada uma mensagem ao cliente MQTT para garantir que o estado do circuito no *broker* seja atualizado.

Após essas etapas de inicialização, a tarefa executa seu laço principal. Ele é iniciado com uma função bloqueante de leitura da fila de mensagens *gTarefaPilotoMQRecebe*. Essas mensagens podem chegar via cliente MQTT, quando recebe-se alguma informação no tópico */correnteMax*, ou via as próprias interrupções do circuito, quando detecta-se que o veículo alterou seu estado para conectado ou pronto para carregar. Assim, no primeiro caso, onde houve a mudança do valor de corrente, somente há a alteração do valor de ciclo de trabalho do PWM caso o veículo não esteja sendo carregado, por questões de segurança. No segundo caso, quando o veículo informa a troca de estado, e feita inicialmente uma verificação se o estado atual é diferente do anterior e, em caso positivo, a atualização é publicada ao *broker*. Logo, é realizada uma tratativa diferente para cada estado. Para a transição ao estado A, quando identifica-se que o veículo não está mais conectado ao SAVE, desliga-se o relé de carregamento e retorna-se o sinal PWM para modo DC. Já para o estado B, que representa o veículo conectado mas sem estar pronto para ser carregado, inicia-se o PWM com o ciclo de

trabalho configurado caso o veículo tenha acabado de ser conectado ou somente desaciona-se o relé de carregamento caso o sistema venha de uma situação de carregamento. Quando o SAVE entra no estado C, é feito o acionamento do relé, conectando o carro à rede e iniciando de fato o processo de carga. Os estados D, E, e F atualmente não são tratados pelo software.

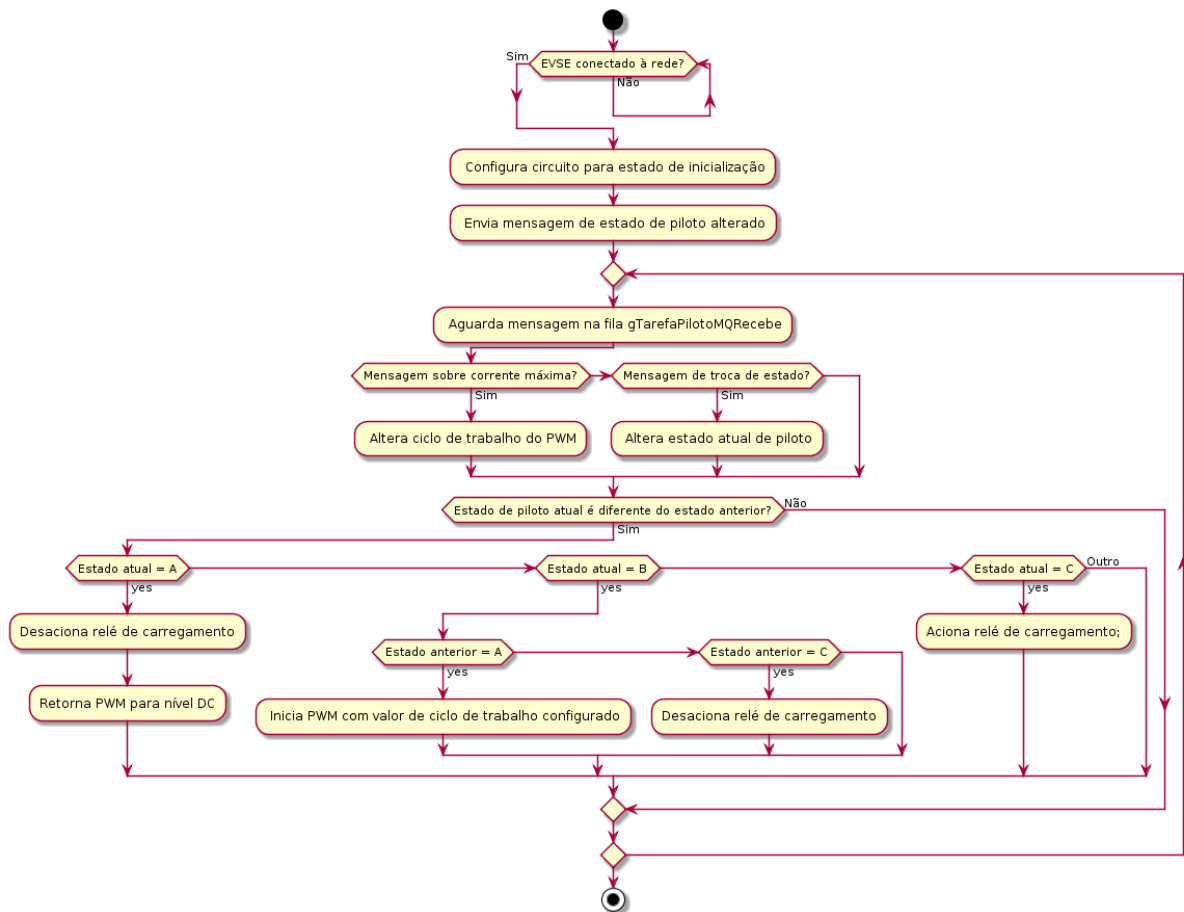


Figura 20 – Diagrama de atividades da tarefa *tarefaControlePiloto()*

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta uma primeira análise e discussão dos resultados do desenvolvimento do SAVE apresentado no Capítulo 3. Na Seção 4.1 apresentam-se os custos da confecção da prova de conceito, discutindo sua viabilidade econômica. A Seção 4.2 e Seção 4.3 apresentam e discutem os resultados obtidos a partir de testes práticos realizados com o SAVE. Na primeira, apresentam-se os testes feitos em bancada, enquanto a segunda apresenta os resultados obtidos com um veículo elétrico.

4.1 CUSTOS DE DESENVOLVIMENTO

A Tabela 7 apresenta os custos dos principais componentes utilizados na confecção do SAVE. A partir desses valores, calcula-se que o custo total gira em torno de R\$ 1560,00.

Tabela 7 – Custos do desenvolvimento do SAVE

Componente	Custo
Caixa Hermética 30x20x12cm	R\$ 90,00
Cabo 3 vias 4mm de 6m	R\$ 40,00
Cabo 5 vias 4mm de 6m	R\$ 90,00
Plugue Fêmea Tipo 2 IEC 62196-2 16A	R\$ 500,00
Disjuntor 20A DT3-E2C20	R\$ 30,00
Contator LC1E25	R\$ 80,00
Kit CC3220S-LAUNCHXL	R\$ 200,00
Módulo PZEM-004T	R\$ 110,00
Conversor Lógico 3.3-5V	R\$ 10,00
PCB do circuito de condicionamento do sinal da função-piloto	R\$ 300,00
Relé 3.3V	R\$ 10,00
Fonte de 24V	R\$ 40,00
Fonte de 5V	R\$ 20,00
Componentes eletrônicos	R\$ 40,00
Total	R\$ 1560,00

Uma análise de viabilidade rápida indica que somente o preço de desenvolvimento da prova de conceito já pode indicar que o produto pode ser viável. Isso se deve ao fato de estarem disponíveis no mercado produtos de especificação similar custando em torno de R\$ 3900,00, como é o caso do EVlink, produzido pela Schneider Electric. Se o SAVE aqui apresentado se tornasse um produto e fosse comercializado a esse preço, a margem de lucro ainda seria significativa, mesmo considerando demais gastos com produção que seriam diluídos de acordo com a quantidade de equipamentos produzidos.

Além disso, deve-se levar em conta que alguns desses componentes apresentados poderiam ser adquiridos por preços menores se fossem comprados em larga escala e de

distribuidores brasileiros. No caso do plugue fêmea utilizado na conexão com o VE, por exemplo, o custo original de um distribuidor chinês é cerca de \$ 90. A conversão de dólares para reais, somado com os altos custos de frete e impostos, resulta em um custo de R\$ 500,00. Outro componente que teve de ser importado foi o kit de desenvolvimento CC3220S-LAUNCHXL, comprado no próprio site da *Texas Instruments*, com o valor de \$40,00. O custo de produção das placas de circuito impresso também pode ser facilmente diluído com o aumento da quantidade de placas fabricadas, pois o custo inicial para fabricação de uma PCI é alto por conta do custo fixo da litografia. O custo apresentado de R\$300,00 diz respeito à fabricação do lote mínimo de seis unidades, mas somente uma foi utilizada.

Da mesma forma, deve-se considerar que ainda existem elementos que poderiam ser incluídos no SAVE para que ele viesse a ser um produto, aumentando alguns custos apresentados na Tabela 7. Incluindo também o tempo de desenvolvimento adicional, pode-se estimar de forma otimista que o custo de produção do produto final estaria na faixa de R\$ 1000 a R\$ 1500, o que é um indicativo de que o SAVE produzido tem uma boa viabilidade econômica. Também é importante ressaltar que esse custo calculado tem a função de apenas balizar os valores no mercado a partir dos custos de peças, já que existem muitos outros fatores de custos que incidem sobre o produto final e ainda não é possível mensurá-los durante esta etapa inicial de prova de conceito.

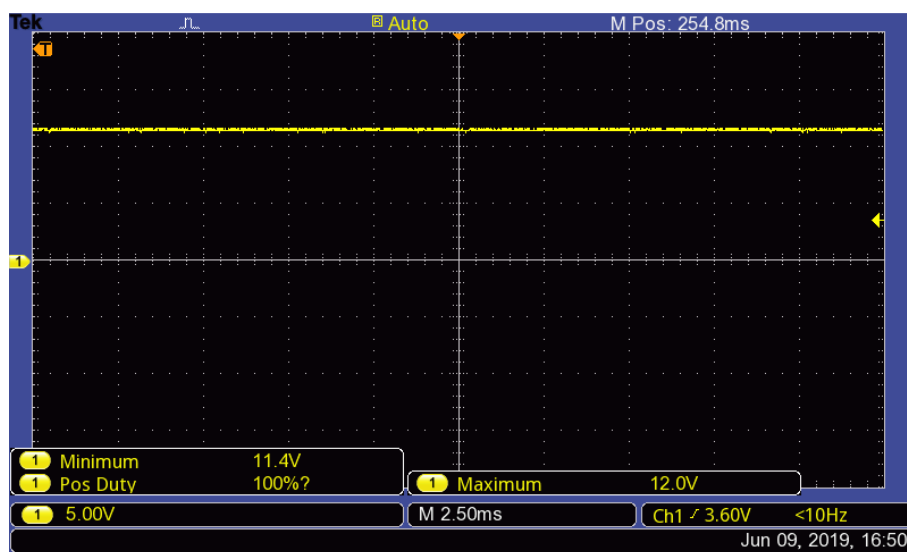
4.2 TESTES EM BANCADA

Os primeiros testes com o SAVE funcional foram feitos em bancada, com um circuito auxiliar simulando os sinais do VE. Este circuito é constituído basicamente por resistores e duas chaves, simulando o circuito do veículo apresentado na Figura 3, da página 27. Assim, a primeira chave representa o veículo sendo conectado, adicionando uma resistência de 2,7 k Ω em paralelo ao sinal de piloto. A segunda chave representa o veículo comunicando estar pronto para a carga, e fecha uma resistência de 1,3 k Ω em paralelo ao sinal.

Para simular o consumo de potência, foram utilizados dois aquecedores de 127V e 1500W ligados em série, para possibilitar a conexão à rede de 220V sem danificá-los. Da mesma forma que o VE, esses aquecedores são conectados à rede de 220V somente quando a recarga deve ser iniciada, ou seja, no instante em que o contator é fechado. Devido aos valores nominais de cada aquecedor, calcula-se que a resistência interna de cada um é de cerca de 10,75 Ω . Logo, os dois em série possuem resistência de 21,5 Ω . Assim, sob uma tensão de 220VAC espera-se que ambos vão consumir uma potência em torno de 2250 W.

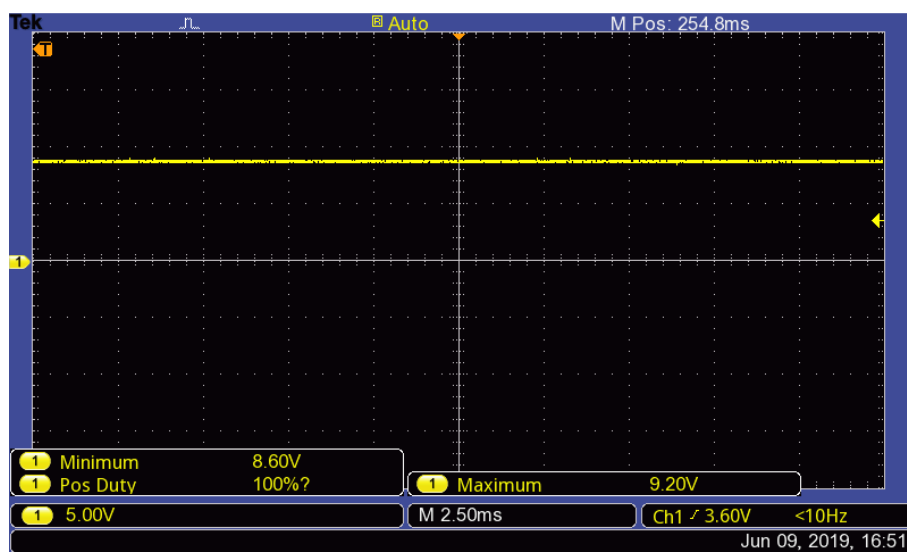
As figuras a seguir representam os sinais da função-piloto de controle medidos com um osciloscópio em cada caso. Nota-se que os resultados estão de acordo com os valores requeridos pela norma IEC 61851, e que podem ser vistos no diagrama da Figura 4, da página 29. A Figura 21 mostra a medição de quando o veículo ainda não foi conectado, possuindo uma tensão contínua de 12V no fio-piloto. A Figura 22 mostra a tensão contínua de 9V logo após o veículo ser conectado. Nesse momento, o usuário deve definir a corrente máxima, enviando

o valor como mensagem no tópico adequado do *broker* MQTT. A Figura 23 apresenta a medição correspondente para uma corrente de 16A, um sinal PWM de 1kHz com ciclo de trabalho de 26,5% (de acordo com a Tabela 4 da página 29). Quando simula-se o veículo pronto para a carga, a tensão do ciclo positivo cai para cerca de 6V, como mostrado na Figura 24. Nesse momento, o SAVE corretamente fecha o contator. Além disso, as figuras 25 e 26 também apresentam as medições dos casos de veículo nos estados de “pronto para carregar” e “conectado”, respectivamente, mas para uma corrente máxima de 32A, com ciclo de trabalho de 52,5%.



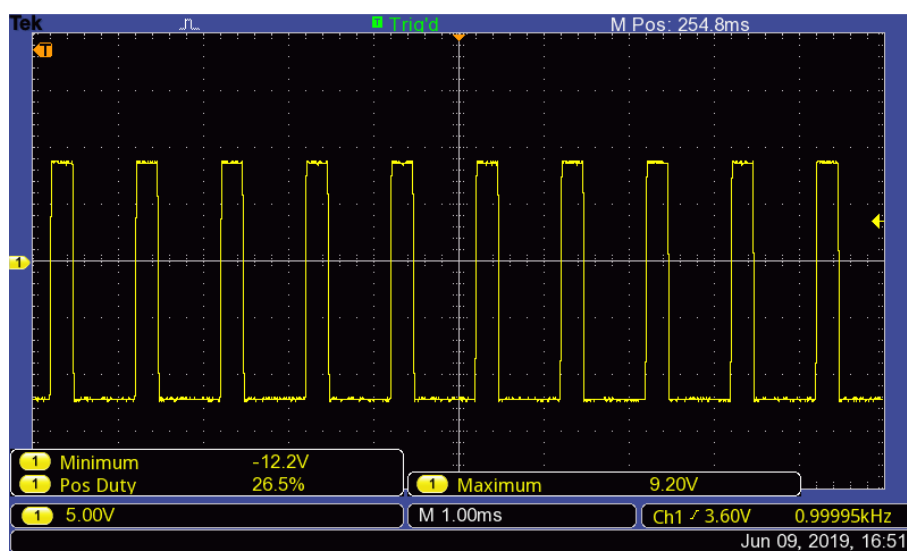
TBS 1052B - 4:51:14 PM 6/9/2019

Figura 21 – Sinal da função-piloto de controle com veículo desconectado



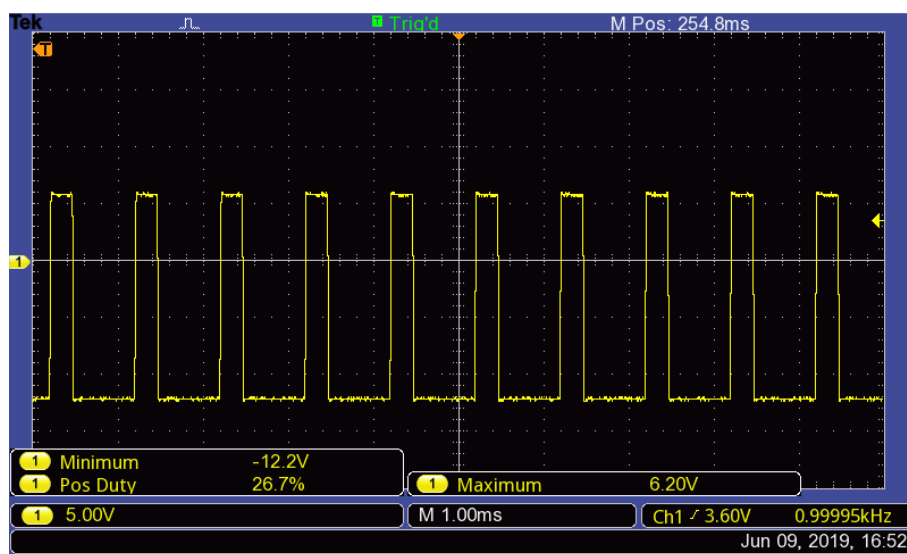
TBS 1052B - 4:51:49 PM 6/9/2019

Figura 22 – Sinal da função-piloto de controle com veículo conectado



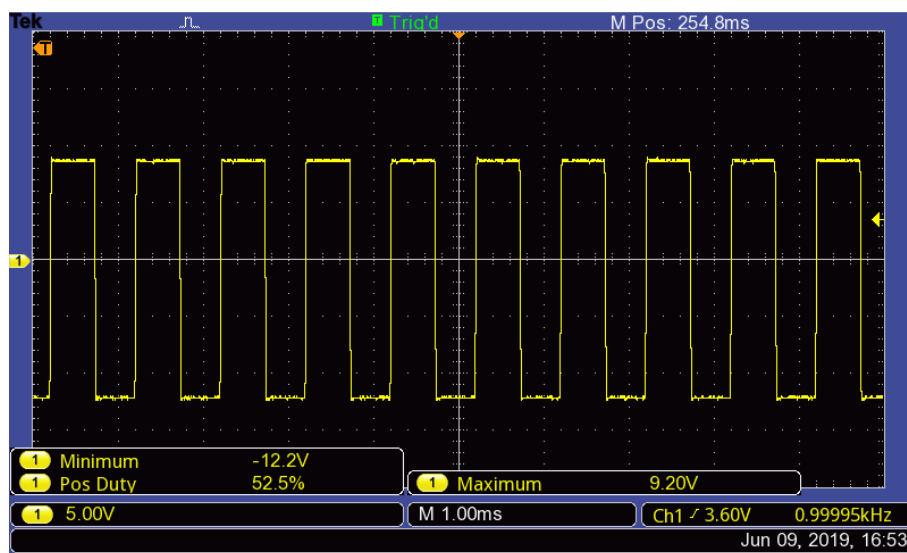
TBS 1052B - 4:52:32 PM 6/9/2019

Figura 23 – Sinal da função-piloto de controle com veículo conectado com SAVE informando a corrente máxima ao veículo de 16A



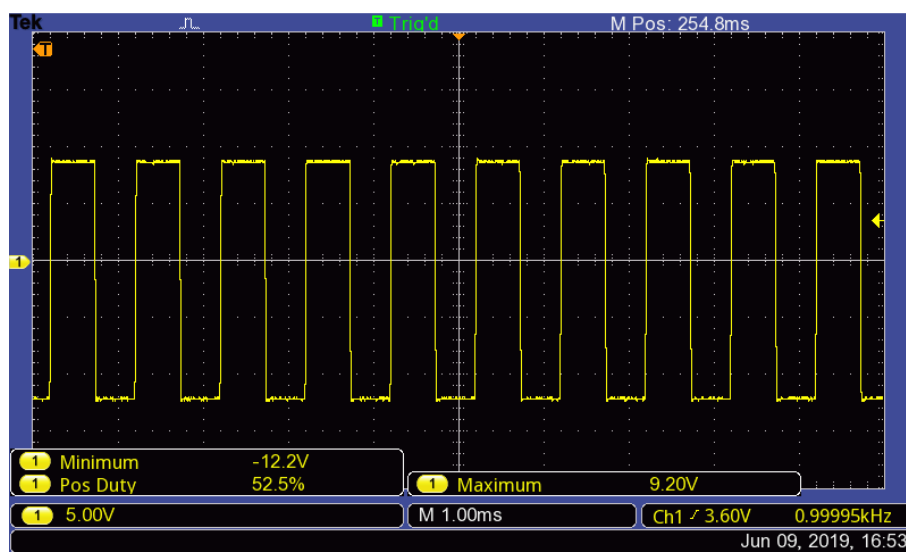
TBS 1052B - 4:53:04 PM 6/9/2019

Figura 24 – Sinal da função-piloto de controle com veículo pronto para carga com SAVE informando a corrente máxima ao veículo de 16A



TBS 1052B - 4:54:21 PM 6/9/2019

Figura 25 – Sinal da função-piloto de controle com veículo conectado com SAVE informando a corrente máxima ao veículo de 32A



TBS 1052B - 4:54:21 PM 6/9/2019

Figura 26 – Sinal da função-piloto de controle com veículo pronto para carga com SAVE informando a corrente máxima ao veículo de 32A

No que diz respeito à medição de potência, o valor lido nas condições comentadas (com os dois aquecedores em série) foi correto. Leu-se do SAVE uma potência de 2002 W, um pouco abaixo do valor calculado de 2250 W, por conta da diferença entre os valores utilizados para o cálculo e os valores reais da resistência interna de cada um dos aquecedores e da tensão da rede. Também mediu-se a corrente circulando pelos aquecedores, com um alicate amperimétrico, e leu-se uma corrente de 8,9 A. A partir dessa leitura, calcula-se um valor de potência esperado de 1958 W para a tensão de 220VAC, logo, a leitura do SAVE apresentou um erro de 2,2%, valor considerado extremamente adequado ao propósito do dispositivo, como prova de conceito. No caso de um sistema de cobrança, este erro não é tolerável, sendo necessário utilizar um sistema mais preciso, como será proposto na Seção 5.1. A Figura 27 mostra esse valor de potência lido pelo aplicativo *MQTT Dash*, utilizado como cliente MQTT para acompanhar os valores publicados e setar o nível de corrente máximo. Nota-se que ele também indica o estado na função-piloto como “2”, que representa o veículo pronto para carga ou carregando, de acordo com a Tabela 6. O valor mostrado no campo “Potência” é em watts e no campo “Corrente” é em amperes.

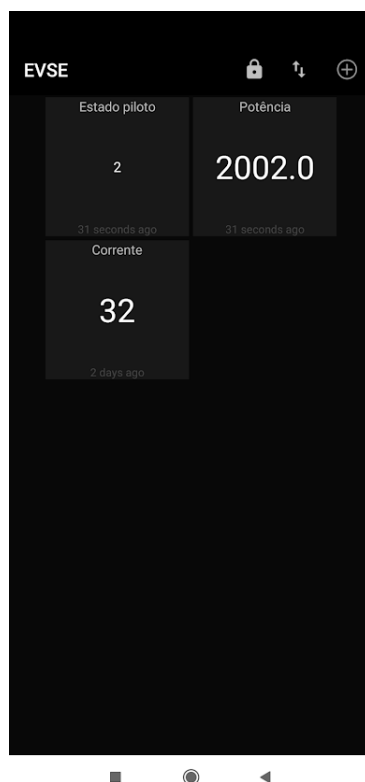


Figura 27 – Captura de tela do aplicativo *MQTT Dash* durante os testes em bancada

4.3 TESTES DE CAMPO EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os testes finais foram realizados no dia 17/06/2019, dentro do Laboratório de Alta Tensão (LAC), que pertence ao conjunto de laboratórios de inovação do LACTEC. Foram disponibilizados dois veículos: um Renault Zoe e um Renault Kangoo Z.E., ambos emprestados pela Copel, por parte do engenheiro Zeno Iensen Nadal, para a realização dos testes. O Zoe, já apresentado na introdução desse trabalho, é o VE de maior sucesso da Renault, que passa a ser comercializado ao público no Brasil em 2019. O Kangoo Z.E. é um modelo totalmente elétrico produzido a partir do tradicional furgão Kangoo, da própria Renault.

Durante os testes, o SAVE foi conectado à rede monofásica de 220V, além de ser devidamente aterrado nas instalações do laboratório. Além disso, por motivos de segurança, também utilizou-se um disjuntor de 20 A entre o SAVE e a rede para limitar a corrente caso o SAVE apresentasse alguma falha. Para a conexão Wi-Fi, utilizou-se um *hotspot* a partir de um celular com conexão 4G. A Figura 28 mostra o protótipo do SAVE no ambiente de testes.



Figura 28 – Foto do SAVE durante os testes

A Figura 29 mostra os dois veículos utilizados para os testes. Nota-se que à esquerda da imagem, o Renault Zoe está com o compartimento de recarga aberto na parte dianteira do veículo, e à direita o Kangoo Z.E. já está com o cabo de recarga conectado.

Para ambos os veículos o procedimento de teste foi o mesmo. A comunicação com o SAVE via MQTT foi toda realizada através do aplicativo *MQTT Dash*. Assim, com o SAVE devidamente energizado, conectado à internet, e indicando ao *broker* estar no estado 0 (que representa o veículo desconectado), conectou-se o plugue tipo 2 à parte dianteira de cada veículo. Ao observar-se que o SAVE indicou corretamente a conexão, alterando seu estado na função-piloto para 1 (que representa o veículo conectado), envia-se pelo aplicativo uma mensagem configurando a corrente máxima para o valor de 8 A. Assim, o SAVE inicia o PWM no sinal de função-piloto, com o ciclo de trabalho correspondente. O veículo, por sua vez, identifica este sinal e diminui sua resistência interna em relação à entrada do fio-piloto, indicando para o SAVE que está pronto para recarga. Neste momento, cada veículo pode ter um feedback diferente para o usuário. No caso do Kangoo Z.E., os faróis de alerta piscam cinco vezes para confirmar a indicação. O SAVE identifica a modificação na resistência interna do veículo, passa a indicar o estado 2 (que representa o veículo pronto para carregar ou carregando)



Figura 29 – Fotos dos VEs utilizados durante o carregamento: Renault Zoe (esquerda) e Renault Kangoo Z.E. (direita)

e fecha o contator, uma vez que a recarga pode ser iniciada. O SAVE começa então a publicar no *broker* as medições da potência instantânea sendo consumida pelo veículo. Também nota-se no painel de cada carro a indicação de que o processo de recarga está ocorrendo, além da informação de quanto tempo resta para a carga total da bateria, como mostram as figuras 30 e 31. Ao aumentar-se o valor de corrente máxima de 8 para 12 A, e depois de 12 para 16 A, ambos os veículos prontamente indicaram uma diminuição no tempo total de recarga devido ao aumento da corrente disponível.

Durante a recarga, também mediu-se a corrente que circulava pela fase com um alicate amperimétrico, e a tensão entre fase e neutro com um multímetro. Observou então que a potência consumida estava de acordo com o esperado, dentro da mesma faixa de erro apresentada nos testes em bancada. A Figura 32 mostra a captura da tela do celular utilizado como cliente MQTT, durante o carregamento do Renault Zoe com corrente máxima de 8 A, enquanto a Figura 33 mostra a captura da tela durante o carregamento com corrente máxima de 16 A. Nota-se que o aumento de potência é proporcional ao aumento da corrente.

Em ambos os veículos, o carregamento foi realizado somente durante um período de tempo de cerca de 10 minutos. Porém, esse curto período já foi suficiente para validar todas as funcionalidades esperadas da prova de conceito do SAVE. Quando deseja-se finalizar a recarga, deve-se acionar primeiramente um mecanismo próprio de cada veículo, para que ele encerre o consumo de energia e libere o plugue. Nesse momento, o SAVE volta a indicar o estado 1. Quando o plugue é retirado, o SAVE indica novamente o estado 0.



Figura 30 – Foto do painel do Renault Zoe durante o carregamento



Figura 31 – Foto do painel do Renault Kangoo Z.E. durante o carregamento

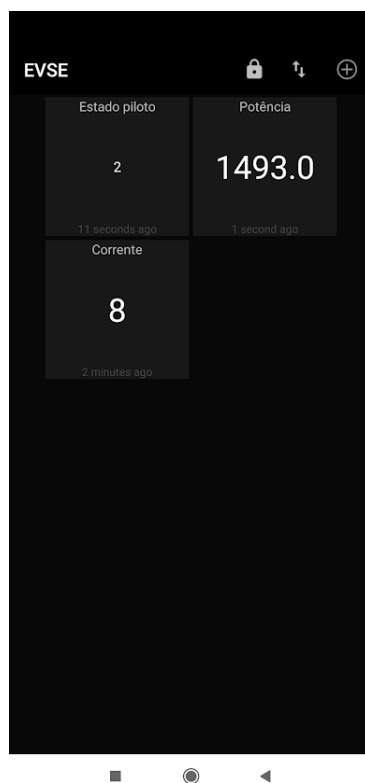


Figura 32 – Captura de tela do aplicativo *MQTT Dash* durante o teste no Renault Zoe com a corrente máxima de 8 A

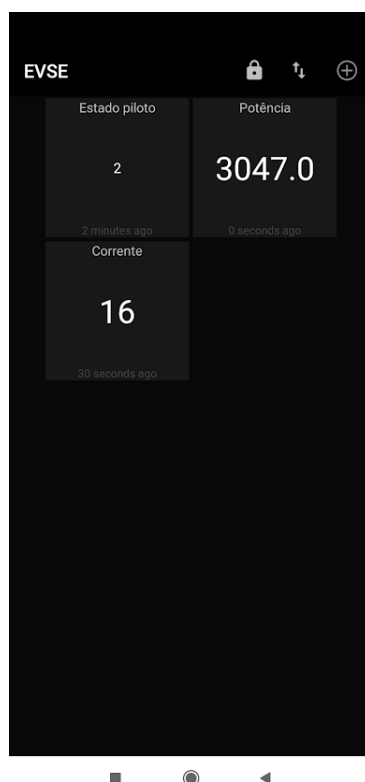


Figura 33 – Captura de tela do aplicativo *MQTT Dash* durante o teste no Renault Zoe com a corrente máxima de 16 A

5 CONCLUSÃO

Através do desenvolvimento da prova de conceito desta estação de carga foi possível verificar na prática diversos aspectos do processo de desenvolvimento de um sistema embarcado completo, desde a concepção da ideia e definição dos requisitos funcionais até o desenvolvimento de firmware e hardware, incluindo layout e produção de PCB, e montagem do equipamento. Dessa forma, conclui-se que este trabalho cumpre com seu objetivo geral, de implementar um SAVE funcional através de um sistema embarcado, como apresentado na Subseção 1.5.1.

Além disso, atingiram-se todos os objetivos específicos, descritos na Subseção 1.5.2, sendo esses implementados de acordo com os requisitos de projeto funcionais e não-funcionais, descritos na Seção 1.6. Destaca-se que a comunicação com o VE foi realizada com êxito a partir do que é especificado pela norma IEC 61851, através do desenvolvimento de todo o hardware e software necessários. A comunicação com um *broker* MQTT também ocorreu de forma que todas as mensagens relevantes foram trocadas, incluindo a medição correta da potência consumida durante o carregamento. Por fim, todos os módulos de hardware utilizados foram integrados a partir de um único kit de desenvolvimento, montados em um invólucro único e alimentados a partir uma conexão única com a rede elétrica, resultando em um protótipo funcional. Essa montagem foi importante para verificar a viabilidade de transformar o protótipo em um produto competitivo no mercado, tornando-se uma solução de boa qualidade e custo viável.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para transformar o protótipo utilizado como prova de conceito em um produto, há algumas questões a serem abordadas.

A primeira se refere às modificações de hardware necessárias. Em primeiro lugar, é necessário desenvolver o circuito de medição de potência com maior exatidão, para utilização no sistema de cobrança. Uma alternativa considerada viável é a utilização de *chips* da família CS549x, da Cirrus Logic, que permitem obter medições de potência com acurácia de 0,1%, com baixo custo. Além disso, é possível otimizar a alimentação do sistema, utilizando apenas fontes de +12V, -12V e 3,3V. Com a alteração do circuito de medição de modo que seja compatível com 3,3V, é possível remover a alimentação de 5V utilizada até o momento. Na sequência, pode-se substituir a placa de desenvolvimento utilizada neste projeto por uma PCB dedicada contendo o microcontrolador com interface para gravação. Também seria possível agregar o circuito de condicionamento do sinal de função-piloto, de medição de potência e das três fontes necessárias na mesma PCB, utilizando componentes SMD, o que reduziria custos e espaço físico ocupado pelo hardware. Ao reduzir o tamanho, por consequência, é reduzido o custo do invólucro necessário para o equipamento, pois para o produto final é interessante

que o invólucro seja personalizado com um design próprio, mas que também tenha o menor impacto possível no custo do equipamento.

Outra questão importante diz respeito ao software, pois é necessário o desenvolvimento da plataforma para as sessões de carga do usuário, que consiste em um servidor MQTT proprietário, responsável por organizar as mensagens recebidas dos diferentes usuários e estações de carga. Sobre esta camada de dados, pode ser adicionada a camada de serviço de transações, no mesmo servidor, responsável pelas transações entre o fornecedor de energia e o consumidor. Para isso, é importante que o servidor seja bem seguro em relação aos dados pessoais dos usuários e de valores utilizados para cobrança da potência consumida, utilizando camadas de criptografia nas comunicações, sem qualquer possibilidade de modificação destes valores de maneira ilícita. Uma possível alternativa seria a utilização de uma *blockchain* para viabilizar as sessões de carga de maneira segura para todos os usuários. Vale lembrar também que através do protocolo MQTT é possível enviar diversas métricas de todas as estações para o servidor, sendo possível obter informações que podem ser úteis para os proprietários das estações e, inclusive, para os distribuidores de energia, pois é possível obter os perfis de clientes de acordo com as regiões onde as estações estão instaladas, registrando a potência utilizada em cada horário, observando horários de pico, etc. Além disso, o servidor poderia atuar como intermediário entre a estação de carga e serviços ofertados por fabricantes de automóveis, caso houvesse interesse, necessitando apenas que o servidor utilizasse as APIs adequadas, sem modificações necessárias na estação de carga.

Para comunicar com o servidor e realizar as transações, seria interessante utilizar aplicativos mobile para as plataformas Android e iOS, inicialmente, com a possibilidade de expansão para plataformas alternativas, como watchOS, etc. Também seria possível analisar outros métodos de identificação de usuário e pagamento, como NFC. É importante sempre considerar o impacto de diferentes implementações no custo do equipamento, pois o objetivo é reduzir os custos, porém sempre mantendo uma ótima experiência para o usuário final. É importante ressaltar também que, para um possível serviço de taxaço ao usuário sobre a energia consumida durante o carregamento, seria necessário que o cálculo fosse feito sobre o valor de energia elétrica consumida, em kW/h. Como o SAVE desenvolvido envia somente dados periódicos sobre a potência instantânea consumida, o cálculo adequado desse consumo de energia ao longo do tempo teria que ser realizado a partir do servidor, ao mesmo tempo que este seria capaz de validar externamente as leituras e evitar qualquer cobrança inadequada ao usuário.

5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os principais fatores para este protótipo se tornar um produto com boas chances de ampla aceitação no mercado, após a implementação das melhorias comentadas na Seção 5.1, serão: custo reduzido do equipamento; facilidade na produção de diversas versões do equipamento, considerando diferentes potências máximas de acordo com a estrutura de rede do

cliente; e prestação de um bom serviço de carga, que facilite ao máximo a utilização do sistema por conta do consumidor final, mas que também seja de fácil instalação para o proprietário da estação, que não necessariamente será o consumidor final, no caso de estações instaladas em locais de grande circulação de pessoas, como centros comerciais, restaurantes, condomínios, entre outros.

Referências

- ALTERNATIVE FUELS DATA CENTER. **How Do All-Electric Cars Work?** 2019. Disponível em: <<https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>>. Acesso em: 20 de abril de 2019. Citado na página 20.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 61851-1: Sistema de recarga condutiva para veículos elétricos parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro, 2013. 47 p. Citado 5 vezes nas páginas 22, 25, 26, 28 e 29.
- BARRY, R. **Mastering the FreeRTOS Real Time Kernel: A Hands-On Tutorial Guide.** 1. ed. Manchester: Real Time Engineers Ltd., 2016. Citado na página 30.
- CAR SALES BASE. **Global electric car sales analysis 2018.** 2019. Disponível em: <<http://carsalesbase.com/global-electric-car-sales-analysis-2018/>>. Acesso em: 25 de abril de 2019. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- CINTRA, J. **Medidor do Consumo Elétrico com Arduino e Módulo PZEM004T.** 2017. Disponível em: <<http://josecintra.com/blog/medidor-consumo-eletrico-arduino-pzem004t/>>. Acesso em: 8 de março de 2019. Citado na página 36.
- DENTON, T. **Veículos elétricos e híbridos.** 1. ed. São Paulo: Blucher, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 16, 17, 18, 19 e 22.
- FORBES. **O que falta para os carros elétricos invadirem o Brasil.** 2018. Disponível em: <<https://forbes.uol.com.br/negocios/2018/10/o-que-falta-para-os-carros-eletricos-invadirem-o-brasil/>>. Acesso em: 28 de abril de 2019. Citado na página 20.
- GERRARD, B. **2018 Was A Huge Year For Electric Vehicles (In Charts).** 2019. Disponível em: <<https://medium.com/@braydeng/2018-was-a-huge-year-for-electric-vehicles-in-charts-b6aad055bdf9>>. Acesso em: 12 de maio de 2019. Citado na página 17.
- LIU, J. W. S. **Real-Time Systems.** 1. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2000. Citado na página 29.
- MCMAHON, J. **Electric Vehicles Cost Less Than Half As Much To Drive.** 2018. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/jeffmcmahon/2018/01/14/electric-vehicles-cost-less-than-half-as-much-to-drive/#427014ac3f97>>. Acesso em: 13 de maio de 2019. Citado na página 18.
- RICHARDSON, J. **38% Of American Cars Were Electric In 1900.** 2018. Disponível em: <<https://cleantechnica.com/2018/02/25/38-percent-american-cars-electric-1900/>>. Acesso em: 12 de maio de 2019. Citado na página 16.
- TEXAS INSTRUMENTS. **CC3x20, CC3x35 SimpleLink™ Wi-Fi® and Internet of Things Network Processor: Programmer's Guide.** 2019. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/swru455h/swru455h.pdf>>. Acesso em: 15 de abril de 2019. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

YUAN, M. **Getting to know MQTT: Why MQTT is one of the best network protocols for the Internet of Things**. 2017. Disponível em: <<https://developer.ibm.com/articles/iot-mqtt-why-good-for-iot/>>. Acesso em: 10 de abril de 2019. Citado na página 31.

Apêndices

APÊNDICE B – Diagrama esquemático do circuito da fonte simétrica de 12V

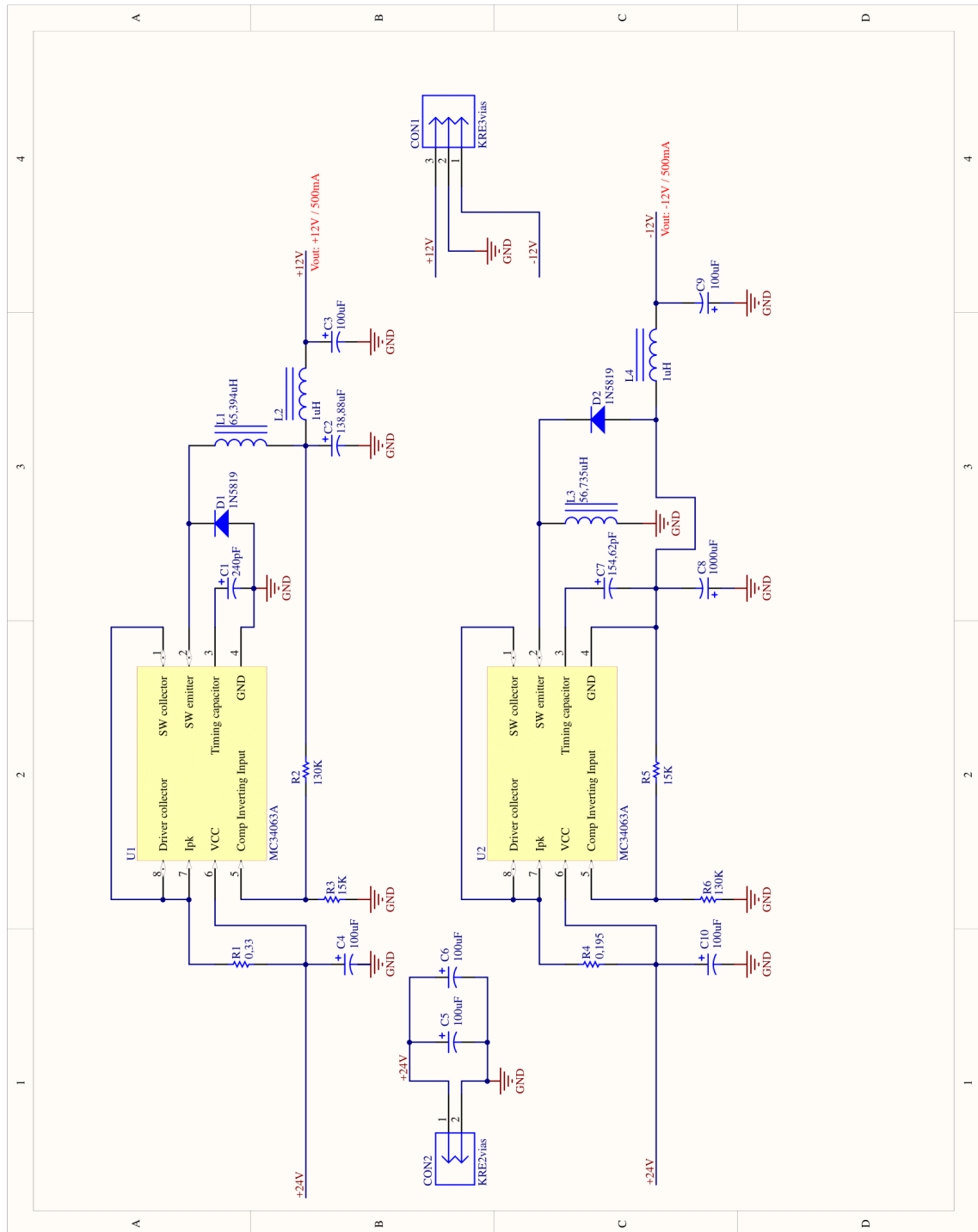


Figura 35 – Diagrama esquemático do circuito da fonte simétrica de 12V

APÊNDICE C – Diagrama de componentes do software do sistema

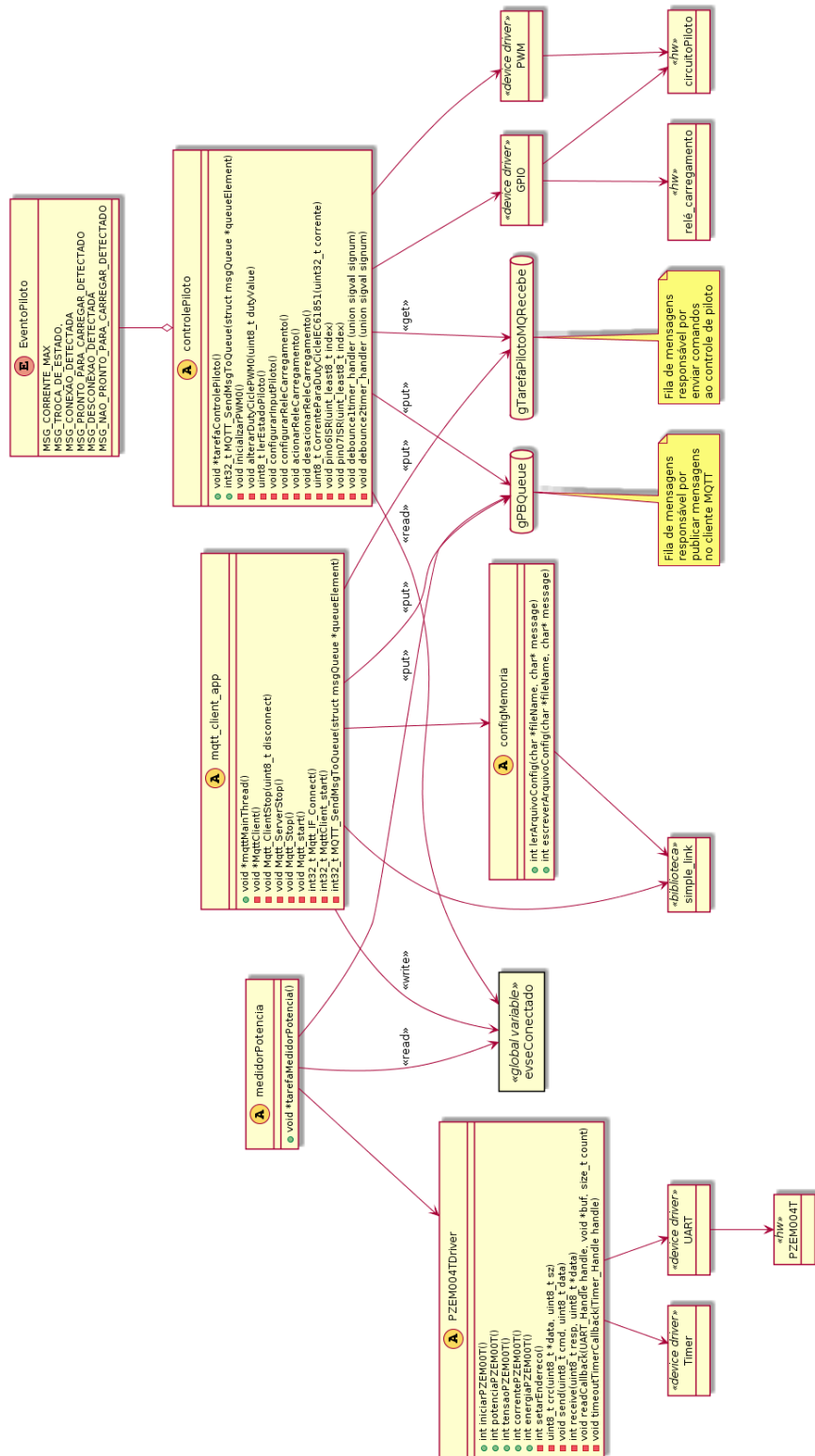


Figura 36 – Diagrama de componentes do software