

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO

SEBASTIÃO NAPOLEÃO DA SILVA JUNIOR

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE MODIFICAÇÃO DE UM CAMINHÃO
ELÉTRICO PARA APLICAÇÃO EM SERVIÇOS DE MANUTENÇÃO DE REDE DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

CURITIBA

2022

SEBASTIÃO NAPOLEÃO DA SILVA JUNIOR

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE MODIFICAÇÃO DE UM CAMINHÃO
ELÉTRICO PARA APLICAÇÃO EM SERVIÇOS DE MANUTENÇÃO DE REDE DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração Sistemas Energéticos Convencionais e Alternativos, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia.

Orientador: Prof^a. Dra. Ana Paula Oening
Coorientador: Prof^a. Dra. Signie Laureano
França Santos

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Silva Junior, Sebastião Napoleão da.

Desenvolvimento de metodologia de modificação de um caminhão elétrico para aplicação em serviços de manutenção de rede de distribuição de energia elétrica. / Sebastião Napoleão da Silva Junior. – Curitiba: LACTEC: IEP, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) apresentada ao Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de concentração – Sistemas Energéticos Convencionais e Alternativos, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP).

Orientadora: Profa. Dra. Ana Paula Oening.

Coorientador: Profa. Dra. Signie Laureano França Santos.

1. Arquitetura elétrica. 2. Energia elétrica. 3. Redes elétricas – distribuição. 4. Veículos elétricos. I. Oening, Ana Paula. II. Santos, Signie Laureano França. III. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. IV. Instituto de Engenharia do Paraná. V. Título.

Bibliotecário: Nilson Carlos Vieira Júnior CRB-9/1797

TERMO DE APROVAÇÃO

SEBASTIÃO NAPOLEÃO DA SILVA JUNIOR

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE MODIFICAÇÃO DE UM CAMINHÃO ELÉTRICO PARA APLICAÇÃO EM SERVIÇOS DE MANUTENÇÃO DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

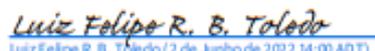
Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito para obtenção do grau de Mestre, no Mestrado Profissional do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, realização do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), pela seguinte banca examinadora:


Ana Paula Oening (1 de Junho de 2022 14:28 ADT)

ORIENTADOR (A): Prof.ª Dr.ª Ana Paula Oening
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)


Eduardo Kazumi Yamakawa (1 de Junho de 2022 14:29 ADT)

Prof. Dr. Eduardo Kazumi Yamakawa
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)


Luiz Felipe R. B. Toledo (2 de Junho de 2022 14:00 ADT)

Prof. Dr. Luiz Felipe Ribeiro Barrozo Toledo
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)



Prof. Dr. Alexandre Rasi Aoki
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba, 31 de maio de 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade e por ter cuidado de mim, a todos os meus mentores, a minha família por todo suporte, a minha médica Fabiana Barbosa que me ajudou em um momento tão difícil, e aos meus colegas Fábio Cândido, Alexandre Travi, Natan Barbizan, Yin Hao que compartilharam bastante conhecimento para a execução deste trabalho, a Brena Lemos que me auxiliou em várias coisas, a NEOENERGIA por ter me escolhido para fazer parte deste projeto, além da minha orientadora Ana Paula Oening pelo direcionamento preciso e toda ajuda durante esse desenvolvimento.

RESUMO

Os veículos elétricos são apontados como uma das possíveis soluções dentro de um pacote de ações que visam limitar o aquecimento global em até 1,5 graus Celsius em relação as temperaturas pré-industriais. Para atingir esse objetivo uma das possibilidades é expandir a aplicação de veículos elétricos para que possam substituir as aplicações veiculares correntes, que contam com motor a combustão interna. Nesse contexto, as maiores barreiras para aplicação dos veículos elétricos são os custos, autonomia dos veículos e tempo de recarga. Especialmente para caminhões que tem a necessidade de percorrer grandes distâncias, a capacidade da bateria se torna um complicador, principalmente para as aplicações de caminhões em que há a necessidade de se instalar um sistema auxiliar, que irá impactar na autonomia e necessita atender os mesmos requisitos funcionais das aplicações correntes, de forma a trabalhar de maneira similar ou até melhor. Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para a modificação de um caminhão elétrico para atender os requisitos necessários da aplicação em serviços de manutenção de redes aéreas, provido de cesto aéreo, de forma otimizada e sem impactar negativamente na disponibilidade e confiabilidade do sistema do caminhão elétrico. As análises abrangem o estudo da aplicação em campo com levantamento, interação com fabricantes de implemento, análise da arquitetura elétrica do veículo, transformação dos requisitos em especificações para o dimensionamento dos itens necessários para o sistema auxiliar, delineação da estratégia de funcionamento do sistema auxiliar com o levantamento das modificações necessária e seus respectivos impactos. Ao final do trabalho medições, e testes subjetivos e objetivos são realizados e os resultados apresentados corroboram o atendimento dos requisitos funcionais e de segurança da aplicação.

Palavras-chave: Caminhão elétrico; cesto aéreo; redes de distribuição; sistema auxiliar; manutenção de redes aéreas de distribuição.

ABSTRACT

Electric vehicles are pointed out as one of the possible solutions within a package of actions that aim to limit global warming to up to 1.5 degrees Celsius in relation to pre-industrial temperatures. To achieve this goal, it is necessary to expand the application of electric vehicles so that they can replace all current vehicle applications, which rely on an internal combustion engine. In this context, the biggest barriers for the application of electric vehicles are the costs, vehicle autonomy and recharge time. Especially for trucks that have the need to travel long distances, the battery capacity becomes a complicating factor, especially for truck applications where there is a need to install an auxiliary system, which will impact vehicle autonomy as it needs to meet the same functional requirements of current applications, in order to work in a similar way or even better. In this paper, a methodology was developed for the modification of an electric truck to meet the necessary requirements of the application of aerial maintenance trucks, provided with an aerial basket, in an optimized way and without negatively impacting the availability and reliability of the system. The analyzes cover the on-site survey, interaction with upper body manufacturers, analysis of the vehicle's electrical architecture, transformation of requirements into specifications for the dimensioning of the necessary items for the auxiliary system, delineation of the auxiliary system's operating strategy with the definition of the necessary modifications and their respective technical impacts. At the end of this paper measurements and subjective and objective tests are carried out and the results presented corroborate the fulfillment of the functional and safety requirements of the electrical grid maintenance truck application (bucket truck).

Keywords: Electric trucks; aerial lifter; auxiliary system; electrical grid; electrical distribution networks maintenance.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 – AS TRÊS TOPOLOGIAS BÁSICAS DOS VEH..... | 19 |
| FIGURA 2 – MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA (MCI) | 21 |
| FIGURA 3 – ARQUITETURA VECC E VEB..... | 22 |
| FIGURA 4 – ARQUITETURA VEÍCULO ELÉTRICO A BATERIA | 22 |
| FIGURA 5 – TIPOS DE MOTORES EXISTENTES | 23 |
| FIGURA 6 – DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO | 35 |
| FIGURA 7 – HDVU DE MAIOR COMPLEXIDADE..... | 37 |
| FIGURA 8 – CEP - ESQUEMÁTICO..... | 39 |
| FIGURA 9 – ARQUITETURA ELÉTRICA SIMPLIFICADA DE UM VEÍCULO ELÉTRICO | 40 |
| FIGURA 10 – APLICAÇÃO DE CONVERSORES DC/DC EM VEÍCULOS | 41 |
| FIGURA 11 – BOMBA DE ENGRENAGEM – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO.. | 46 |
| FIGURA 12 – GRÁFICO DE VAZÃO X ROTAÇÃO BOMBAS S12..... | 47 |
| FIGURA 13 – GRÁFICO DE POTÊNCIA X TORQUE DE ACORDO COM A PRESSÃO | 48 |
| FIGURA 14 – CAMINHÃO COM IMPLEMENTO DO TIPO CESTO AÉREO | 49 |
| FIGURA 15 – EXEMPLO DE ARRANJO COM CESTO ACOPLADO..... | 49 |
| FIGURA 16 – IMAGEM COMANDO SUPERIOR E COMANDO INFERIOR | 50 |
| FIGURA 17 – ESPECIFICAÇÃO/REQUISITO IMPLEMENTO..... | 51 |
| FIGURA 18 – IMAGEM DE UMA PTO MONTADA | 51 |
| FIGURA 19 – ARTIGOS REFERÊNCIAS - LINHA TEMPORAL | 54 |
| FIGURA 20 –ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO CAMINHÃO DE MANUTENÇÃO DE REDES AÉREAS | 59 |
| FIGURA 21 –PATOLA ESTABILIZADORA | 62 |
| FIGURA 22 – ETAPAS PARA INICIAR OS TRABALHOS EM REDES AÉREAS..... | 63 |
| FIGURA 23 –ARQUITETURA ELÉTRICA CAMINHÃO VEB COM SISTEMA DE AUXILIAR DO IMPLEMENTO INTEGRADO..... | 67 |
| FIGURA 24 – TABELA DE POTÊNCIA E TORQUE DAS BOMBAS DE ENGRENAGENS HYBEL..... | 68 |
| FIGURA 25 – EXEMPLO DE ALTERAÇÃO ARQUITETURA REDE CAN..... | 73 |
| FIGURA 26 – FLUXOGRAMA ESTRATÉGIA ENERGIZAÇÃO INVERSOR..... | 78 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 27 – FLUXOGRAMA ESTRATÉGIA GESTÃO DAS CONDICIONAIS DA APLICAÇÃO..... | 80 |
| FIGURA 28 – FLUXOGRAMA ESTRATÉGIA GESTÃO PÓS PARTIDA DO MOTOR | 81 |
| FIGURA 29 – FLUXOGRAMA REQUISIÇÃO DE DESCARGA | 86 |
| FIGURA 30 – TESTE DE LÓGICA DE FUNCIONAMENTO | 97 |
| FIGURA 31 – CONSUMO ELÉTRICO | 99 |
| FIGURA 32 – FALHA NO PROCESSO DE PRECARGA..... | 99 |
| FIGURA 33 – ENSAIO DE CORTE E REARME DO SISTEMA | 100 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 1 – NÍVEIS DE ELETRIFICAÇÃO VEICULAR..... | 18 |
| TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DOS TIPOS DE BATERIAS | 29 |
| TABELA 3 – TABELA DE CARGAS BRAVO 1.8 MTA..... | 43 |
| TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS BOMBAS HYBEL DE ENGRENAGENS | 48 |
| TABELA 5 – RESULTADOS DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA..... | 53 |
| TABELA 6 – LEVANTAMENTO DOS CAMINHÕES ELÉTRICOS DISPONÍVEIS NO MERCADO BRASILEIRO..... | 58 |
| TABELA 7 – ESPECIFICAÇÃO MOTOR IMPLEMENTO..... | 69 |
| TABELA 8 – MENSAGENS LIMITANTES..... | 74 |
| TABELA 9 – MENSAGENS INVERSOR..... | 75 |
| TABELA 10 – TEMPORIZADORES E PARÂMETROS..... | 76 |
| TABELA 11 – SINAIS ELÉTRICOS SISTEMA DE CONTROLE INVERSOR..... | 87 |
| TABELA 12 – CLASSE DE TENSÃO CABOS | 89 |
| TABELA 13 – PARÂMETROS PARA CABOS E CONECTORES..... | 90 |
| TABELA 14 – LEVANTAMENTO DAS CARGAS ADICIONAIS DO IMPLEMENTO PARA BALANÇO ENERGÉTICO..... | 92 |
| TABELA 15 – LEVANTAMENTO DE CONSUMO SISTEMA AUXILIAR IMPLEMENTO (MOTOR E INVERSOR) | 96 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|--------|--|
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| ASSB | <i>All Solid State Battery</i> |
| AC | <i>Alternate Current</i> |
| BCM | <i>Body Computer Module</i> |
| BMS | <i>Battery Monitoring System</i> |
| BPCM | <i>Battery Pack Control Module</i> |
| CEP | Conversor Estático de Potência |
| DC | <i>Direct Current</i> |
| EFB | <i>Enhanced Flooded Battery</i> |
| ESS | <i>Energy Storage System</i> |
| HV | <i>High voltage</i> |
| HVDU | <i>High Voltage Distribution Unit</i> |
| LV | Low voltage |
| LFP | Fosfato de ferro lítio |
| LTO | Titanato de lítio |
| IGBT | <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> |
| INPI | Instituto Nacional da Propriedade Industrial |
| MCI | Motor a combustão interna |
| MOSFET | <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> |
| BLDC | <i>Brushless Direct current motor</i> |
| PMSM | <i>Permanent magnet synchronous motor</i> |
| PTO | <i>power takeoff</i> |
| SLI | <i>Start, Lighting, Ignition</i> |
| SoC | <i>State of Charge</i> |
| SoF | <i>State of Function</i> |
| SoH | <i>State of Health</i> |
| S&S | <i>Stop and Start</i> |
| Vac | tensão alternada |
| VCU | <i>Vehicle Control Unit</i> |
| Vdc | tensão contínua |
| VE | Veículo Elétrico |
| VEB | Veículo Elétrico à Bateria |

| | |
|----------|---|
| VECC | Veículo Elétrico à Célula a Combustível |
| VHE-Full | Veículo Híbrido Elétrico Completo |
| VMCI | Veículo com Motor de Combustão Interna |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 | CONTEXTO | 14 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 15 |
| 1.3 | JUSTIFICATIVA | 16 |
| 1.4 | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 17 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 18 |
| 2.1 | ELETRIFICAÇÃO VEICULAR | 18 |
| 2.2 | MOTORES UTILIZADOS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS | 23 |
| 2.3 | BATERIAS | 27 |
| 2.4 | SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIA..... | 32 |
| 2.5 | UNIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO (HDVU)..... | 36 |
| 2.6 | CONVERSOR ESTÁTICO DE POTÊNCIA EM VEÍCULOS ELÉTRICOS ... | 38 |
| 2.7 | BALANÇO ENERGÉTICO | 42 |
| 2.8 | REDE CAN..... | 43 |
| 2.9 | BOMBAS VOLUMÉTRICAS..... | 44 |
| 2.10 | IMPLEMENTO TIPO CESTO AÉREO | 48 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 53 |
| 3.1 | PESQUISA ACADÊMICA..... | 54 |
| 3.2 | PESQUISA COMERCIAL..... | 56 |
| 4 | MÉTODO | 58 |
| 4.1 | ETAPA DE CAPTURA DE REQUISITOS | 59 |
| 4.2 | ETAPA DE DESENVOLVIMENTO..... | 60 |
| 4.3 | ETAPA DE AVALIAÇÃO E PROPOSIÇÃO | 60 |
| 5 | RESULTADOS | 61 |
| 5.1 | CAPTURA DE REQUISITOS | 61 |
| 5.2 | ETAPA DE DESENVOLVIMENTO..... | 66 |
| 5.3 | ETAPA DE AVALIAÇÃO E PROPOSIÇÃO | 94 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6 | CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 102 |
| | REFERÊNCIAS | 105 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

No final de 2015 ocorreu a 21^a Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 21) com o intuito de manter o aumento da temperatura média global em até dois graus em relação níveis pré-industriais e focar os esforços para limitar o aumento da temperatura em até um grau e meio acima dos níveis pré-industriais. Tal fato aumentou a pressão para que empresas e governos adotem práticas mais sustentáveis e com menor impacto ao meio ambiente e que vêm impondo à indústria automobilística a necessidade de desenvolver novos produtos com tecnologias que gerem menor impacto.

O advento do veículo 100% elétrico (VE) é uma estratégia ambiciosa para redução drástica de consumo de combustíveis fósseis e mesmo os VEs tendo uma fatia consideravelmente menor no mercado, se comparado aos veículos a combustão interna, segundo CONSONI *et al.* (2018) observa-se um acentuado crescimento da produção e desenvolvimento de VEs em nível global. O volume de vendas total de 750 mil veículos no ano de 2016 elevou a frota global a superar a marca de 2 milhões de veículos, sendo que 2005 esse número era ligeiramente maior do que 1000 unidades (EV SALES, 2018; IEA, 2017).

Um estudo em conjunto do Boston Consulting Group e da Associação nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA e BCG, 2021) prevê que em 2030 os carros elétricos vão representar 5% da frota brasileira, com vendas de 180 mil unidades ao ano. O estudo “*Electric Vehicles for Smarter Cities: The Future of Energy and Mobility*” do Fórum Econômico Mundial (WORLD ECONOMIC FORUM, 2018) conduzido em 2018, aponta que a mobilidade elétrica terá um crescimento e importância maior do que a prevista. O estudo indica que, no futuro, as redes elétricas com desenvolvimento da tecnologia “*smart grid*” se tornarão parte integrante de diversos setores da economia, dentre eles o setor de transporte através da eletrificação (o referido estudo também cita transporte autônomo e compartilhado).

O Brasil tem uma cadeia de produção automotiva expressiva e consolidada. Segundo a Nota Técnica nº 152 do DIEESE (Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos) o país conta com 31 polos produtivos de veículos a combustão e uma vasta cadeia de fornecedores (DIEESE, 2015). Com base no

potencial da cadeia produtiva nacional e com tendência mundial de crescimento das vendas de VEs, existe a real possibilidade de o Brasil vir a ser um polo produtivo competitivo em nível global de eletrificação veicular, mas para tal há a necessidade de políticas públicas voltadas para a pesquisa e desenvolvimento destas tecnologias.

Ciente disso, em abril de 2019 a ANEEL lançou o edital para Chamada de Projeto de P&D Estratégico nº 22/2018 “Desenvolvimento de Soluções em Mobilidade Elétrica Eficiente” cujo objetivo é a criação de modelos de negócios baseados na inserção no mercado de produtos tecnológicos, através de estudos conduzidos em conjunto com o setor produtivo com o intuito de impulsionar a mobilidade elétrica no território nacional. Nesse contexto, essa dissertação é parte integrante do projeto de P&D ANEEL 00385.0069/2019, denominado “Implementação de Caminhão Elétrico para Manutenção de Redes de Distribuição de Energia” que visa fazer adaptações para a inclusão de cesto aéreo-hidráulico e de todo aparato necessário em um caminhão elétrico comercialmente disponível no mercado para a utilização em serviços de manutenção de redes de energia elétrica.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia para adaptação de um caminhão elétrico convencional em um caminhão para serviços de manutenção de redes de distribuição de energia, de modo a propiciar a utilização de um cesto aéreo hidráulico de mercado por meio de um sistema eletro hidráulico auxiliar, com alimentação e acionamento agregados e integrados ao veículo.

Este trabalho traz os seguintes objetivos específicos:

- Levantar as características dos caminhões elétricos, visando compreender as especificidades deste tipo de produto.
- Levantar as especificações da aplicação de caminhões de manutenção de redes elétricas em campo, de modo a compreender os requisitos técnicos, quantitativos e qualitativos pela ótica do operador do produto.
- Levantar os requisitos técnicos de um fornecedor de implemento de caminhão para manutenção de redes elétricas, de modo a compreender os requisitos técnicos, quantitativos e qualitativos pela ótica do fabricante de implemento.

- Definir as modificações técnicas necessárias no caminhão, com foco em verificar o que se faz indispensável para atendimento dos requisitos do fabricante e dos operadores.
- Definir os modos de funcionamento, limitações do sistema auxiliar e as suas respectivas interações com o chassi do caminhão elétrico, baseado nas particularidades técnicas dos caminhões e dos componentes a serem agregados no chassi do caminhão elétrico.
- Avaliar os sistemas vias testes funcionais, de modo a identificar o correto funcionamento do sistema auxiliar, assim como a não interferência no funcionamento normal do chassi.
- Propor uma metodologia para modificação de um caminhão elétrico para a aplicação em manutenção de linhas aéreas, de forma a realizar a correta integração dos componentes do sistema auxiliar necessários desta aplicação com o chassi, de maneira eficaz e segura.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os caminhões movidos à motores a combustão interna (diesel) convencionais possuem um motopropulsor que é preparado para suprir os diversos sistemas auxiliares, como alternador (provedor de potência elétrica em 24V), compressor do ar condicionado, bomba d'água e compressor de ar (freio pneumático, suspensor de banco, elevador de eixo, suspensão se esta for pneumática). Ainda, os caminhões à combustão implementados para utilização em atividades de manutenção de redes de distribuição possuem, via tomada de força, um sistema hidráulico responsável por acionar funcionalidades como o cesto aéreo e ferramentas hidráulicas. No caso do caminhão elétrico não há a presença do motopropulsor, porém as mesmas funcionalidades devem ser atendidas, para as quais devem ser utilizados sistemas dedicados.

Em pesquisa na base de dados Scopus e no Google Scholar, feitas na plataforma *Publish or Perish*, verificou-se a incipiência do tema mobilidade elétrica com o enfoque voltado para as diferentes aplicações de caminhões elétricos, assim como não foi encontrado nada relativo a esse tema na base do INPI. Desse modo, o estudo proposto, além de ser um guia para a adaptação de um caminhão elétrico comercial para a aplicação em atividades de manutenção em redes de energia

elétrica, pode ser uma referência, pelo menos em parte, para a modificação de caminhões elétricos para outros tipos de aplicações.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A dissertação proposta está dividida em seis capítulos. O capítulo 1 tratou da contextualização do trabalho, de modo a apresentar de maneira clara e objetiva o estudo em questão, com a delimitação dos objetivos gerais e específicos.

O capítulo 2 trata da fundamentação teórica, visando embasar o conteúdo do trabalho proposto. O capítulo 3 contém o estado da arte das tecnologias e conceitos que envolvem a aplicação de caminhões elétricos, baseando-se em artigos científicos e soluções de mercado.

No capítulo 4 a metodologia proposta descreve o modo utilizado em cada etapa para o desenvolvimento deste trabalho. Já no capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos em cada etapa da metodologia proposta.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ELETRIFICAÇÃO VEICULAR

Devido a necessidade de se reduzir os níveis de emissões, as montadoras promoveram uma série de modificações em seus produtos, dentre elas a eletrificação dos automóveis. Segundo Souza (2016) a eletrificação é um processo que pode ter vários níveis indo desde a micro hibridização até uma eletrificação completa.

A TABELA 1 mostra como são classificados os veículos quanto ao seu nível de eletrificação devido às limitações tecnológicas e econômicas de cada tipo, o que permite uma melhor adequação do implemento das inovações tecnológicas para cada perfil de mercado consumidor.

TABELA 1 – NÍVEIS DE ELETRIFICAÇÃO VEICULAR

| Nível de Eletrificação | Definição e Exemplo |
|------------------------|---|
| Micro-híbridos | Contém sistema <i>Start-Stop</i> , e pode ou não contar com sistema de recarga inteligente (<i>smart charging</i>). |
| Híbridos | Veículos que utilizam uma combinação do motor de ciclo OTTO com motor elétrico para a propulsão veicular, como no caso do Toyota Prius. |
| Elétrico | Utiliza a eletricidade como única fonte de energia para a propulsão, como no caso do Tesla Model S. |

FONTE: Adaptado de SOUZA (2016)

2.1.1 VEÍCULOS MICRO HÍBRIDOS

O termo micro híbrido é utilizado para definir os veículos que possuem tecnologias de gestão diferenciada da energia elétrica. Neste caso normalmente os veículos tem as funções *Start&Stop* (S&S) e a alguma estratégia de frenagem regenerativa para carregar a bateria de 12V/24V e que promovem redução de consumo e emissões (DENTON,2016).

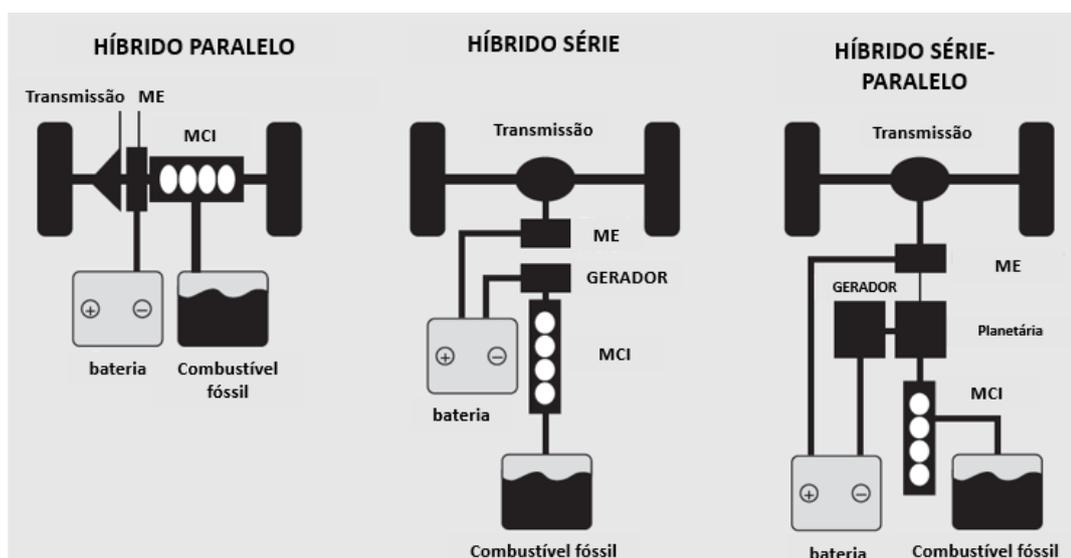
Com os sucessivos ciclos de acionamento do motor de partida, a bateria é muito exigida. A cada repartida ocorre uma redução da carga da bateria que precisa ser reposta rapidamente, caso contrário o veículo pode perder a funcionalidade S&S ou mesmo ficar sem energia na bateria para o seu funcionamento normal.

Frenagem Regenerativa: Nos veículos comuns, o alternador gera uma tensão fixa baseada na temperatura e trabalha em *stand alone*, no caso de veículos dotados desta funcionalidade o alternador se comunica com a central de controle motor (ECM) e recebe dela os comandos para executar suas funções de carga de acordo com status de marcha e status da bateria. A função visa recarregar a bateria aproveitando os momentos em que o veículo está em não aceleração elevando a tensão do alternador de modo a aproveitar ao máximo energia cinética do veículo para recarregar a bateria (SOUZA, 2016).

2.1.2 VEÍCULOS HÍBRIDOS (VHE)

São conhecidos por utilizarem dois até dois tipos de fonte de potência e, podem ser configurados em três topologias distintas, a topologia série, paralela e serie-paralela (PEREIRA, 2007), conforme a Figura 1. Os veículos híbridos usam pelo menos um acionamento via motor elétrico (ME), além da combustão interna motor (MCI), sendo que existem variantes de combinação e também podem ser definidos como Veículo Híbrido Elétrico Completo (VHE-Full), Veículo Híbrido Elétrico Parcial (VHE-Mild) e Veículo Híbrido Elétrico Plug In (VHE-Plug In).

FIGURA 1 – AS TRÊS TOPOLOGIAS BÁSICAS DOS VEH



FONTE: Modificado de DENTON (2016).

Os veículos híbridos utilizam para propulsão motores elétricos (ME) e motores de combustão interna (MCI), que tem curvas de rotação versus torque bem diferentes,

e cada topologia de VHE tem sua respectiva arquitetura e característica, mas todas tem foco na otimização energética (DENTON,2016).

Nos híbridos em paralelo ao ME e o MCI podem ser utilizados de modo independente um do outro, mas a potência flui em paralelo e podem ser somadas para obter a potência máxima de tração. O MCI vai funcionar o tempo todo quando o veículo estiver em movimento, se houver apenas uma embreagem entre os sistemas elétricos e a combustão. Há arquiteturas com dupla embreagem que permite que o motor seja desconectado e isso significa que é possível funcionar de modo 100% elétrico.

A configuração em série é um layout onde o motor aciona um gerador (alternador) que carrega a bateria que alimenta um ME que traciona o veículo, esta configuração se trata sempre de um VHE-Full. Como uma transmissão convencional não é necessária, então há mais espaço para se colocar mais bateria. O MCI pode trabalhar na faixa de rotações onde tem maior eficiência.

A principal desvantagem é que a energia tem que ser convertida duas vezes (mecânica para elétrico e elétrico de volta para mecânica) e se a energia for armazenada na bateria, três conversões são necessárias. Como resultado há uma diminuição da eficiência, por outro lado o MCI opera no seu nível ótimo.

Os sistemas série-paralelos são uma extensão da topologia série, por causa de um sistema de embreagem adicional que pode conectar mecanicamente o gerador e o motor. Isso elimina a dupla conversão de energia, exceto em certas faixas de velocidade, mas o espaço que havia na configuração série é perdido devido ao acoplamento mecânico adicional. Além disso, uma unidade elétrica adicional é necessária em relação a topologia paralelo (DENTON,2016).

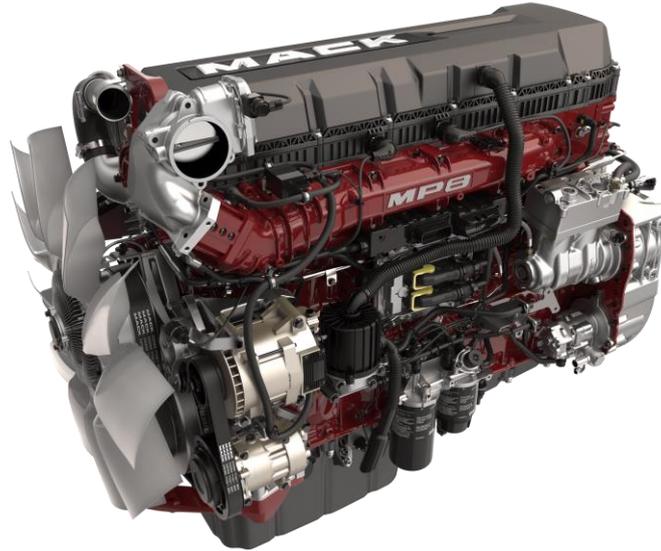
Esse tipo de VEH combina as vantagens das topologias em série e paralelo, mas há um aumento de complexidade. Uma proporção da potência do motor é convertida em energia elétrica pelo alternador e o restante, junto com o motor, impulsiona as rodas, sendo essa topologia também considerado de um VHE-full (DENTON, 2016).

2.1.3 VEÍCULOS ELÉTRICOS (VE)

Segundo Denton (2016), nos veículos à combustão interna (VMCI) o MCI é o provedor de potência para os sistemas auxiliares, logo todos os sistemas auxiliares são, de alguma forma, conectados a ele e drenam energia do mesmo, assim como

dependem de ele estar em pleno funcionamento para que funcionem. Na Figura 2 Figura 2 é possível observar os itens auxiliares, como alternadores, bombas e compressor conectados diretamente ao MCI.

FIGURA 2 – MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA (MCI)



FONTE: Imagens PNG (2020)¹.

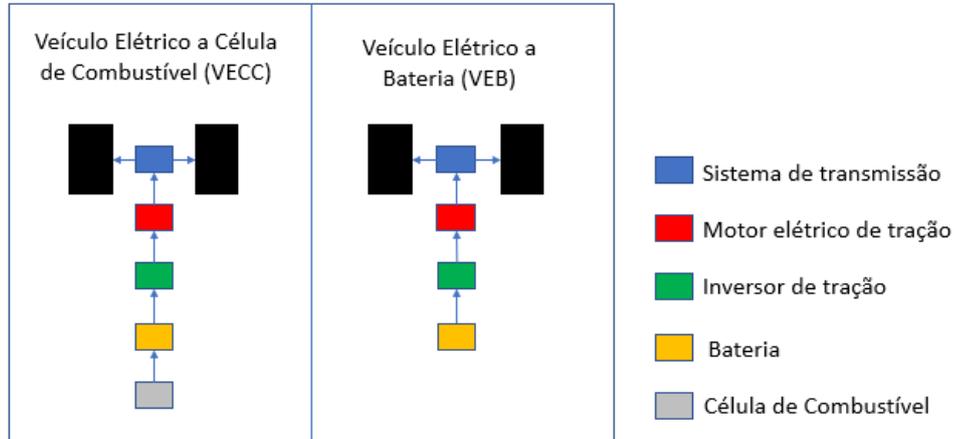
Os veículos elétricos (VE) tem o seu tracionamento feito por motores elétricos e tem a alimentação principal tanto dos sistemas auxiliares quanto do sistema de tração feito por meio de banco de baterias (ESS) e estes são chamados de Veículos elétricos à bateria (VEB). Há uma outra categoria de veículos elétricos que a potência elétrica é provida através do uso de células combustível e são chamados de veículos elétricos à célula de combustível (VECC) e, neste conceito, a indústria automobilística tem utilizado células hidrogênio que realizam conversão de energia química em energia elétrica através de reações de oxirredução (DENTON,2016; EMADI, 2015).

Nos VEB a potência elétrica para recarregar a bateria é oriunda de uma fonte de potência elétrica externa e tal carregamento tem seu tempo reduzido de modo significativo com o passar do tempo, mas ainda é substancialmente maior que um simples abastecimento em um posto de gasolina. A principal vantagem do VECC se dá justamente nessa rapidez de abastecimento, que levaria apenas alguns poucos minutos, mas em termos de arquitetura seriam bem semelhantes, pois um VECC ainda teria de contar com uma pequena bateria para o sistema de alta tensão, tanto

¹ Disponível em: <<https://imagenspng.com/download/motor-de-caminhao-imagem-png-hd/>>. Acesso em: 08 de maio de 2021

para estabilidade do sistema, quanto para momentos de maior demanda elétrica, conforme pode ser visto na Figura 3 (DENTON,2016).

FIGURA 3 – ARQUITETURA VECC E VEB

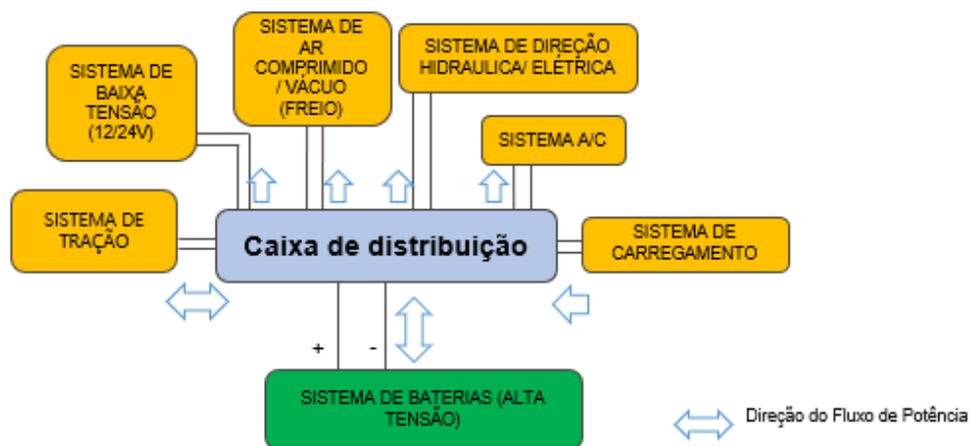


FONTE: O autor (2021).

Nos VE, independentemente do modo de prover a potência (elétrica) para os sistemas auxiliares, cada sistema auxiliar é gerido de modo independente e tem seu próprio controlador e seu conversor de energia (por exemplo motor elétrico), logo são geridos de forma mais eficaz além de não dependerem do motor de tração do veículo para funcionar. A Figura 4 apresenta a arquitetura de um VEB, em que fica explícito que cada sistema é independente (EMADI, 2015).

Apesar dos sistemas serem independentes deve existir coordenação entre os sistemas, além de tomada de decisão final ser a cargo de uma central mestre, que geralmente é a VCU (*vehicle control unit*) ou a BCM (*body computer module*) (DENTON,2016; EMADI, 2015).

FIGURA 4 – ARQUITETURA VEÍCULO ELÉTRICO A BATERIA

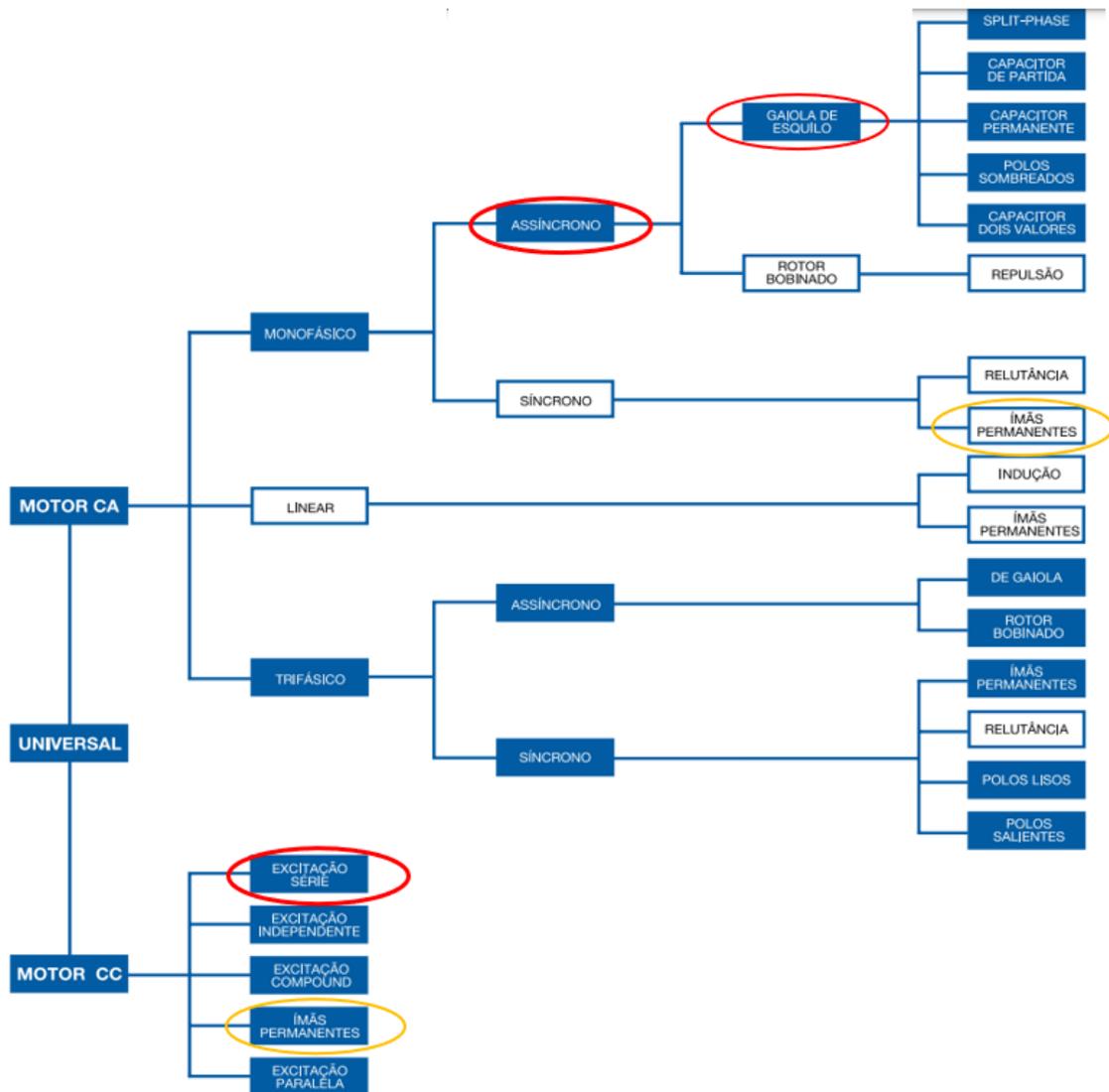


FONTE: O autor (2021).

2.2 MOTORES UTILIZADOS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

Na Figura 5 constam os principais tipos de motores e os marcados em vermelho e laranja correspondem aos mais largamente utilizados em VE.

FIGURA 5 – TIPOS DE MOTORES EXISTENTES



FONTE: Adaptado de WEG (2015).

Dentre os tipos de motores AC se destaca para aplicação em VEs o motor assíncrono do tipo gaiola de esquilo, pois é o mais utilizado devido a simplicidade de sua construção, baixo custo, robustez e alta eficiência em uma determinada faixa de velocidades, o que faz deste tipo de motor ser o mais utilizado na indústria, e ser o tipo de motor mais empregado em sistemas auxiliares (compressor de ar, bomba de direção hidráulica, sistemas de ar condicionado) de caminhões e ônibus elétricos (DENTON, 2016).

Chama-se gaiola de esquilo, pois o seu rotor consiste em um cilindro de lâminas de aço silício, com condutores de alumínio ou cobre embutidos que são curto circuitados em suas extremidades o que dá a aparência de gaiola. Em operação, o enrolamento do estator é conectado a uma fonte de alimentação AC que produz no estator um campo magnético girante que induz uma força eletromotriz no rotor que faz com que uma corrente flua no mesmo. Isso cria um campo magnético, que reage ao campo original causado pelo estator fazendo o rotor girar, Fitzgerald et al. (2006).

De acordo com Fitzgerald et al. (2006), o motor DC fora utilizado largamente na indústria, pois havia modos mais fáceis de fazer a variação de velocidade e torque com dispositivos relativamente simples, entretanto há a necessidade haver fluxo de corrente elétrica para o rotor através de escovas e comutadores que necessitam de manutenção recorrente. Em aplicações automotivas os motores DC são largamente utilizados em sistemas acessórios como motores de partida (somente em veículos com MCI), em limpadores de para-brisa, e levantadores de vidro, que são em sua grande maioria do tipo excitação série, pois tem como característica alto torque em baixas velocidades.

Entretanto, Denton (2016), discorre que há um tipo de motor DC que está sendo largamente utilizado na indústria automotiva, o motor DC comutado eletronicamente sem escova mais conhecido como BLDC (*brushless*) que é um meio termo entre um motor AC e um motor DC, pois seu princípio é semelhante ao motor AC síncrono, exceto pelo fato que o rotor contém ímãs permanentes e, portanto, sem anéis coletores e nem escovas.

Neste sistema o inversor envia corrente DC para o estator de maneira pulsada e coordenada de modo a produzir um campo magnético girante de modo que a frequência do mesmo determina a velocidade do motor.

Denton (2016) classifica esse motor como DC, pois se ele é alimentado com pulsos de onda quadrada DC, e se fornecido com pulsos de onda senoidal então é AC, mas admite que há autores que o classificam como motores síncronos de ímãs permanentes - PMSM (*permanent magnet synchronous motor*) que o consideram como um motor do tipo AC, e até mesmo os fornecedores de motor utilizam as duas classificações como pode ser visto na Figura 5.

Como o motor BLDC é equipado com ímãs especiais que contém minerais do tipo terras raras, que tem custo elevado e fornecimento quase exclusivo por empresas

da China, este tipo de motor tem sido utilizado exclusivamente em sistemas de tração em VE.

2.2.1 REGIME DE TRABALHO DOS MOTORES

Segundo a norma IEC 60034-1 o regime de trabalho de motores trata do grau de regularidade da carga em que ele é submetido. Segundo WEG (2015), os motores geralmente são projetados para regime contínuo, isto é, com carga constante por tempo indefinido, e igual a potência nominal do motor. O correto entendimento da aplicação do motor se faz necessário para o correto dimensionamento do mesmo de modo a garantir a correta operação do sistema além de possibilitar o atingimento das metas da disponibilidade, confiabilidade e custos de operação e manutenção otimizados.

- S1 - Regime Contínuo: Cujo funcionamento a carga constante com duração suficiente para que se alcance o equilíbrio térmico.
- S2 - Regime de Tempo Limitado: Regime de funcionamento a carga constante, durante um certo tempo, sendo o mesmo inferior ao necessário para atingir o equilíbrio térmico, seguido de um período de repouso de duração suficiente para restabelecer a igualdade de temperatura com o meio refrigerante.
- S3 - Regime Intermitente Periódico: O ciclo de trabalho consiste em uma sequência de ciclos idênticos, cada qual incluindo um período de funcionamento a carga constante e um período de repouso, sendo tais períodos muito curtos para que se atinja o equilíbrio térmico durante um ciclo de regime e no qual a corrente de partida não afete de modo significativo a elevação de temperatura.
- S4 - Regime Intermitente Periódico com Partidas: Se trata de uma sequência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de partida, um período de funcionamento a carga constante, um período de frenagem elétrica e um período de repouso, sendo tais períodos muito curtos para que se atinja o equilíbrio térmico.
- S5 - Regime Intermitente Periódico com Frenagem Elétrica: Se trata de funcionamento com ciclos idênticos, cada qual consistindo de um

período de partida, um período de funcionamento a carga constante, um período de frenagem elétrica e um período de repouso, sendo tais períodos muito curtos para que se atinja o equilíbrio térmico.

- S6 - Regime de funcionamento contínuo com carga intermitente: Sequência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de funcionamento em carga constante e de um período de funcionamento a vazio, não existindo período de repouso.
- S7 - Regime de funcionamento contínuo com frenagem elétrica: Se trata de sequência de ciclos com regimes idênticos, cada qual consistindo de um período de partida, de um período de funcionamento em carga constante e um período de frenagem elétrica, não existindo o período de repouso.
- S8 - Regime de funcionamento contínuo com mudança periódica na relação carga/velocidade de rotação: O Funcionamento em uma sequência de ciclos de regimes idênticos, cada ciclo consiste de um período de partida e um período de funcionamento em carga constante a uma velocidade de rotação pré-determinada, seguidos de um ou mais períodos de funcionamento a outras cargas constantes, correspondentes a diferentes velocidades de rotação. Não existe período de repouso.
- S9 - Regime com variações não periódicas de carga e de velocidade: Regime no qual geralmente a carga e ou/e velocidade variam não periodicamente, dentro da faixa de funcionamento admissível, incluindo frequentemente sobrecargas aplicadas que podem ser muito superiores a cargas nominais especificadas.
- S10 - Regime com cargas constantes distintas: Regime com cargas constantes distintas, incluindo no máximo, quatro valores distintos de carga (ou cargas equivalentes), cada valor sendo mantido por tempo suficiente para que o equilíbrio térmico seja atingido. A carga mínima durante um ciclo de regime pode ser zero.

2.3 BATERIAS

Segundo Linden e Reddy (2018), bateria é um dispositivo que converte a energia química contida em seus materiais ativos diretamente em energia elétrica por meio de uma reação redução/oxidação eletroquímica (redox) e, em se tratando de uma bateria recarregável, tal processo pode ser revertido. Este tipo de reação envolve a transferência de elétrons de um material para outro através de um circuito elétrico.

Apesar do termo bateria ser mais utilizado, o mesmo se refere popularmente a célula, que é a unidade eletroquímica básica das baterias. O conjunto de células arranjadas em série ou paralelo de modo a fornecer a tensão/corrente adequada para uma dada aplicação é denominado como bateria. As principais características das baterias são definidas a seguir:

- Tensão: A tensão da célula em volts é determinada pelo tipo de materiais ativos contidos na célula. Pode ser calculado a partir de dados de energia livre ou obtido experimentalmente, sendo muito utilizadas as tabelas de potência de redução ou oxidação.
- Capacidade: A capacidade teórica de uma célula é determinada pela quantidade de materiais ativos na mesma. É expressa como a quantidade total de eletricidade envolvida na reação eletroquímica e é definida em termos de coulombs ou amperes-hora (*Ah*). A capacidade de uma célula também pode ser considerada em uma base de energia (watt-hora), que é o valor máximo de energia que pode ser entregue por um dado sistema eletroquímico. A equação (1) representa a capacidade em termos de energia *Wattthora* (*Wh*), onde *V* é a tensão (*V*) e *C* a capacidade (*Ah*).

$$Wattthora = V \times C \quad (1)$$

- Densidade de energia: É o total de energia armazenada por uma célula ou bateria expressa em relação ao seu volume (*Wh/L*).
- Energia específica: É o total de energia armazenada por uma célula ou bateria expressa em relação ao seu peso (*Wh/kg*).
- Estado de carga (SoC): É a quantidade de carga restante da bateria em relação a capacidade máxima da mesma, e é dado em porcentagem.

- Estado de saúde (SoH): Com o tempo e com a ciclagem da bateria, a capacidade da mesma vai diminuindo assim como a sua impedância interna vai aumentando. O estado de saúde descreve o desempenho da bateria no presente momento em comparação com o desempenho, em condições ideais, de quando a bateria era nova. O estado de saúde é o indicador do envelhecimento da bateria mais utilizado na literatura (Chen et al., 2013).
- Estado de função (SoF): O SoF define o cenário real do desempenho da bateria na entrega da energia demandada como a proporção da energia restante para a energia máxima da bateria. O SoF pode ser determinado com os valores estimados do SoC e SoH, o perfil de carga e descarga e o funcionamento da bateria em dada temperatura (Hannan et al., 2018).

As baterias recarregáveis, dominam o mercado de dispositivos portáteis de armazenamento de energia e são largamente utilizadas tanto em VEs quanto para outras aplicações elétricas e eletrônicas. Dependendo da química, a bateria pode possuir boas características para uma dada aplicação, como alta energia específica, alta densidade de potência, perfil de descarga plano, baixa resistência, efeito de memória desprezível, ampla faixa de temperatura de operação e maior segurança. No entanto, a maioria das baterias contém materiais tóxicos e o impacto ecológico durante o descarte da bateria deve ser considerado (HABIB *et al.*, 2021).

Segundo Hannan *et al.* (2017), nas principais aplicações para VE, as baterias utilizadas são a de chumbo ácido para o sistema de baixa tensão (12 ou 24V) que alimenta centrais e dispositivos e sistemas eletro eletrônicos de baixa potência, como entretenimento, conforto, iluminação e etc, pois é robusta e barata. Já as baterias de lítio-íon são as mais utilizadas no sistema de alta tensão, devido altos valores de densidade de energia, energia específica, potência específica, desprezível efeito memória e suporta mais ciclos de carga e descarga, além de ter menor peso, o que é imprescindível para esta aplicação.

A TABELA 2 demonstra as características dos tipos mais comuns de bateria.

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DOS TIPOS DE BATERIAS

| Tipo de Bateria | Energia específica (Wh/kg) | Densidade de energia (Wh/l) | Potência Específica (W/kg) | tensão nominal da célula (V) | Eficiência (%) | Resistência interna (Ohm) | temperatura de operação (°C) | número de ciclos | Custo (Dólar/k Wh) |
|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------|--------------------|
| Chumbo ácido | 30-50 | 60-100 | 200-400 | 2.1 | 70-90 | 0.022 | -20-60 | 2000-4500 | 120 -150 |
| Níquel-Cádmio | 40-50 | 80-100 | 150-350 | 1.35 | 60-90 | 0.06 | -40 a 60 | 2000-3000 | 300-350 |
| Níquel hidreto metálico | 50-70 | 100-140 | 150-300 | 1.2 | 80-90 | 0.06 | -40 a 50 | 500-3000 | 150-200 |
| Sódio-Níquel | 86 | 150 | 150 | 2.5 | 80 | Muito baixa (aumenta com baixo SoC) | 250-350 | 2500-3000 | 160-300 |
| Lítio íon | 140 | 250-620 | 200-300 | 3.5 | 70-85 | Muito baixa | -20 a 60 | 1500 - 4500 | 150-1300 |
| Zinco-ar | 230 | 229 | 105 | 1.2 | 60 | - | - | >2000 | 90-120 |
| Alumínio-ar | 190 | 190 | 16 | 1.4 | - | alta, logo tem baixa potência | - | - | - |
| Sódio-Enxofre | 100 | 150 | 120 | 2 | 80 | 0.06 | 300-350 | 1000 | 250-500 |

FONTE: Adaptado de HANNAN *et al.* (2016)

Pode haver confusão com termos utilizados como alta e baixa tensão em veículos, pois esses termos de forma geral são mais utilizados devido a normas técnicas de instalações elétricas, como a NBR 5410, e as mesmas não se aplicam a veículos automotores. Denton (2016) explica que baixa tensão é um termo relativo, a definição varia de acordo com o contexto.

Diferentes definições são usadas na transmissão e distribuição de energia elétrica e na indústria eletrônica. As normas de segurança elétrica definem circuitos de baixa tensão que estão isentos da proteção exigida em tensões mais altas. Essas definições variam de acordo com o país e sua respectiva normativa técnica e para efeitos de nomenclatura na indústria automotiva, baixa tensão significa 12 ou sistemas 24 V e alta tensão referem-se à bateria de tração (também chamada largamente na indústria automotiva de bateria de alta tensão), motor de tração e outros componentes associados que exigem uma maior potência. Mas, de modo geral em VE, tensões entre 60 V e 1500 V são referidos como alta tensão.

2.3.1 BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO

Segundo Grupo Moura (2007) as baterias de chumbo ácido têm sido utilizadas como armazenamento de energia de forma comercial desde 1860 e são utilizadas em veículos de motor de combustão interna (MCI), para acionar o motor de partida e para acionar fornecer energia de emergência para alguma carga, pois normalmente a energia deve ser fornecida pelo alternador ou alguma outra fonte de potência. A bateria de chumbo ácido é escolhida devido sua robustez, operação segura, tolerância

a temperatura e baixo custo e cada bateria é formada por seis células ligadas em série, e cada célula produz uma tensão de aproximadamente 2,0 Volts por elemento, o que define a tensão do sistema elétrico dos veículos como 12V.

As baterias SLI (*starting, lighting and ignition*) são as baterias mais comuns em aplicações automotivas. Elas são projetadas para trabalharem em torno de 100% de SoC e não suportam uma contínua oscilação do mesmo tendo uma morte precoce, segundo Grupo Moura (2016).

Para aplicações que envolvam oscilação constante no estado de carga como aplicações com recarga inteligente ou Stop & Start. O Grupo Moura (2016) indica as baterias AGM (*absorbent glass mat*) ou EFB (*enhanced flooded battery*), pois suas características físicas propiciam uma maior durabilidade da bateria perante a grande oscilação do SoC.

A bateria EFB tem a estrutura básica similar a bateria SLI, entretanto contém aditivos químicos para suportar trabalhar em condições mais severas de carga e descarga e são recomendadas para serem aplicadas em veículos do tipo Micro híbrido.

A bateria AGM tem em sua constituição uma manta de fibra de vidro que são embebidas em ácido sulfúrico, diferente das baterias SLI em que as placas são inundadas em ácido sulfúrico, e isso confere maior robustez em relação as baterias mencionadas anteriormente em relação a situações de cargas e descarga mais extremas sem perder sua confiabilidade, entretanto ela é mais sensível a altas temperaturas (SOUZA, 2016).

2.3.2 BATERIAS DE ÍON-LÍTIO

São atualmente as melhores opções dentre as disponíveis no mercado para diversas aplicações, de gadgets portáteis a sistemas de tração dos VE devido as suas características como tamanho reduzido (de alta densidade física e energética), longevidade (capacidade e ciclos de vida), características de carga e descarga, custo, desempenho em uma ampla faixa de temperatura, baixos valores de autodescarga e de fuga de corrente. Mas o custo, emissões de gases efeito estufa na fabricação, a toxicidade (descarte e reciclagem problemáticos) e a proteção necessária para operação segura via circuito de monitoração de bateria (BMS) são os pontos negativos da utilização das baterias de íon lítio.

Este tipo de bateria durante a carga em corrente constante tem sua capacidade aumentada de forma gradual, e quando a tensão atinge o limite máximo a corrente cai exponencialmente. Na descarga a tensão e a corrente quase que se mantêm constantes, embora ocorra uma pequena redução do valor da tensão e aumento no valor da corrente até atingir o mínimo aceitável (HANNAN, 2016).

Hannan *et al.* (2018) cita que há um crescente aumento das pesquisas na área de desenvolvimento de baterias, que vem alcançando projetos de baterias mais seguras e de melhor performance e melhorias nos processos de fabricação. Aliando-se a entrada de novos fabricantes no mercado, há uma queda dos preços das baterias com o passar do tempo, pois se espera uma demanda cada vez maior, especialmente com a futura massificação dos veículos elétricos.

As baterias de íon-lítio, geralmente utilizam anodos de carbono e mistura diferentes materiais no catodo e é justamente nele que se concentram a maioria das pesquisas que visam desenvolver baterias com melhor performance, durabilidade, mais seguras, com menor custo e mais fáceis de se produzir e de reciclar. O catodo é feito de um óxido de metal de lítio, e os íons de lítio se movem na direção do mesmo durante a descarga e na direção reversa na recarga. O anodo é feito de carbono grafítico, os íons de lítio deixam o anodo quando a bateria descarrega e retornam quando a bateria é recarregada (LINDEN e REDDY, 2011).

Para a fonte de energia em VEs, as células de íon-lítio devem ser montadas em módulos que, arranjados em série e/ou paralelo, constituem uma bateria com as especificações adequadas, de corrente e tensão para atingir as demandas energéticas da aplicação. O arranjo de células em série aumenta a tensão e o arranjo em paralelo aumenta a corrente de descarga e capacidade da bateria (JUNG, 2017).

Os tipos de materiais catódicos podem ser óxido de lítio-cobalto (LiCoO_2), óxido de lítio-manganês (LiMn_2O_4), fosfato de ferro-lítio (LiFePO_4) conhecida como comercialmente como LFP, níquel-lítio-óxido de manganês-cobalto (LiNiMnCoO_2), lítio-níquel cobalto óxido de alumínio (LiNiCoAlO_2) e titanato de lítio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) comercialmente chamada de LTO.

Cada um dos tipos de materiais catódicos tem seus respectivos prós e contras e, dependendo das características da aplicação e do produto, um ou mais tipos podem ser selecionados. Nas aplicações de ônibus e caminhões elétricos as baterias mais utilizadas são as de LFP devido a durabilidade e segurança, pois podem ser submetidas a temperaturas mais altas sem entrar em combustão ou explodir.

2.4 SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIA

Baterias de íon-lítio são dispositivos muito complexos, caros e sensíveis que e tem risco de explosão e incêndio devido a certas falhas como sobre temperatura, sobre carga e curto circuito (CHEN, 2018). Logo, se faz necessário fazer o controle e o monitoramento das mesmas de modo a obter uma aplicação robusta e segura.

O sistema de monitoramento de bateria, chamado de *Battery management system* – BMS, é uma combinação de hardware e software que gerencia e realiza todo o controle do ESS e da transferência de potência elétrica nos VE. Realiza funções como o controle de carga e descarga, monitoramento e balanceamento da tensão das células da bateria, equalização de carga, controle de temperatura, proteção da bateria, avaliação dos estados das células e do conjunto bateria, diagnóstico de falha (EMADI, 2015).

O BMS avalia os dados da bateria como temperatura, corrente e tensão, dados do histórico da mesma e se baseando em algoritmos, realiza os diagnósticos de falhas relativos aos processos de armazenamento e distribuição de energia. Para fazer a gestão adequada, o BMS requer o histórico de dados do sistema de bateria como tensão, SoC, temperatura, condições de carga e descarga e etc. (HU, 2011).

O BMS deve estar conectado ao VCU/BCM do VE, onde este supervisiona as ações do BMS e produz saídas com os comandos necessários para a operação do veículo, com isso o sistema BMS deverá contar com uma interface de comunicação para interagir com a VCU e diretamente com outros sistemas do veículo que estejam sobre seu gerenciamento, isso se dá geralmente via rede CAN.

2.4.1 MONITORAMENTO DA CÉLULA DA BATERIA

As células de bateria podem se comportar de modo diferente quando em operação, isto é, o comportamento dinâmico das células pode ser diferente, por isso é importante monitorar continuamente as células da bateria de modo a obter suas condições reais.

Os dados deste monitoramento são utilizados na otimização do desempenho do sistema, proteção, equalização e controle das operações. Isso indica a necessidade do controle de carga e descarga, a necessidade de proteções das células contra sobre carga ou sub carga, o controle da temperatura e do calor gerado, de

interface de comunicação e de aquisição de dados, e diagnóstico e avaliação de falhas, etc. Esse monitoramento geralmente se dá por sensores de tensão, temperatura e corrente, além de sensores de fuga.

As células da bateria de íon-lítio requerem carregamento de corrente constante para mantenham uma tensão mais ou menos constante durante a operação. As mudanças anormais nos valores de corrente e tensão da bateria pode causar falha do sistema ou até mesmo incêndio. Assim, o monitoramento dos níveis de corrente e tensão das células da bateria são essenciais para proteger as células de sobrecorrente / tensão e subcorrente / tensão. Além disso, os dados armazenados do ESS podem ser levados em consideração para que o VE possa sinalizar ou tomar decisões sobre ações em caso de falha (HOQUE et al., 2016; HANNAN et al., 2018).

2.4.2 CONTROLE DE CARGA E DESCARGA

O desempenho e durabilidade da bateria de íon-lítio depende principalmente de como é sua carga e descarga. O carregamento e descarregamento otimizado respeitando os limites estabelecidos pelas características das células, aumenta a eficiência e a vida útil da bateria. O BMS, ou a VCU baseada em informações do BMS, pode verificar se a descarga da bateria está condizente com a carga do veículo que fora ativada.

O Controle eficiente dos ciclos de carga remove o efeito de memória e aumentam a vida da bateria. Recomenda-se carregar as baterias de lítio íon pelo método corrente constante - tensão constante, controlador de carga otimizada PI (integral proporcional) e para descarregar a bateria de íons de lítio pelo modo de corrente descontínua (HOQUE et al. 2016; HANNAN et al. 2018).

2.4.3 CÁLCULO DOS ESTADOS DA BATERIA

Os cálculos dos estados da bateria (SoC, SoH e o SoF) são importantes para se definir parâmetros operacionais para a confiabilidade e integridade do ESS e consequentemente do VE.

O SoC define o status de carga e a profundidade de descarga da bateria de íon-lítio. O SoC é estimado por meio de algum tipo de algoritmo e dependendo dos

valores de corrente, tensão e temperatura das células da bateria (EMADI, 2015; XIONG et al. 2012).

Segundo Lu (2013), o SoH é estimado pelo método de ciclo aberto baseado em modelo de durabilidade, que se baseia no mecanismo de perda de íons de lítio (por isso modelos são necessários, pois não se obtém esse dado em uma aplicação real), que resulta na redução da capacidade e no aumento de resistência interna (XIONG et al. 2012).

O SOF pode ser determinado com os valores estimados do SoC e SoH, o perfil de carga/descarga e a temperatura de operação. Os valores dos estados da bateria (SoF, SoH e SoC) podem demonstrar e prever a condição geral e o desempenho do ESS em VE para que as ações necessárias possam ser tomadas em conformidade com o status real e atual da bateria.

2.4.4 PROTEÇÃO DA BATERIA

Os consecutivos ciclos de carga e descarga podem causar um desequilíbrio de tensão ou/e de carga entre as células da bateria por causa de mudanças em suas características físicas. Este desequilíbrio acontece devido à desvios de fabricação, temperatura de operação e problemas de envelhecimento das células. Os desequilíbrios de tensão e carga podem reduzir o desempenho geral e durabilidade do ESS (XIONG et al. 2013).

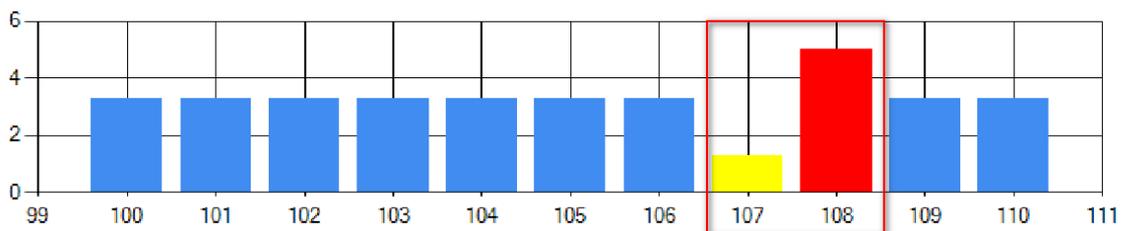
O excesso de carga pode fazer a célula entrar em instabilidade química e causar inclusive explosão, enquanto a sub carga pode danificar as propriedades químicas da bateria de modo irreversível e encurtar a vida útil das células da bateria (XIONG et al. 2017). O BMS, de modo direto ou indireto, pode limitar ou até mesmo encerrar o carregamento e o descarregamento, da bateria quando algum parâmetro estiver fora da faixa de operação adequada para bateria, seja esse parâmetro do veículo ou da bateria.

As proteções de tensão / corrente, sobretensão, curto-circuito, sobrecorrente, fuga de corrente etc., são feitas pela incorporação de sensores, relés, contatores, disjuntores e outros dispositivos que podem ficar no pack de bateria ou na HVDU (*high voltage distribution unit*) (HUBER e SUHNER, 2020), mas são geralmente comandados ou pelo menos monitorados pelo BMS.

2.4.5 BALANCEAMENTO E EQUALIZAÇÃO DE CÉLULAS

Um sistema BMS com monitoramento e equalização de carga célula a célula, pode evitar que as células da bateria tenham anomalias causadas por sobre ou subcarga, melhorando o desempenho geral de um sistema de armazenamento de energia para alimentar VEs (HOQUE, 2016). O BMS monitora continuamente a tensão, corrente e temperatura das células da bateria e detecta uma célula com carga desequilibrada por meio da estimativa do estado de carga (SOC) de cada célula da bateria e também pode detectar uma célula com tensão desequilibrada por meio da tensão adquirida célula a célula. Na Figura 6 pode se ver uma leitura de tensão hipotética de um ESS no qual é possível verificar o desequilíbrio de tensão nas células 107 e 108.

FIGURA 6 – DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO



FONTE: O Autor (2021)

Habib, (2020) diz que o processo de equalização é realizado pela transferência do excesso de carga da célula sobrecarregada para outra célula/módulo/pack através de um hardware específico, que visa transferir a carga necessária até que todas as células se tornem uniformes em carga ou nível de tensão dentro da faixa de operação. Essa operação é monitorada e comandada pelo BMS.

O balanceamento pode proteger as células contra danos e aumentar a eficiência e vida útil da bateria.

2.4.6 CONTROLE E GERENCIAMENTO DE ENERGIA

Minimização de uso indevido e perdas de potência é o principal desafio das pesquisas que visam encontrar um modo mais eficaz para distribuição e utilização de energia em VEs e, segundo Denton (2016), um sofisticado sistema de gerenciamento de bateria pode aumentar a autonomia VE em até a 10%, sem alterar a química da bateria.

Sem gerenciamento da energia sobre o sistema de tração e cargas auxiliares o desempenho geral do sistema é reduzido (ZHANG et al., 2015). Além disso dispositivos elétricos e eletrônicos tornam-se menos eficientes devido à operação fora da faixa estabelecida e potência instável fornecida pelo sistema de energia.

Sistema de gerenciamento e controle de energia é a solução para gerenciar a distribuição de energia estabilizada e controlada para o sistema elétrico do VE com eficiência e inteligência (HANNAN et al., 2018).

Devem ser consideradas todas as características do veículo e da bateria para fazer o gerenciamento energético de um VE. Tal gestão é vital para melhorar o desempenho do sistema, a durabilidade, a segurança, qualidade de energia e também para reduzir perdas e operação e custos de manutenção, além de poder identificar alguns problemas com as cargas consumidoras.

2.4.7 CONTROLE DA TEMPERATURA DE OPERAÇÃO DAS BATERIAS

O sistema de baterias de íon-lítio em um VE precisa ser operado em uma determinada faixa de temperatura. O sistema de controle de temperatura monitora a condição de temperatura do através de sensores de temperatura nas células e esse monitoramento e controle contínuo da temperatura do sistema de armazenamento da bateria no VE mantém a operação eficiente do sistema de armazenamento e protege a bateria contra degradação e até mesmo explosão.

Com base nas medições de temperatura e no algoritmo de controle de térmico do BMS, o mesmo solicita a VCU a ativação do sistema de regulação térmica que pode acionar o sistema de resfriamento ou aquecimento, para regular a temperatura do ESS de modo a propiciar seu funcionamento dentro dos limites estabelecidos (HOQUE *et al.* 2016).

2.5 UNIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO (HDVU)

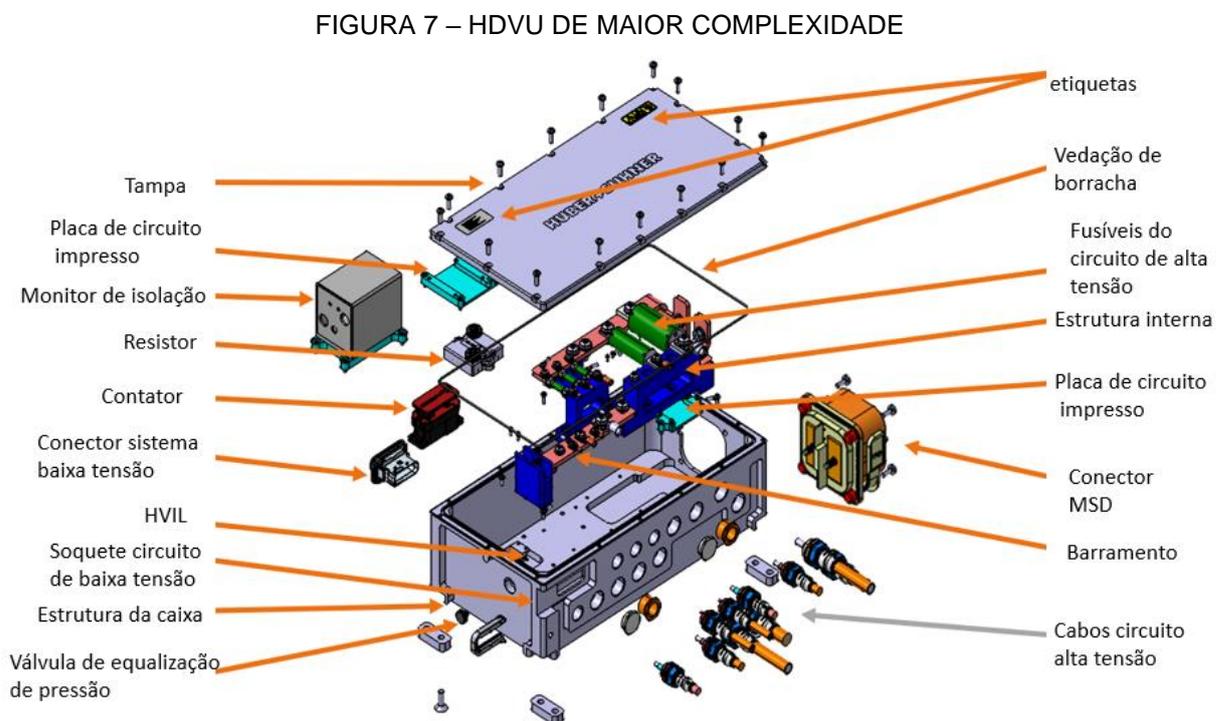
O sistema de alta tensão dos veículos elétricos, de modo análogo a uma instalação industrial, contém os seus respectivos dispositivos de medição, proteção e manobra de modo a garantir o controle, a integridade e a segurança do sistema.

De maneira mais geral, a indústria automotiva aloca tais dispositivos em invólucros resistentes, com a devida proteção contra intempéries, que possibilitem

fácil montagem, manutenção e flexibilidade e que tem recebido o nome de Unidade de distribuição de alta tensão ou HVDU (*High voltage distribution unit*), (HUBNER e SUHNER, 2020). Os modelos mais simples, podem conter apenas barramentos para derivação e para comportar alguns fusíveis.

Em carros de passageiros elétricos, pode haver um módulo de controle da bateria (BPCM), geralmente integrado a bateria. Este módulo contém o controlador de hardware, incluindo os drivers para os contatores, realiza medições de corrente, coleta as medições de tensão de célula e temperatura, aplica a lógica de controle correspondente e supervisiona o diagnóstico, o gerenciamento de erros e a comunicação com o BMS (EMADI, 2015).

Em veículos grandes, como caminhões e ônibus, a maior parte dessas funções são frequentemente executadas por HVDU mais complexas, pois ao centralizar todas essas funções em um único módulo de fácil acesso, reduz os tempos de diagnose e reparação, um exemplo de uma HVDU deste tipo pode ser visto na Figura 7.



FONTE: Adaptado de Huber + Suhner (2020).

Os principais componentes apresentados são descritos a seguir.

- Placa de circuito impresso: pode ter múltiplas funções, a mais comum é ser utilizada para comunicação entre as centrais do veículo para enviar comandos como acionamento de contatores e receber status

dos componentes/sistemas internos à HVDU, tais funções podem ser comandadas/gerenciadas pela VCU ou diretamente pelo BMS, depende da arquitetura do veículo.

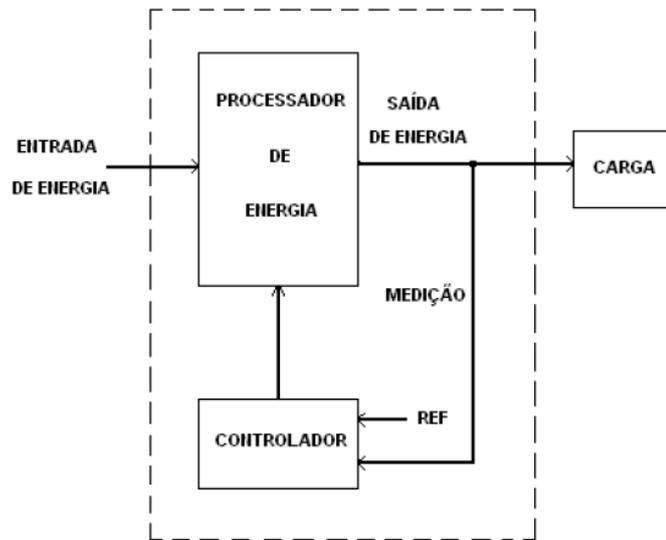
- Resistor de pré carga: utilizado para reduzir a corrente inicial dos inversores (corrente de carga dos capacitores do inversor), pois aliado com a capacitância do sistema (cabo + entrada inversor) gera uma constante de tempo maior RC que faz de modo mais suave a energização dos sistemas.
- Contator: Faz a conexão entre a baterias com os circuitos consumidores e executa a função de pré carga.
- Monitor de Isolação monitora a integridade da isolação elétrica dos sistemas do veículo, pois tanto o negativo, quanto o positivo do sistema de alta tensão é isolado da massa.
- Conector/soquete de baixa tensão: são através deles que sinais do tipo CAN, 24V, 12V, 5V ou GND entram e saem da HDVU.
- HVIL (*High-Voltage Interlock*): sistema que detecta adulteração ou abertura do circuito de alta tensão ou chave seccionadora de serviço.
- MSD (*manual service disconnect*): É a chave seccionadora de serviço, utilizada para fazer a desconexão do circuito da bateria dos circuitos consumidores em caso de uma manutenção.
- Apesar de não estar na Figura 11, pode se ter ainda uma medição da tensão do barramento da HVDU além de um sensor de corrente para contagem de Coulomb, informação importante para o sistema BMS.
- Vedação de borracha: É utilizada para evitar a entrada de corpos estranhos (líquidos ou sólidos) no interior da HVDU, tal proteção se faz necessário para atingir o grau de proteção IP especificado para uma dada aplicação.

2.6 CONVERSOR ESTÁTICO DE POTÊNCIA EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

Segundo Souza (2017) os conversores DC/DC e os inversores fazem parte do grupo de dispositivos eletrônicos denominados Conversores Estáticos de Potência (CEP) que é a aplicação da eletrônica de estado sólido para controle e processamento

de potência elétrica em que há a conversão da forma de energia elétrica disponível em uma outra adequada à carga ser alimentada, esquema de um conversor genérico conforme Figura 8Figura 1.

FIGURA 8 – CEP - ESQUEMÁTICO



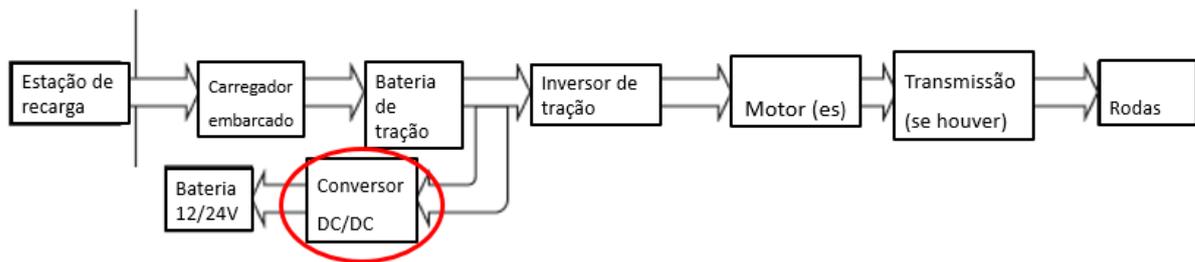
FONTE: Souza (2017).

Bellur e Kazimierczuk (2007), relatam que em veículos eletrificados, do híbrido até os VEB, existe uma bateria de alta tensão para a propulsão, e uma bateria de baixa tensão para cargas auxiliares (iluminação, centrais eletrônicas, dispositivos de multimídia e conforto e etc). Quando não há a presença MCI, não há a presença de um alternador para gerar a potência elétrica necessária para alimentar as cargas auxiliares e recarregar a bateria do circuito de baixa tensão (12V ou 24V), logo há a necessidade de um conversor de potência do DC/DC para transferir potência do circuito de alta tensão para o circuito de baixa tensão de modo compatível com o último visando suprir a demanda das cargas auxiliares (EMADI, 2015).

O esquemático da arquitetura elétrica simplificada de um veículo eletrificado pode ser visto na Figura 9.

Com a crescente troca de componentes/sistemas mecânicos, hidráulico e até pneumáticos por sistemas elétricos e com a crescente aumento da eletrônica embarcada focada em segurança, conforto e entretenimento a demanda elétrica a bordo cresceu, com isso há a necessidade cada vez maior de se desenvolver conversores cada vez mais compactos, eficientes e potentes (BELLUR e KAZIMIERCZUK, 2007).

FIGURA 9 – ARQUITETURA ELÉTRICA SIMPLIFICADA DE UM VEÍCULO ELÉTRICO



FONTE: Adaptado de DENTON (2016).

Segundo TDK (2009) o emprego de transformadores também possibilita o aumento da potência do conversor DC/DC, dependendo da arquitetura utilizada no conversor se consegue atingir potências de alguns kilowatts, por exemplo por meio de conversores do tipo ponte completa (*full bridge*).

O conversor DC/DC mais utilizado em aplicações de VE é o conversor abaixador de tensão (*step down*), pois é o responsável por converter a tensão da entrada DC oriunda da bateria (alta tensão) para um valor de tensão DC menor da saída, que pode ser 12, 24 ou 48V, que alimenta o sistema de baixa tensão do veículo. São altamente eficientes, atingindo eficiências maiores do que 90%, além de ter entrada em tensão e saída em corrente (BARBI, 2000).

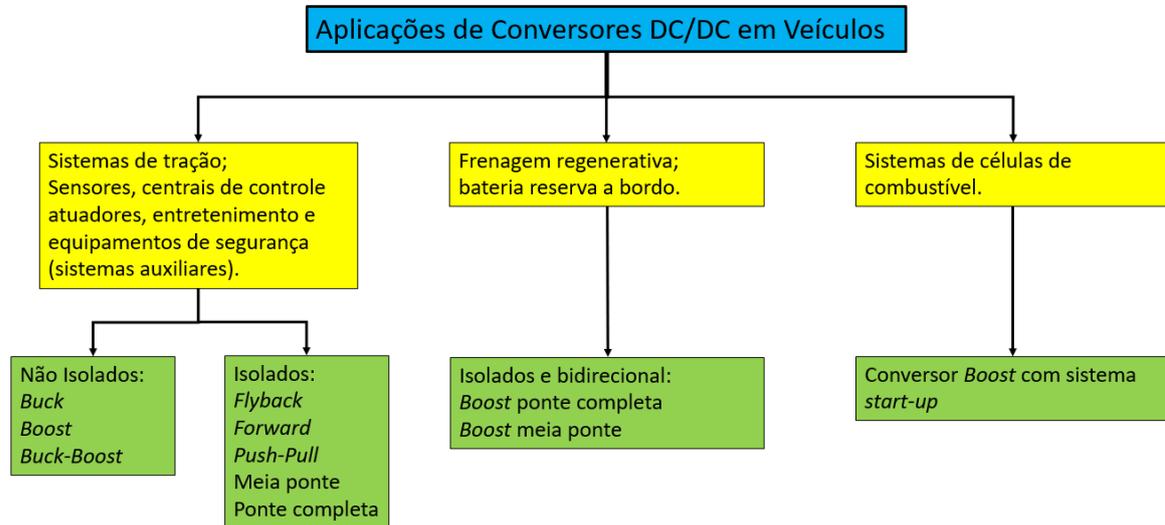
Assim como existem conversores abaixadores, existem também os conversores elevadores de tensão (*step up*) e os abaixadores/elevadores que dependendo do *duty cycle* pode realizar ambas as funções (POMILIO, 2021), entretanto estes conversores não são muito utilizados em VE para sistemas auxiliares.

Como em um veículo elétrico o conversor DC/DC principalmente realiza a conversão elétrica entre o sistema de alta tensão e o sistema de baixa tensão, um isolamento galvânico deve ser usado por razões de segurança. Isso garante que uma falha no sistema de alta tensão não afetará o sistema de baixa tensão podendo inclusive desligar ou deixar o veículo inoperante. O oposto também é verdade, pois com o isolamento galvânico o sistema de alta tensão estaria protegido caso ocorra uma falha no sistema de baixa tensão, que é acessível facilmente pelo usuário, tendo risco maior de sofrer falhas devido ao mau uso, (EMADI, 2015).

Existe também versões isoladas dos conversores Cuk, SEPIC e SEPIC duplos e muitas outras versões de conversores, entretanto a grande maioria baseia-se principalmente em (ou são versões estendidas) topologias já apresentadas (BELLUR e KAZIMIERCZUK, 2007).

A Figura 10 apresenta de forma esquemática os conversores e suas respectivas aplicações em veículos.

FIGURA 10 – APLICAÇÃO DE CONVERSORES DC/DC EM VEÍCULOS



FONTE: Modificado de BELLUR E KAZIMIERCZUK (2007).

2.6.1 INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

De acordo com Souza (2017), a função de módulo inversor é converter um sinal contínuo de entrada para um sinal alternado de saída de amplitude e frequência desejada, sendo que a amplitude do sinal de saída poderá ser fixa ou variável assim como a frequência do mesmo. Em aplicações em veículos elétricos os inversores tem sido utilizados para comandar o sistema de tração, além dos sistemas auxiliares que demandam maior energia como bomba de direção hidráulica, sistema de ar condicionado, sistema de freio pneumático ou hidráulico (DENTON,2016).

2.6.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE CARACTERÍSTICAS DOS CEP

Os conversores DC-DC atuais conversores são operados por chaveamentos de alta frequências (10 kHz - 1 MHz), pois o tamanho e peso dos componentes reativos são drasticamente reduzidos em operações em frequência mais altas. As chaves de estado sólido mais comuns são as do tipo MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*), e IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

O IGBT é mais largamente utilizado em inversores pois a sua classificação de tensão pode chegar a 1600 V, logo são escolhidos em relação ao MOSFET em aplicações que demandam maior potência, entretanto tem menor frequência de operação que os MOSFET.

Em VE está ocorrendo a migração de inversores de tração do IGBT para o MOSFET, mas em termos de sistemas auxiliares, devido ao custo ainda não há essa tendência de migração.

2.7 BALANÇO ENERGÉTICO

Segundo Souza (2016), para que os sistemas eletroeletrônicos dos veículos funcionem de modo adequado e que a bateria de baixa tensão não sofra descargas profundas, há a necessidade de se fazer um cálculo de balanço elétrico com o objetivo de garantir a recarga de energia elétrica do veículo.

Para o cálculo de balanço energético a Fiat Chrysler Automobiles (FCA) convencionou que O SoC inicial da bateria é de 80%. Para a utilização de cargas elétricas deve se levar em conta o conteúdo eletroeletrônico do veículo (conteúdo de série e opcionais) e o perfil de utilização dessas cargas pelo usuário (usuário de um carro esportivo é diferente de um usuário de uma van). O cálculo leva em conta as cargas elétricas principais, as mais utilizadas e o seus respectivos percentuais de utilização, com isso se obtém o consumo elétrico médio estimado do veículo.

A Tabela 3 apresenta, a título de exemplo, o levantamento de cargas de um veículo Fiat Bravo 1.8 com cambio Dualogic. Podem ser verificadas as cargas elétricas consideradas permanentes e as consideradas temporárias, nestas últimas inclui-se os respectivos percentuais de utilização (SOUZA, 2016).

Como o veículo utilizado no exemplo é um veículo movido por um MCI, deve se levar em consideração o trajeto e o respectivo perfil de velocidade e relações de marcha para o cálculo, já que a geração de corrente nesse tipo de veículo é suprida por alternadores que tem a corrente de saída em função da rotação do MCI. Entretanto, em VE não há essa necessidade, pois como a corrente do conversor DC/DC é independente da rotação/velocidade do veículo o cálculo fica mais simples.

TABELA 3 – TABELA DE CARGAS BRAVO 1.8 MTA

| Motorização 1.8 MTA - Ar Condicionado | | |
|---|------------------|--------------|
| CARGAS ELÉTRICAS PERMANENTES | | [A] |
| Quadro de instrumentos + injeção | | 3,20 |
| Luz posição, placa | | 3,30 |
| Faróis baixo | | 9,20 |
| Eletro-ventilador clim. habitaculo | Média vel. (50%) | 7,70 |
| | Máx. Vel. (50%) | 25,50 |
| Auto Rádio | | 2,00 |
| Vent radiador vel. Alta | | 26,50 |
| Sistema de injeção | | 10,00 |
| Compressor ar condicionado | | 3,00 |
| Câmbio MTA | | 6,00 |
| Total das cargas permanentes [A] | | 79,80 |
| CARGAS TEMPORÁRIAS | | [%] [A] |
| Luzes de freio | 33 | 5,00 |
| Indicador de direção | 25 | 2,50 |
| Vidro Térmico | 25 | 15,70 |
| Limpador Para-Brisa (max. vel.) | 20 | 3,50 |
| Limpador vidro traseiro | 5 | 2,00 |
| Sistema de Partida | 5 | 0,00 |
| Total de cargas temporárias [A] | | 7,00 |
| Total de cargas inseridas [A] | | 86,80 |

FONTE: SOUZA (2016)

Cada tipo de aplicação e mercado tem um trajeto base (ciclo de teste e cálculo) para verificação em condição severa de uso, onde a utilização de carga é alta e a média de velocidade é baixa. Como critério de aceitação na condição anteriormente mencionada aceita-se até um balanço elétrico negativo de -12%, isto é, se for utilizado uma bateria de 50 Ah, há um limite para descarga de até 6 Ah, pois entende-se que em uso normal a bateria irá se recarregar.

Quando o limite de 12% de descarga da bateria for ultrapassado há de se recorrer a soluções técnicas aceitáveis visando contornar o problema com uma ou mais das seguintes soluções: redução da carga, por redimensionamento de sistema ou utilização de componentes mais eficientes; aumento da capacidade da bateria; e aumento da potência da fonte de energia utilizada.

Em veículos que tem MCI há ainda a possibilidade de se aumentar a rotação de mínimo (*idle*) do MCI e aumentar a relação de transmissão entre polia do alternador e polia do motor, em ambas a rotação do alternador irá aumentar o que proporcionará uma corrente instantânea maior para o sistema elétrico (Souza 2016).

2.8 REDE CAN

Segundo BOSCH (2005) a rede CAN se tornou padrão em veículos, pois interconecta as diversas centrais eletrônicas de um veículo por um único barramento de dados, eliminando a multiplicidade de conexões elétricas e na redução da

probabilidade de falha total, pois é “*multi-master*”, no qual várias unidades eletrônicas de mesmo nível de prioridade são interconectadas em uma estrutura linear e que a falha de um componente integrante do sistema não impede o acesso dos demais a rede.

A rede CAN é do tipo serial e trabalha com transmissão de dados de 125kbps até 1Mbps e, ao contrário de uma rede tradicional, como USB ou Ethernet, a rede CAN não envia grandes blocos de dados ponto a ponto, isto é, do nó A ao nó B sob a supervisão de um dispositivo mestre central. Em uma rede CAN muitas mensagens curtas como temperatura ou RPM são transmitidas para toda a rede, o que permite a consistência dos dados em todos os nós do sistema, já que rede liga todos os nós conectados a um barramento e permite que eles conversem uns com os outros e também que os nós podem ser adicionados a qualquer momento, mesmo enquanto a rede está em operação (*hot-plugging*).

Ainda segundo BOSCH (2005), a norma ISO 11898 especifica a camada de vínculo físico e de dados (níveis 1 e 2 do modelo ISO/OSI) CAN com identificadores de 11 ou 29 bits. A versão de 11-bits é frequentemente citada como versão CAN 2.0A, enquanto a versão 29-bits é citada como CAN 2.0B. A SAE também padronizou a CAN na SAE J 22548 (automóveis de passageiros) e na SAE J1939 (caminhões e ônibus).

A CAN de 11 bits fornece 211 ou 2048 identificadores de mensagens diferentes, enquanto a versão CAN de 29 bits fornece 229, ou 537 milhões de identificadores de mensagens diferentes.

Segundo WEG (2019), o protocolo de comunicação CAN é do tipo CSMA/CD+AMP, que significa que uma colisão será resolvida na arbitração de bit, baseado na pré programação de prioridade da mensagem no campo identificador da mensagem. A mais alta prioridade identifica quem vencerá o acesso ao barramento.

Ainda segundo Corrigan (2002), o protocolo CAN é diferencial, o que justificativa a boa tolerância a ruído e falha. O sinal diferencial balanceado reduz o acoplamento de ruído e permite alta taxas de transmissão sobre cabo de par trançado.

2.9 BOMBAS VOLUMÉTRICAS

As bombas volumétricas, ou de deslocamento positivo succionam o fluido hidráulico de um reservatório e o descarrega em uma linha hidráulica confinada, transferindo assim energia hidráulica para o fluido.

Sua função é a conversão da energia mecânica em energia hidráulica, que em uma segunda etapa será novamente convertida em energia mecânica através de atuadores (MERRT, 1967).

A pressão em um sistema hidráulico não é gerada pela bomba, mas é resultado da resistência à vazão imposta pelo sistema elementos do circuito hidráulico, sendo que tal resistência é o resultado das forças exteriores e interiores do sistema, e que através da energia hidráulica convertida pela bomba, que há a possibilidade de se executar trabalhos mecânicos dos mais variados ao se gerar no fluido uma pressão suficientemente elevada para vencer tais oposições (LINSINGEN, 2001).

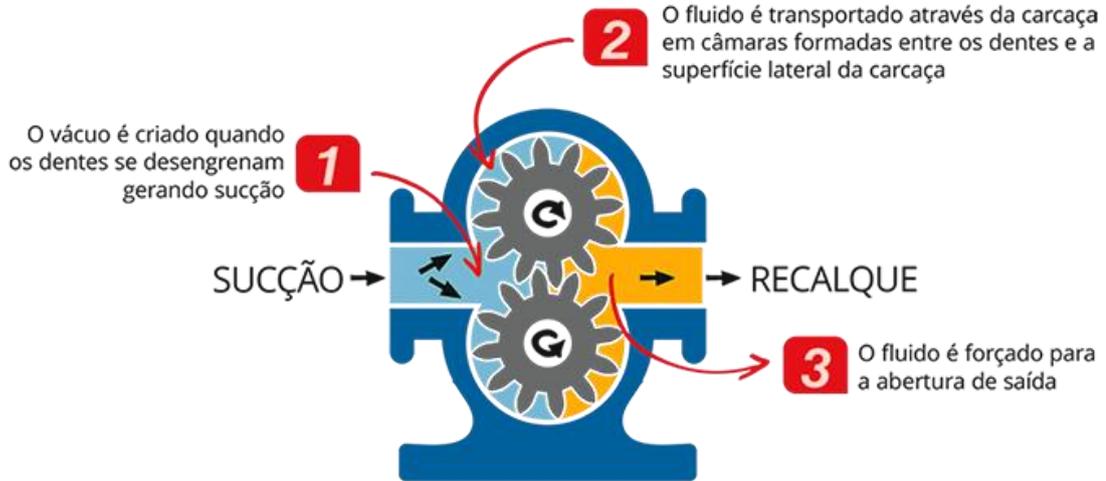
As bombas de deslocamento positivo são divididas em relação ao tipo de deslocamento do fluido:

- As bombas de deslocamento variável: onde é possível variar a vazão para uma certa rotação, que pode ter ou não dispositivos de compensação de pressão. Neste grupo de bombas se enquadram as bombas de palhetas e de pistões.
- As bombas de deslocamento fixo: Deslocam um volume fixo constante por rotação, logo a vazão é diretamente relacionada com a rotação da bomba, neste grupo se enquadram as bombas de engrenagens, de parafusos, pistões e de palhetas, (BRASIL, 2010).

O manual técnico de produto da Bosch Rexroth (2019) relata que o tipo mais comum de bomba em aplicações em veiculares para circuitos auxiliares são as de engrenagens externas.

Uma bomba de engrenagem consiste, basicamente, de uma carcaça de metal com entrada e saída, e de um mecanismo de bombeamento composto de duas engrenagens. Sendo uma das engrenagens denominada engrenagem motora, pois é ligada a um eixo que é conectado a um elemento acionador. A outra engrenagem é a engrenagem movida. No lado da entrada, os dentes das engrenagens desengrenam, o fluido entra na bomba, sendo conduzido pelo espaço existente entre os dentes e a carcaça, para o lado da saída onde os dentes das engrenagens engrenam e forçam o fluido para fora do sistema. Uma vedação positiva neste tipo de bomba é realizada entre os dentes e a carcaça, e entre os próprios dentes de engrenamento (BRASIL, 2010). Um esquema de bomba de engrenagens pode ser visto na Figura 11.

FIGURA 11 – BOMBA DE ENGRENAGEM – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO



Fonte: WORTECBOMBAS (2021)²

Esse tipo de bomba apresenta diversas vantagens: boa eficiência, inclusive em altas pressões de operação; compacta e leve; robusta, pois feita apenas com dois componentes móveis e é resistente aos efeitos de cavitação, tem alta tolerância à contaminação dos sistemas e grande faixa de rotações possíveis em regime contínuo; e é simples e versátil, construída com mancal de apoio no eixo, feita com poucos componentes, e é compatível com vários fluidos, o que possibilita a sua utilização nas mais diversas aplicações e torna seu custo inferior se comparado a outros tipos de bombas (von LINSINGEN, 2001).

Segundo Brasil (2010) as bombas são geralmente especificadas pelo seu deslocamento em litros por minuto, em uma determinada rotação por minuto e pela capacidade máxima de pressão de operação. Bosch Rexroth (2019) define as equações base para se dimensionar uma bomba de engrenagens como as apresentadas nas equações (2), (3) e (4):

$$q_v = \frac{Vg \times n \times \eta_v}{1000} \quad (2)$$

$$M = \frac{Vg \times \Delta p}{20 \times \pi \times \eta_{hm}} \quad (3)$$

$$P = \frac{2\pi \times M \times n}{60000} = \frac{q_v \times \Delta p}{600 \times \eta_t} \quad (4)$$

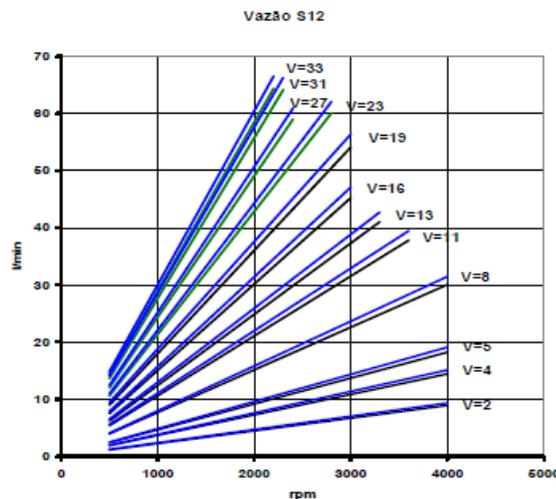
² Disponível em: <<https://www.wortecbombas.com.br/bombas-de-engrenagens/>>. Acesso em: 15 de agosto de 2021.

onde M representa o torque (N.m), V_g o deslocamento volumétrico (cm^3/rpm), Δp a pressão diferencial, isto é pressão saída menos pressão da entrada (bar), η_{hm} a eficiência mecânico-hidráulica, q_v a vazão (l/min), V_g o deslocamento volumétrico (cm^3/rpm), n a rotação (rpm) e η_V a eficiência volumétrica.

Características importantes como a rotação máxima e a faixa de pressão de uma bomba são determinadas pelo fabricante, baseadas na vida útil da bomba. Caso uma bomba seja submetida a condições fora do estipulado pelo fabricante sua vida útil será reduzida (BRASIL, 2010).

Na Figura 12, segue um exemplo de um gráfico vazão x rotação de uma série de bombas de engrenagens, com seus respectivos deslocamentos volumétricos (na figura Figura 12 identificado como V), onde a linha azul escura representa a curva em pressão máxima contínua e a linha clara é na pressão máxima intermitente. Nesta figura é possível perceber a relação direta entre rotação e vazão, estando de acordo com a equação (2) e com a própria definição das bombas de deslocamento fixo.

FIGURA 12 – GRÁFICO DE VAZÃO X ROTAÇÃO BOMBAS S12

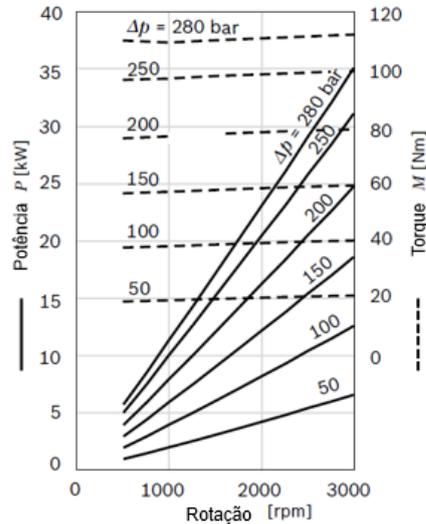


FONTE: Catálogo HYBEL (2018).

Geralmente as curvas de torque e a da potência absorvida pela bomba em relação a pressão estão disponíveis nos catálogos dos fornecedores, logo o cálculo que geralmente é necessário é o da equação (2) para definir o deslocamento volumétrico baseado na vazão necessária para aplicação, entretanto e se faz necessário conhecer as pressões envolvidas no sistema que a bomba será aplicada e as limitações das bombas com relação a rotação e a pressão, exemplo de curva de torque e potência pode ser visto na Figura 13. Na Tabela 4 é apresentado um exemplo

das características chaves de bombas de engrenagem de uma mesma família, com as suas respectivas limitações.

FIGURA 13 – GRÁFICO DE POTÊNCIA X TORQUE DE ACORDO COM A PRESSÃO



FONTE: Modificado de BOSCH REXROTH (2019).

TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS BOMBAS HYBEL DE ENGRENAGENS

| Parâmetro | Unidade | Opções Volumétricas | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 14 | 16 | 19 | 23 | 25 | 28 | 33 | 38 | 44 | 52 | 57 | 61 | 73 |
| Tamanho Nominal | TN | 14 | 16 | 19 | 23 | 25 | 28 | 33 | 38 | 44 | 52 | 57 | 61 | 73 |
| Deslocamento Volumétrico | cm ³ /rot | 1,7 | 15,7 | 18,6 | 22,7 | 24,6 | 27,7 | 32,5 | 37,5 | 43,4 | 51,3 | 57,1 | 61,2 | 73,3 |
| | in ³ /rot | 0,84 | 0,96 | 1,13 | 1,38 | 1,5 | 1,69 | 1,98 | 2,29 | 2,65 | 3,13 | 3,5 | 4,5 | 5,3 |
| Pressão Máxima Contínua | bar | 250 | | | | | | | 220 | 180 | 160 | 140 | 120 | 100 |
| Pressão Máxima Intermitente | bar | 280 | | | | | | | 250 | 200 | 180 | 170 | 140 | 120 |
| Pressão de Partida | bar | 300 | | | | | | | 280 | 250 | 220 | 200 | 180 | 160 |
| Rotação Máxima | rpm | 3400 | 3300 | 3100 | 3000 | 2800 | 2600 | 2500 | 2200 | | | | | |
| Rotação Mínima | rpm | 500 | | | | | | | | | | | | |

FONTE: Catálogo HYBEL (2018)

2.10 IMPLEMENTO TIPO CESTO AÉREO

Conforme descrição do Anexo XII da NR 12, considera-se cesto aéreo o equipamento destinado à elevação de pessoas para execução de trabalho em altura, dotado de braço móvel, articulado, telescópico ou misto, com caçamba ou plataforma e Copel Distribuição, 2020 adiciona que os mesmos podem ser do tipo de caçamba ou plataforma acoplada e pode ser com ou sem isolamento elétrico.

O implemento é o equipamento ou conjunto de equipamentos que são instalados na carroceria dos caminhões, a Figura 14 mostra o implemento do tipo

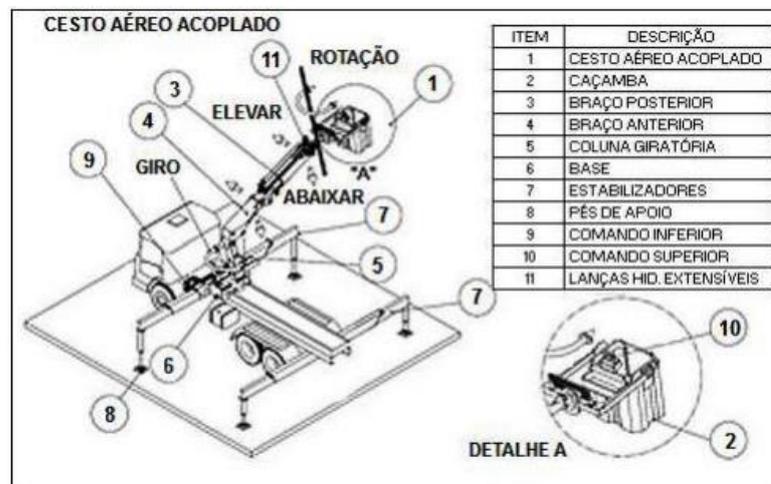
cesto aéreo instalado em um caminhão e a Figura 15 traz uma vista dos principais componentes do conjunto cesto aéreo.

FIGURA 14 – CAMINHÃO COM IMPLEMENTO DO TIPO CESTO AÉREO



FONTE: Catálogo IMAP (2019).

FIGURA 15 – EXEMPLO DE ARRANJO COM CESTO ACOPLADO



FONTE: BRASIL (2013).

Comando é o sistema responsável pela execução de uma função, é a interface entre o operador e os atuadores. O comando inferior é responsável por movimentar as sapatas (o comando das sapatas pode ser deslocado para a parte traseira do veículo de modo a possibilitar a visualização da movimentação dos estabilizadores pelo operador) e o cesto aéreo, este último somente deve ser feito pelo comando inferior somente em caso de emergência (resgate) conforme NR12.

O comando superior é responsável exclusivamente por comandos de movimentação e por questão de segurança devem ser do tipo homem morto, isto é,

as alavancas devem voltar à posição neutra quando soltos pelo operador, sendo os montados junto à cesta dotados de sistema de travamento (gatilho) que impede o acionamento acidental.

Os comandos de operação podem incluir inclusive acionamento do MCI do veículo a distância, já que a movimentação do conjunto cesto aéreo demanda potência hidráulica que é fornecida pela bomba com acionamento MCI, e dependendo da aplicação, pode haver também um comando para elevar a rotação de mínimo do motor (*idle*), já que para certos comandos ou funcionalidades há a necessidade de um valor maior de vazão, e a como a mesma é diretamente proporcional a velocidade de rotação da bomba e conseqüentemente do MCI.

Também por razão de segurança o comando inferior tem prioridade em relação ao comando superior, além de haver uma válvula seletora que permite a seleção do circuito hidráulico dos estabilizadores ou do comando de movimentação da cesta. Na Figura 16 é possível ver exemplos de comando superior (A) e comando inferior (B):

FIGURA 16 – IMAGEM COMANDO SUPERIOR E COMANDO INFERIOR



Fonte: O autor (2020)

De acordo com a NR12, o guindaste veicular é a parte que confere mobilidade ao conjunto cesto aéreo e se trata de um dispositivo mecânico composto de braços articulados móveis, telescópico ou mistos, que para sua movimentação precisa de energia hidráulica que é fornecida por uma bomba hidráulica e cada tipo específico de equipamento, pode ter um requisito de pressão e vazão para seu adequado funcionamento de acordo com suas características como alcance de trabalho, tamanho, capacidade de carga e etc. conforme pode ser visto um exemplo de especificação na Figura 17.

FIGURA 17 – ESPECIFICAÇÃO/REQUISITO IMPLEMENTO

| | |
|--|-------------------|
| Altura máxima do solo (borda do cesto) | 13,10m |
| Altura de Operação | 13,60m |
| Capacidade no Cesto simples | 136 kgf |
| Comprimento da 1ª lança | 3,61m |
| Comprimento da 2ª lança | 4,80m + 2,7m |
| Telescopagem lança superior | 2,70m |
| Giro principal (inferior) | infinito |
| Giro do cesto | 180° |
| Basculamento do cesto | 90° |
| Alcance lateral máximo | 8,20m |
| Peso Aproximado do Equipamento | 930 kgf |
| Reservatório de Óleo. | 30 L |
| Vazão aproximada | 15 L/min |
| Pressão de Trabalho | 180 bar |
| Nº de Sapatas Estabilizadoras | 2 |
| Nº de Cilindros Hidráulicos | 8 |
| MENOR VEÍCULO RECOMENDADO | |
| PBT (mínimo necessário)** | 5000 kgf |
| Distância mínima entre eixos | Consultar fábrica |

FONTE: Catálogo IMAP (2019).

Segundo Marca (2020), a forma mais largamente aplicada para fornecimento de potência hidráulica a sistemas em implementos é a instalação de uma tomada de força, chamada também de PTO (*power takeoff*) na transmissão de veículos diesel que também é acoplada a uma bomba hidráulica, conforme Figura 18:

FIGURA 18 – IMAGEM DE UMA PTO MONTADA



Fonte: MARCA (2020)

Outros componentes que precisam de acionamento hidráulico, são as ferramentas hidráulicas que podem ser utilizadas em conjunto com o cesto aéreo e são acoplados a ele, geralmente via engate rápido na caçamba, como é o caso de ferramentas para a poda de árvores que são geralmente potentes, compridas de modo

a permitir acesso a lugares mais difíceis e contam com isolamento elétrico. A especificação da ferramenta se faz necessário de modo a projetar o sistema hidráulico mais adequado para o cesto aéreo e ferramentas.

A caçamba/cesto é a parte onde ficam alocados o comando superior e a pessoa que irá realizar o trabalho em altura, em sua maioria as caçambas são feitas em fibra de vidro ou metal e pode ter ou não isolação elétrica (as de metal são vedadas em atividades que contenham riscos elétricos), que é obrigatório segundo a NR12 para trabalhos que envolvam riscos elétricos.

As informações previamente apresentadas foram utilizadas para avaliação, tomada de decisão e dimensionamento dos componentes do sistema auxiliar necessário para a adaptação do caminhão elétrico para a aplicação em manutenção de redes aéreas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A temática envolvendo caminhões elétricos é mais restrita do que a de veículos de passeio, especialmente quando a pesquisa é relacionada a um tipo específico de aplicação de caminhões elétricos, conforme busca realizada na base de dados Scopus e no Google Scholar feitas na plataforma Publish or Perish.

Foram utilizadas as palavras chave: “*electric truck*”, “*bucket truck*”, “*aerial lift truck*”, “*auxiliary system*” “*electrical truck application*” e foram encontrados os resultados apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 – RESULTADOS DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

| RIS | Eixo I | Eixo II | Resultados Publish or Perish | |
|-----|----------------|-------------------|------------------------------|----------------|
| | | | Scopus | Google Scholar |
| 1 | electric truck | aerial lift truck | nenhum | nenhum |
| 2 | electric truck | bucket truck | nenhum | nenhum |
| 3 | electric truck | auxiliary system | nenhum | 48 |
| 4 | electric truck | application | 20 | 315 |
| 5 | bucket truck | aerial lift truck | nenhum | nenhum |

FONTE: O autor (2021)

Entretanto, para o foco central deste trabalho, que é a aplicação de caminhões elétricos com cesto aéreo para manutenção em redes de energia elétrica ou pelo menos caminhões com cesto aéreo, não foram identificados trabalhos publicados. Em relação a busca “*electric truck*” com “*application*”, os resultados obtidos são voltados para análise de viabilidade econômica ou técnica para aplicações de caminhões elétricos em substituição aos de diesel, e não como referência as diferentes aplicações de caminhões elétricos (caminhão para coleta de lixo, caminhão com cesto aéreo, caminhão munck e etc.). Ainda, grande parte dos trabalhos se referem a caminhões híbridos.

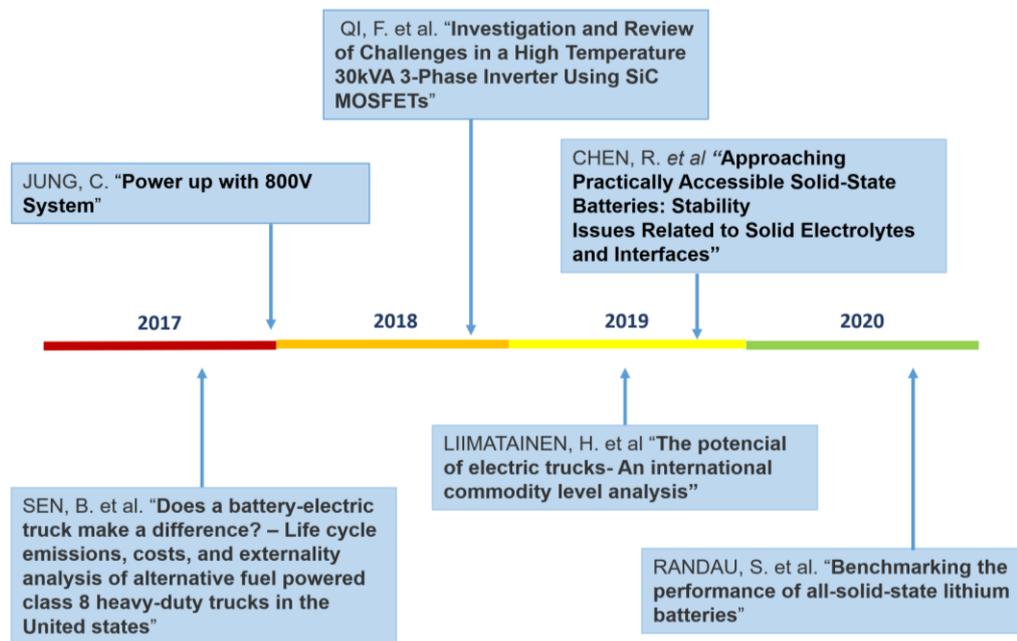
Por essas razões, informações foram coletadas junto a fornecedores e fabricantes de modo a complementar melhor a pesquisa para atender os objetivos deste trabalho, o que levou a realização de duas buscas: a primeira, com enfoque acadêmico, foi realizada com as palavras “*electric truck*”, “*all state solid battery*” e “*SIC inverter*”, visando encontrar inovações promissoras na área de eletromobilidade.

A segunda foi focada no âmbito comercial e visou entender os tipos de caminhões elétricos disponíveis no mercado brasileiro e quais poderiam ser utilizados na aplicação de veículos com cestos aéreos.

3.1 PESQUISA ACADÊMICA

Os artigos escolhidos na pesquisa acadêmica foram colocados na linha do tempo conforme a Figura 19 visando demonstrar a distribuição temporal dos mesmos de acordo com o ano de publicação.

FIGURA 19 – ARTIGOS REFERÊNCIAS - LINHA TEMPORAL



FONTE: O autor (2022)

No artigo de Sen et al. (2017) há a comparação entre caminhões pesados movidos a Biodiesel (20%), gás natural, caminhões híbridos e 100% elétricos em termos de LCC (*life cycle cost*), LCE (*Life Cycle emissions*), LCA (*life cycle analysis*) que considera manufatura e uso. Em termos de LCC os veículos elétricos ficaram com menor custo devido a menor quantidade de peças móveis, mesmo levando em conta as trocas de *packs* de bateria e com relação a emissões de gases de efeito estufa, os veículos elétricos tiveram menores emissões e as mesmas teriam um potencial de redução de até 63%, caso a energia elétrica para a recarga das baterias fosse proveniente de fontes renováveis.

Jung (2017) demonstra as vantagens técnicas e econômicas ao elevar a tensão dos veículos elétricos que em sua grande maioria gira em torno de 400V para uma arquitetura de 800V, que por envolver um patamar de tensão maior, logo há a necessidade de atender requisitos mais rígidos determinados por normas e ter maior

custo inicial no setor de pós-venda e serviços. Entretanto há a possibilidade de reduzir consideravelmente as seções transversais dos cabos de potência e de barramentos de cobre, o que ajuda a reduzir peso do veículo e custo, além potencializar a utilização de recargas rápidas. Tal efeito esperado na indústria é iniciar os veículos esportivos e depois nos veículos comerciais pesados como ônibus e caminhão, até chegar nos veículos de passeio, reduzindo custo com a utilização em larga escala e evitando a utilização de componentes caros e pesados da indústria ferroviária.

O artigo de Qi et al. (2018) trata sobre os desafios da aplicação de inversores com MOSFET do tipo carboneto de silício (SiC) em ambientes com altas temperaturas, pois os mesmos oferecem melhor condutividade e maior tensão de ruptura se comparados aos do tipo Si. Ao que indica as limitações técnicas não são apenas referentes a chave de estado sólido em si, mas também aos componentes reativos e aos circuitos de comandos. Os autores construíram um protótipo de 30 kVA que trabalhou com temperatura de 180 °C de modo contínuo por várias horas sem apresentar falhas, entretanto precisou de refrigeração, pois a refrigeração a ar não é capaz de manter o sistema em uma temperatura aceitável e a densidade de potência do protótipo ainda não foi comparável a obtida quando utilizado em aplicações menos severas (menor temperatura), entretanto como há a possibilidade da carga ficar perto do inversor em algumas aplicações, logo se faz necessário o desenvolvimento de filtros resistentes a altas temperaturas, além de se encontrar modos mais eficazes de resfriar o inversor.

Liimatainen et al. (2019) analisam o potencial de viabilidade de eletrificação de dois países, Suíça e Finlândia, que transportam volumes parecidos de carga, mas com perfis de fretes diferentes. Enquanto na Suíça as cargas são transportadas por caminhões de implemento rígido de até 26 ton, na Finlândia os transportes de cargas via terrestre costumam ser feitos por caminhões articulados e com cargas consideráveis. Foi mapeado as commodities com maior potencial de se empregar o transporte por caminhão elétrico, e o perfil de transporte da Finlândia evidenciou a necessidade de implementação de rodovias eletrificadas, por indução ou catenárias, e/ou a adoção de roteirização de modo a evitar uma concentração de cargas em postos de descanso, pois a recarga rápida gira em torno de 200 kW e se houver uma concentração grande de recarga em um mesmo local a demanda facilmente vai atingir algumas dezenas de MW em pontos específicos das estradas, o que iria requerer um grande investimento.

As baterias de estado sólidos (*all state solid battery*) são vistas como o próximo nível de evolução das baterias, pois se espera atingir uma maior densidade energética cerca de três vezes maior do que as baterias atuais, além de maior robustez mecânica e segurança, entretanto no artigo de Chen et al. (2019) mostra os tipos de baterias de estado sólido (de eletrólito óxido, eletrólito sulfídrico, de filme fino, eletrólito de polímero) detalha a evolução e discorre sobre o pontos fortes de cada tipo e sobre os problema enfrentados por cada tipo de bateria de estado sólido e demonstra que ainda se tem um longo caminho até o desenvolvimento de uma bateria de estado sólido robusta o suficiente para aplicações que exija da bateria uma alta performance como as aplicações automotivas.

Randau et al. (2020) fazem uma análise comparativa entre diversos tipos de baterias em comparação com um tipo simples de ASSB (anodo de lítio metálico, eletrólito sólido do tipo β -Li₃PS₄ e catodo de material ativo) baseada em dados encontradas na literatura. O artigo demonstra que as diferenças na energia específica e a potência específica das ASSB's mapeadas se originam principalmente das diferenças nas espessuras das camadas e resistência interna e demonstra os principais desafios a serem vencidos e, baseado nas equações que determinam o desempenho de bateria, fora possível identificar e quantificar os alguns objetivos para que uma ASSB possa superar a performance de uma bateria de lítio de última geração como: resistência interna menor que 40 Ω cm², espessura do separador menor do que 50 μ m, capacidade/área maior que 5 mAh.cm⁻² e energia específica teórica do cátodo de 500 Wh.kg⁻¹.

3.2 PESQUISA COMERCIAL

Alguns fabricantes de caminhões estão fazendo lançamentos de caminhões com plataformas 100% elétricas, entretanto a maior parte disponibilizou os mesmos visando apenas aplicações logísticas ou aplicações mais restritas sob controle direto da montadora. Existem diversos modelos de caminhões elétricos mundialmente, entretanto no Brasil este mercado ainda é limitado a alguns poucos fabricantes e importadores. Dessa forma foram levantadas as principais características dos modelos comercialmente disponíveis no Brasil, conforme Tabela 6.

No caso da VW caminhões, há os modelos e-delivery 11 e 14 disponíveis, sendo que ambos são para uso urbano e voltados para aplicações logísticas. O preço

varia de acordo com a quantidade de baterias (3 ou 6 packs) o que impacta na autonomia do veículo, e até a data desta dissertação não foi divulgada nenhuma aplicação deste caminhão em aplicações logísticas.

A empresa FNM também segue a mesma estratégia da VW ao apenas disponibilizar os seus caminhões elétricos modelos 832 e 833 para aplicações logísticas, mas não há informações sobre as capacidades de carga útil dos modelos e nem em relação a solução técnica para atingir a autonomia de 700 km.

A BYD possui no mercado brasileiro os modelos T7 e T8 disponíveis, ambos com autonomia em torno de 200 km, sendo o primeiro um caminhão com pbt de 10,7 toneladas e o segundo um caminhão com pbt de 21 toneladas podendo alcançar 30 toneladas no modelo 6x2. O caminhão BYD T8 inclusive tem unidades em operação no Brasil focada na coleta de resíduos.

A JAC Motors, foi a única que lançou em setembro de 2021 um caminhão elétrico voltado para a aplicação de manutenção de linhas aéreas junto com ENEL e TEREX, que ainda está na fase de protótipo, mas as modificações foram feitas em sua matriz na China. O modelo da JAC é o caminhão iEV1200T, de pequeno porte, para aplicações urbanas com capacidade de carga útil inferior a 5 toneladas.

De modo a complementar a pesquisa comercial foi pesquisada a base de dados do INPI com a palavra chave “caminhão elétrico” onde nove resultados foram encontrados, mas todos relativos a caminhões diesel-elétricos utilizados em mineração. Na mesma base de dados foi verificado a palavra chave “caminhão cesto aéreo” com zero resultados, e foram encontrados 13 resultados para “cesto aéreo”, mas estes são referentes apenas a patentes relacionadas a mecanismos do sistema mecânico/hidráulico do mesmo.

TABELA 6 – LEVANTAMENTO DOS CAMINHÕES ELÉTRICOS DISPONÍVEIS NO MERCADO BRASILEIRO

| | Fabricante | Modelo | Autonomia (km) | PBT (ton) | capacidade de carga útil (ton) |
|---|------------|--------------------------|----------------|------------|--------------------------------|
|  | VW | VW280 (e-Delivery 11) | 100-250* | 10 | 5.6* - 6.3 |
|  | VW | VW280 (e-Delivery 14) | 100-250* | 14,3 | 8.5* - 9 |
|  | BYD | eT8E | >200 | 21 / 30** | 13.1 -21** |
|  | BYD | eT7 | 200 | 10,7 | 6,08 |
|  | FNM | 832 | 100-700 | 13 | - |
|  | FNM | 833 | 100-700 | 18 | - |
|  | JAC | iEV1200T | 200 | 7.5-8.5*** | 4 |

* modelo com o dobro de packs de bateria (6 packs)

** modelo na versão 6x2

***variações de versões dentro da linha de caminhões elétrico

FONTE: O Autor (2022)

4 MÉTODO

O método desenvolvido para este trabalho seguiu o modelo V (FORSBERG e MOOZ, 1992), utilizado para criação de produtos. Segundo a norma EN 50126:2017 antes da implementação do produto é necessário realizar a decomposição dos requisitos e a criação das especificações dos componentes e sistema e, após a

implementação deve-se realizar a verificação e integração das partes e a respectiva validação do conjunto (sistema).

A Figura 20 apresenta a metodologia definida para o desenvolvimento do caminhão. Cada uma das etapas é detalhada na sequência.

FIGURA 20 –ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO CAMINHÃO DE MANUTENÇÃO DE REDES AÉREAS



FONTE: O Autor (2021)

4.1 ETAPA DE CAPTURA DE REQUISITOS

Nesta etapa é realizado o entendimento da arquitetura básica de um caminhão elétrico com o estudo da literatura relativa e consulta a materiais técnicos de fornecedores de caminhões elétricos. Também nessa etapa foi realizado o acompanhamento da operação de um veículo de manutenção de redes aéreas em operações rotineiras visando entender como a aplicação deve ser desenvolvida baseado nas reais condições de trabalho, tipos de trabalhos, modo de acionamento dos dispositivos de içamento, tempo de utilização médio e na busca de pontos que

podem ser otimizados, além de conversa com os operadores e encarregados para entender os problemas atuais dos veículos com relação as dores atuais e sugestões.

Na sequência foram pesquisadas soluções alternativas de mercado para o implemento, como o implemento elétrico e um fornecedor de implemento foi visitado para o entendimento dos requisitos dos equipamentos de içamento e da aplicação sob a ótica do fabricante, com o intuito de dimensionar o necessário para o correto acionamento, funcionamento, instalação dos equipamentos e componentes envolvidos.

4.2 ETAPA DE DESENVOLVIMENTO

Nesta etapa foi realizado o levantamento dos componentes necessários para fazer as funções desejadas pelo implemento, a criação da macro arquitetura para o caminhão na aplicação de manutenção de linhas aéreas e a verificação dos requisitos dos componentes para o correto funcionamento e os impactos no chassi do veículo no âmbito de sistemas elétricos, eletrônicos e mecânicos.

Com os produtos das atividades anteriores e baseado no que há de disponível no mercado, foi definida a especificação dos componentes base do sistema, com a proposição dos fluxogramas de interação entre chassi do caminhão elétrico e o sistema auxiliar de modo a se desenvolver/modificar os softwares do sistema para receber o implemento

4.3 ETAPA DE AVALIAÇÃO E PROPOSIÇÃO

Nessa etapa são realizados testes de validação da estratégia de interação entre chassi e sistema auxiliar do implemento e medições que podem refinar as estimativas calculadas. Com base nos resultados modificações na metodologia podem ser propostas.

5 RESULTADOS

5.1 CAPTURA DE REQUISITOS

5.1.1 ENTENDIMENTO DA ARQUITETURA BÁSICA DO CAMINHÃO ELÉTRICO

A arquitetura elétrica básica de um caminhão elétrico foi estudada detalhadamente a fim de entender quais as principais modificações que necessitam ser realizadas para adaptar um caminhão elétrico para a aplicação em manutenção de redes aéreas de energia elétrica. Os principais pontos que requerem atenção no desenvolvimento são os descritos a seguir.

Os sistemas eletro eletrônicos de baixa potência do implemento são em 24V, logo a alimentação do mesmo deve ser feita via ramificações nas conexões do circuito elétrico de baixa tensão do chassi. No entanto essa interação não pode ser definida como nos veículos convencionais, pois há a necessidade de garantir o desligamento do sistema auxiliar em caso emergencial e de falha, com isso o chassi deve ser capaz de cortar a alimentação elétrica do inversor.

A interação elétrica de alta tensão deve ser feita via HVDU e a interação eletrônica pode ser feita na forma de ramificação de uma rede CAN existente, já que na mesma há a flexibilidade de se instalar novos itens nos ramos (dentro de um limite conforme norma ISO 11898). O formato padrão da indústria automotiva deve ser utilizado, entretanto se faz necessário definir um mapa de mensagem que não tenha conflito com as mensagens já existentes e que deve ser implementado na central responsável pela gestão da estratégia, o que depende da arquitetura específica do veículo.

5.1.2 ACOMPANHAMENTO DA APLICAÇÃO EM CAMPO

Foram realizadas visitas técnicas na empresa NEOENERGIA ELEKTRO, em Mairiporã, para acompanhamento da operação junto com o engenheiro responsável pela frota e pelos operadores que executam serviço de manutenção de redes aéreas em uma atividade rotineira, visando entender o funcionamento do caminhão e seu implemento durante a operação.

O perfil da operação consta com uma rodagem máxima de 120 km considerando ida e volta à base por turno (07h30 às 17h, com 1,5 h de almoço). Algumas etapas básicas são consideradas na operação, a saber:

- a) Escolha do melhor ponto para posicionar o caminhão.
- b) Sinalização e isolamento do perímetro de trabalho, onde as luzes de alerta do caminhão são acionadas e assim continuam até o término do trabalho.
- c) Estabilização do caminhão por via de patolas hidráulicas (Figura 21), parte do implemento que precisa de potência hidráulica do MCI.
- d) Realização do trabalho de manutenção das redes aéreas, onde o MCI deve estar acionado em cada movimentação do cesto aéreo, além da disponibilidade de luzes para iluminar a área de trabalho e utilização constante do rádio comunicador.
- e) No caso de poda de árvore, o MCI fica acionado por todo o tempo em que a ferramenta é utilizada, e, caso a ferramenta seja acionada junto com o cesto, pode ocorrer um incremento na rotação do MCI, por um comando do operador.

FIGURA 21 –PATOLA ESTABILIZADORA



FONTE: O autor (2020).

O início da operação do sistema hidráulico do caminhão se inicia com a operação de patolamento (estabilização do caminhão), onde o MCI fica acionado por cerca de 3 minutos. Logo após o operador entra no cesto para realizar a movimentação do braço hidráulico até a posição de trabalho. Se o perfil de trabalho for com posições bem definidas do cesto ao longo de vários minutos, a operação exige que o MCI do caminhão funcione de modo intermitente, sendo possível acionar e desligar o mesmo remotamente por um comando no cesto aéreo, de modo a minimizar a ineficiência e ruído da operação. Quando a ferramenta hidráulica é acionada ou há

a necessidade de constantes movimentações, o caminhão fica sempre ligado, pois tanto a ferramenta de corte, quanto o cesto aéreo exigem potência hidráulica.

Na operação de poda, cada árvore é cortada em cerca de 15 a 20 minutos, sendo o que mais demora é a movimentação do veículo, já que há a necessidade de o operador abaixar e descer o cesto aéreo, desestabilizar o caminhão, movimentar o caminhão e reiniciar toda a operação. Existe um procedimento de segurança, tendo como base a definição do posicionamento do veículo (deve ser avaliado inclusive a inclinação do mesmo), onde deve se efetuar o isolamento da área, ativação da sinalização luminosa, imposição de barreiras físicas junto a linha viva (FIGURA 22).

FIGURA 22 – ETAPAS PARA INICIAR OS TRABALHOS EM REDES AÉREAS



FONTE: O autor (2020).

A princípio, fora estimado um tempo de utilização do cesto aéreo de 3 horas de funcionamento contínuo, em um mesmo turno, no pior cenário. Foi constatado que a utilização de cesto aéreo em uma aplicação de caminhão elétrico poderia ter o funcionamento otimizado do ponto de vista energético. Como não há MCI no veículo, um sistema dedicado pode partir diversas vezes sem problemas. Nas aplicações com MCI, o motor não é desligado todas as vezes após o posicionamento do cesto aéreo devido a desgaste do próprio MCI e da bateria do veículo, já que constantes partidas do motor de arranque reduzem de modo considerável a vida útil da bateria de chumbo ácido.

Também foi verificada a existência de um motor elétrico auxiliar para tocar a bomba hidráulica em uma eventual falha do veículo, possibilitando o resgate do operador. Logo a bateria de baixa tensão do veículo sempre tem que estar com um SoC que possibilite tal resgate.

Devido a requisitos internos do usuário e a necessidades inerentes da atividade de manutenção de redes aéreas, é imperativo a instalação de diversas cargas como rádio comunicador, tablet de operação, luzes de sinalização, luzes de manobra, farol de área e farol de manejo. Assim a lista dos componentes e os manuais dos mesmos foram coletados de modo a extrair a especificação de potência absorvida dos mesmos.

O rádio comunicador é ligado diretamente na bateria e tem potência de 38W, a filmagem da operação é feita por câmera recarregável (via acendedor de cigarro) assim como o tablet de operação (não concomitantemente). Dessa maneira deve ser considerado o valor máximo da potência desta tomada e a corrente de *stand by*, que é a corrente drenada da bateria quando os sistemas estão em modo de repouso, deve ser monitorada.

Outro ponto importante é que os caminhões de manutenção de redes aéreas ficam expostos as intempéries do clima (chuva, sol, poeira, frio e calor) e constantemente transitam em estradas de terra e lugares com barro e/ou poeira, além do veículo ser lavado com jatos de água, o que deve ser levado em conta na especificação dos componentes.

De modo fazer a aplicação em veículos elétricos ter o funcionamento semelhante ou até melhor do que a aplicação com MCI, foi definido que, após enviado o comando de ligar, em 5 segundos o sistema auxiliar deverá estar apto a operar, de forma a não alterar a dinâmica da operação em comparação com a já utilizada. Outro ponto levantado foi que o sistema auxiliar somente deve operar se velocidade do caminhão estiver em 0 km/h, freio de mão acionado e marcha em neutro, o que irá trazer ganho em termos de segurança, já que intertravamentos desse tipo não estão presentes hoje nas aplicações providas de MCI.

5.1.3 SOLUÇÕES DE MERCADO

Com o propósito se ter um sistema confiável e reduzir custo e tempo de desenvolvimento, foram avaliadas as soluções já desenvolvidas e testadas no

mercado. Como resultado dessa análise foi definido que uma solução integrada com o chassi é a mais adequada, pois a mesma reduz peso e aumenta a confiabilidade do implemento. De modo a assegurar a integridade do chassi, a gestão do sistema auxiliar deve ser realizada por ele, assim como o mesmo tem prioridade em relação ao sistema auxiliar do implemento, já que a bateria de alta tensão é compartilhada com o sistema auxiliar a ser instalado no implemento.

Para o motor e inversor foi escolhido um fornecedor nacional WEG, pois o mesmo tem longa experiência com equipamentos industriais em condições ambientais severas e está se especializando em aplicações automotivas. Para o cabeamento de alta tensão foi escolhida a empresa Huber + Suhner, pois ela detém o know-how para cabos automotivos de alta tensão em ambientes severos.

5.1.4 VISITA FORNECEDOR DO IMPLEMENTO

Na visita ao fornecedor do implemento foram avaliados diversos equipamentos já instalados e analisado o histórico de falhas destes equipamentos. A partir disso, definiu-se que o melhor modo para tracionar o sistema hidráulico é via um motor elétrico auxiliar dedicado ao acionamento de uma bomba hidráulica para o fornecimento de potência hidráulica para o implemento. O equipamento do tipo cesto aéreo escolhido pelo usuário foi um IMAP LI 14000 SGI TDI de 13,6 m e o mesmo necessita de um sistema hidráulico com capacidade de prover uma vazão máxima de 21,6 litros/minuto e deve trabalhar sob a pressão máxima de 200 bar.

A bomba hidráulica definida é do tipo “de engrenagens”, pois a aplicação sofre muitos “trancos” ao serem feitos movimentos bruscos no cesto, e somado ao ambiente agressivo e a necessidade de alta disponibilidade do sistema, esse tipo de bomba alia maior robustez a um custo menor.

O sistema de resgate de emergência deve ser mantido. Esse sistema tem instalado no implemento um motor DC, neste caso de 2,1 kW 24 V, que permite descer o operador localizado no cesto aéreo em segurança em caso de eventual falha do sistema hidráulico ou no sistema que provem potência ao sistema hidráulico. Para atender com segurança esse requisito é necessário que o sistema de alimentação em baixa tensão seja capaz de deixar a bateria de 24V em um estado de carga alto, isto é, o balanço energético sobre a mesma deve ser positivo.

As cargas em 24V presentes no implemento, que em sua maioria são do sistema de iluminação e /sinalização externa, são exclusivamente de LED devido à alta eficiência e baixa potência absorvida. O levantamento de todas as cargas presentes no implemento teve as especificações levantadas de modo a obter o consumo energético das mesmas.

O implemento possui dois botões para acionamento do sistema auxiliar. Um na parte traseira do caminhão, de modo a facilitar a estabilização, pois o comando de posicionamento das patolas estabilizadoras fica na parte traseira e em um possível resgate de operador no cesto, fica mais fácil acionar o sistema devido à proximidade com a torre do equipamento. O outro botão fica no próprio cesto aéreo, para viabilizar o desligamento remoto do sistema auxiliar quando o mesmo não é necessário.

A existência dos dois botões permite que o sistema auxiliar seja desligado pelo operador após atingir a posição do cesto mais conveniente para o exercício de suas atividades na rede elétrica. Com isso o sistema fica acionado somente pelo tempo estritamente necessário, otimizando a utilização de energia proveniente da bateria, diminuindo os impactos na autonomia do caminhão e reduzindo, também, o tempo de recarga da bateria e custo da operação.

5.2 ETAPA DE DESENVOLVIMENTO

5.2.1 LEVANTAMENTO DOS COMPONENTES E DELINEAÇÃO DO SISTEMA

Baseando-se nos requisitos coletados com utilizador e fabricante de implemento, a arquitetura elétrica de um caminhão elétrico movido a bateria (VEB) com sistema de tracionamento do implemento integrado é dada conforme a Figura 23.

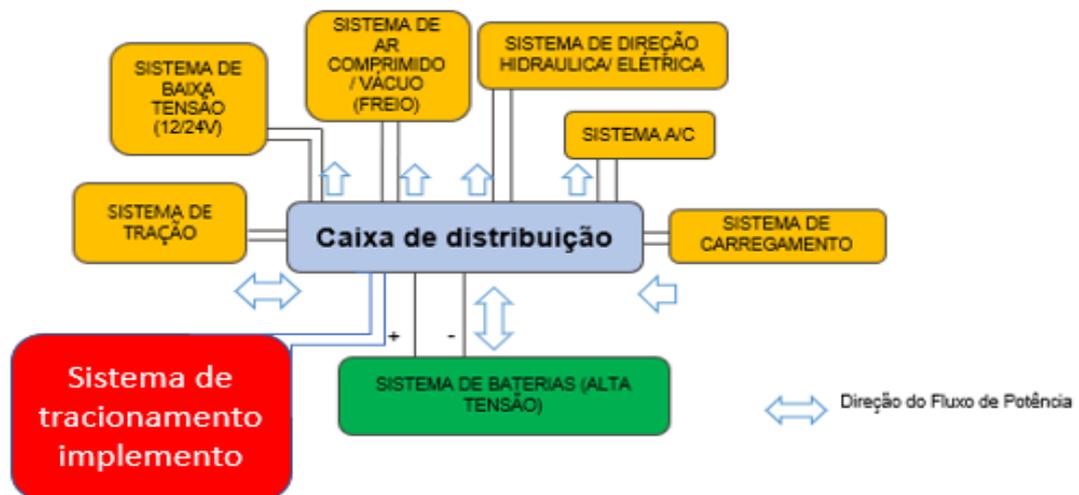
O sistema de tracionamento do implemento é composto por:

- Um Inversor com entrada em tensão contínua oriunda das baterias de alta tensão, saída de tensão alternada com valores RMS e frequência fixa, com comunicação CAN e IP > 66.
- Um par de cabos que conectam a HDVB até o inversor, sendo um cabo positivo e outro negativo mais conectores/conexão que garantam IP > 66.
- Cabos que conectam o inversor ao motor, que tenha secção adequada e pela estimativa inicial pode-se considerar que serão necessários

quatro cabos (três fases mais massa), pois a ordem de grandeza da potência deste tipo de aplicação um motor trifásico seria mais adequado.

- Um motor de corrente alternada trifásico do tipo S9 capaz de suportar sobrecargas grandes por intervalos pequenos de tempo, devido aos solavancos constantes inerentes a aplicação e com IP > 66.
- Derivação para a rede CAN adequada oriunda do chassi que esteja mais próxima, de modo a evitar problemas com a atenuação de sinal, deve ser feita de cabos do tipo par trançado.
- Bomba de engrenagens com capacidade de prover a vazão de 21,6 L/min e suportar uma pressão de 200 bar.

FIGURA 23 –ARQUITETURA ELÉTRICA CAMINHÃO VEB COM SISTEMA DE AUXILIAR DO IMPLEMENTO INTEGRADO



FONTE: O autor (2021).

5.2.2 VERIFICAÇÃO DOS IMPACTOS NOS SISTEMAS DO CAMINHÃO, DETALHAMENTO DAS ESPECIFICAÇÕES DOS COMPONENTES E DEFINIÇÃO DO SISTEMA

Um novo sistema será instalado e estará diretamente ligado a um dos sistemas principais do veículo, o sistema de alta tensão. Logo, uma série de modificações na parte eletroeletrônica, mecânica e em software devem ser realizadas, de modo a viabilizar a integração entre o chassi e o sistema auxiliar garantindo a

integridade dos componentes e sistemas do chassi, a segurança da operação e a confiabilidade e disponibilidade do sistema eletro hidráulico do implemento.

Com isso, a etapa de verificação dos impactos nos sistemas do caminhão é realizada concomitante com o refinamento e complementação dos componentes e sistemas, conforme detalhado nas seções a seguir.

5.2.2.1 DIMENSIONAMENTO DA BOMBA

Considerando a vazão requerida de 21,6 L/m, conforme especificação do cesto aéreo, e a rotação definida para o motor elétrico 1800 rpm, conforme a EQUAÇÃO 2, o deslocamento calculado para a bomba é de 13,34 cm³/ver, tendo em vista que o fornecedor da bomba e do implemento recomendou a utilização de uma eficiência de 0,90. Como não há bomba comercial com deslocamento igual ao valor calculado, uma bomba comercial com deslocamento imediatamente acima, de 16 cm³/ver, foi definida.

Conforme o catálogo da Hybel para a bomba de engrenagens com deslocamento de 16 cm³/rev (código 12 101 011 205), o torque absorvido pela bomba em 2000 rpm é de 9,67 kW na pressão de 200 bar, conforme Figura 24. O pequeno sobredimensionamento no torque (2000 rpm do catalogo versus 1800 rpm calculado) será considerado uma “folga” no sistema. A bomba escolhida gira no sentido horário.

FIGURA 24 – TABELA DE POTÊNCIA E TORQUE DAS BOMBAS DE ENGRENAGENS HYBEL

| Série | | 2 | 4 | 5 | 8 | 11 | 13 | 16 | 19 | 23 | 27 | 31 | 33 |
|-------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Torque | daNm | 0,69 | 1,12 | 1,42 | 2,33 | 3,24 | 3,81 | 4,62 | 5,52 | 6,48 | 7,39 | 8,39 | 8,80 |
| | lbin | 60 | 97 | 123 | 203 | 282 | 331 | 401 | 479 | 563 | 642 | 728 | 764 |
| Potência a 2000rpm [kW] | 100 bar | 0,74 | 1,20 | 1,52 | 2,50 | 3,47 | 4,08 | 4,94 | 5,91 | 6,94 | 7,92 | 8,99 | 9,43 |
| | 150 bar | 1,10 | 1,78 | 2,25 | 3,71 | 5,15 | 6,05 | 7,33 | 8,77 | 10,30 | 11,74 | 13,33 | 13,98 |
| | 200 bar | 1,45 | 2,35 | 2,97 | 4,89 | 6,79 | 7,98 | 9,67 | 11,56 | 13,57 | 15,48 | 17,57 | 18,42 |
| | 250 bar | 1,79 | 2,90 | 3,67 | 6,04 | 8,40 | 9,86 | 11,95 | 14,28 | - | - | - | - |
| Vazão [l/min] | Mínima | 1,40 | 2,21 | 2,73 | 4,41 | 5,99 | 7,19 | 8,91 | 10,88 | 13,07 | 15,25 | 17,71 | 19,02 |
| | Máxima | 11,98 | 18,94 | 23,39 | 37,69 | 44,55 | 45,28 | 56,14 | 68,63 | 67,63 | 62,79 | 72,94 | 78,33 |

FONTE: modificada do catálogo de bombas Hybel (2020).

5.2.2.2 DEFINIÇÃO DO MOTOR ELÉTRICO

De acordo com as definições do cesto aéreo e bomba hidráulica, a potência mínima do motor auxiliar para o caminhão elétrico de manutenção de redes aéreas deve ser de 10 kW, capaz de vencer um torque resistente de 4,62 N.m em 1800 rpm. Devido a severidade da aplicação e a necessidade de ter maior disponibilidade do

sistema, foi escolhido um motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo S9, um produto de prateleira da WEG na configuração conforme TABELA 7:

TABELA 7 – ESPECIFICAÇÃO MOTOR IMPLEMENTO

| Característica | Descrição |
|------------------------------|---|
| tipo motor | Indução trifásico tipo gaiola de esquilo |
| potência de saída | 11 kW (15hp) |
| número de polos | 4 |
| tensão nominal | 270 Vca |
| corrente nominal | 31.8 A |
| velocidade nominal | 1800 rpm |
| frequência | 60 Hz |
| torque nominal | 58.4 N.m |
| torque com rotor bloqueado | 240% |
| fator de serviço | 125% |
| pontos de coleta temperatura | 2 (rolamento traseiro e estator) |
| Regime de trabalho | S9 |
| Grau de proteção | IP 69 |
| sentido de rotação | ambos (na aplicação será anti-horario, pois a bomba deve ser movimentada no sentido horário) |

FONTE: O Autor (2020)

5.2.2.3 DEFINIÇÃO DO INVERSOR

O inversor deve ser capaz de prover a potência elétrica para o motor conseguir operar de modo estável e confiável nas condições nominais (saída de tensão alternada com valores RMS e frequência fixa além da corrente adequada) para alimentar o motor especificado. Devido a severidade da aplicação, o IP do inversor como um todo (corpo e conectores e controle e potência) deve ser, no mínimo, IP66.

A parte de controle do inversor deve ser alimentada em 24Vdc, assim como suportar tensões mínima de alimentação de 16V e máxima de 32V, pois oscilações de tensão podem ocasionalmente ocorrer no barramento de baixa tensão do veículo. O módulo de comunicação CAN deve ser compatível com a rede do veículo, neste caso CANBUS versão 2.0 A (11-bits / fixo em 8bits) / 250kbps / Little Endian (Intel).

De modo a evitar interferência no funcionamento do veículo devido a falha de isolamento do sistema, já que os VEs contam com sensor de isolamento, a resistência de isolamento mínimo considerada para essa aplicação é de 10 MOhm, conforme indicação do fabricante do veículo.

Como a tensão será proveniente da bateria de alta tensão, a tensão de entrada será contínua e não fixa. Com a queda no SoC da bateria o valor de tensão também reduz, logo o módulo inversor deve ter um range de tensão de entrada maior que o range da variação de tensão da bateria e que compreenda os valores de tensão mínima e a máxima tensão da bateria. Esse parâmetro é totalmente dependente da química da bateria e fabricante da mesma, além da configuração dos módulos no veículo, e pode ser obtido de acordo com as equações (5) e (6).

$$V_{in_{min}} = nc \times VC_{min} \quad (5)$$

$$V_{in_{max}} = nc \times VC_{max} \quad (6)$$

Onde $V_{in_{min}}$ representa a tensão mínima da bateria (V), $V_{in_{max}}$ a tensão máxima da bateria (V), nc o número de células em série, VC_{min} a tensão mínima da célula (V) e VC_{max} a tensão máxima da célula (V).

De modo a tornar o projeto mais econômico e de simples implementação, a escolha da tensão de saída V_{ac} do inversor (mesma tensão do motor) deve ser menor que a menor tensão V_{dc} de entrada. Assim não é necessário utilizar um conversor do tipo Boost integrado ao inversor, visto que não é usual essa utilização na entrada de inversor para sistema auxiliares.

Neste caso a tensão de saída definida foi de 270 Vca (valor que retroalimentou a especificação da tensão nominal do motor elétrico), e esse valor foi definido por ser consideravelmente menor que o valor mínimo da tensão de entrada que alimenta o inversor (a tensão mínima da bateria neste projeto calculada em 380 Vdc), pois além da tensão mínima de bateria existem quedas de tensão da bateria até a entrada do inversor. A tensão máxima do inversor é de 750 Vdc, consideravelmente acima da tensão máxima do sistema que é de 670 Vdc.

Visando a segurança do sistema e das pessoas que possam ter algum tipo de contato com o implemento, o inversor deve contar com descarga passiva, isto é, após a interrupção da energia no barramento de entrada, o barramento do inversor deve descarregar e atingir o valor de 50 V em até 2 minutos. Além disso, deve possuir estratégias de autoproteção relativa a subtensão, sobretensão, sobrecorrente, sobre temperatura, fuga de corrente e curto circuito do motor e realizar manobras autônomas de interrupção do funcionamento.

O inversor também deve ser capaz de identificar falhas no motor, como sobre temperatura e fuga de corrente, controlar e monitorar (estimar) parâmetros do motor,

além de fazer o registro das mesmas e manter um histórico de falhas em sua memória interna de modo a ser possível posterior consulta por IHM (interface homem máquina).

O inversor deve possuir programa próprio, ser acessível via interface específica para download/upload de programas, ter acesso ao funcionamento do de forma online e também para coleta de dados com a conexão com um computador, sendo o mais comum uma interface do tipo USB.

Devido a ordem de grandeza da potência do motor, o inversor como não é uma máquina de conversão ideal, dissipa um calor considerável durante o funcionamento, condição que deve ser avaliada para a definição por um inversor refrigerado a ar ou a água. Especificamente, o inversor deste projeto, na condição de funcionamento nominal, dissipa no máximo 750W, logo deve ser refrigerado à água.

Após a definição dos principais itens do sistema auxiliar do implemento foram realizadas modificações visando a integração desse sistema ao sistema eletrônico e elétrico do veículo, de modo a permitir a operação de ambos de maneira segura e sem interrupção devido à falta de coordenação entre os sistemas.

Modificações em hardware foram realizadas, tanto em âmbito elétrico quanto eletrônico, para permitir a conexão entre os sistemas. Foi também necessária a adição de novas funções em nível de software para permitir o gerenciamento e a correta interação e coordenação entre os sistemas do chassi e o sistema auxiliar do implemento, conforme detalhado a seguir.

5.2.2.4 Rede CAN

A interface de comunicação CAN do sistema auxiliar do implemento é basicamente a ECU/*transceiver* de comunicação do inversor de frequência e deve ser instalada em uma rede CAN compatível, de modo a não interferir na comunicação do chassi, pois a mesma rede contém outras centrais do veículo.

Para manter a integridade da rede do chassi o ramo de derivação da CAN para o sistema auxiliar do implemento deve ser instalado entre a central 1 e a central de final de ramo, também denominadas centrais terminais da rede. As mesmas contêm uma impedância de 120 Ohms na entrada, e são elas que definem o valor da impedância total da rede que é 60 Ohms (duas resistências em paralelo de 120 Ohms cada). Logo a resistência do *transceiver* CAN do inversor deve ter resistência de

entrada tendendo ao infinito de modo a evitar a reflexão do sinal CAN, o que pode corromper a comunicação entre as outras centrais do veículo.

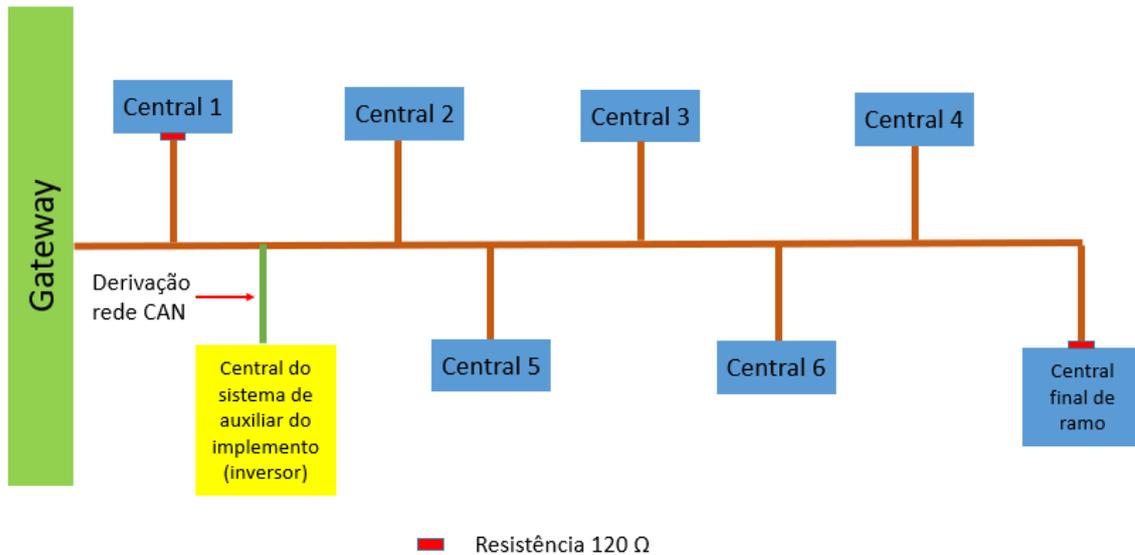
A rede escolhida tem velocidade compatível com a necessidade deste sistema, neste projeto de 250 kbps, pois a rede em questão possui menos centrais e existe a facilidade de se fazer uma derivação perto do local previamente previsto para localização do inversor. No entanto, para o gerenciamento deste sistema uma rede de 128 kbps já atenderia.

A derivação tem que ser do menor tamanho possível, de modo a evitar problemas de comunicação devido a atenuação de sinal. Como boa prática deve se manter distância de fontes de interferência eletromagnética, como por exemplo cabos da alta tensão com chaveamento em alta frequência. Um layout mais adequado com relação a rota de instalação deste cabo pelo chassi é necessário e essa derivação deve ser feita em par trançado, com o comprimento dos cabos não trançados para conexão com o conector de entrada não excedendo 4 cm, conforme indicado por WEG (2019).

Deve-se considerar o que preconiza a norma ISO 11898, no que tange comprimento máximo de barramento (40 m), comprimento máximo da derivação (0,3 m) e número máximo de nós (30).

Na Figura 25 pode se notar que a central do sistema auxiliar do implemento é instalada entre a central 1 e a central de final de ramo e que a rede conta com menos de 30 nós. Neste caso, a inserção do inversor na rede CAN não traz prejuízo a comunicação de rede do veículo.

FIGURA 25 – EXEMPLO DE ALTERAÇÃO ARQUITETURA REDE CAN



FONTE: O autor (2022).

5.2.2.5 SOFTWARE

De modo a garantir a integridade do chassi (prioridade) e o correto funcionamento do sistema auxiliar do implemento, alguns softwares de centrais do veículo devem ser atualizados conforme a estratégia definida. Visando deixar o sistema mais flexível, tanto para futuro ajustes, quanto para a possibilidade da mesma estratégia ser utilizada em outros clientes e aplicações, foram definidas algumas grandezas para serem geridas pelo próprio inversor, que é facilmente programável.

Os requisitos funcionais e de segurança relativos ao estado atual de sistemas/componentes do caminhão que estão vinculados ao funcionamento do sistema auxiliar serão geridos pelo próprio inversor, deixando para o software do veículo a parte de conservação da integridade do sistema chassi, provimento de potência e inicialização do sistema auxiliar.

Neste projeto os requisitos de segurança relativo à aplicação são que o sistema auxiliar do implemento somente é acionado se o veículo estiver em velocidade igual a 0 km/h, freio de estacionamento acionado e marcha em neutro. Caso alguma dessas três condições não seja satisfeita o sistema desarma instantaneamente.

A estratégia definida para o funcionamento do sistema auxiliar do implemento foi baseada em três fases: 1) Energização do inversor, 2) Checagem das condicionais da aplicação e 3) Gestão pós partida do sistema, que serão detalhadas na sequência.

As duas primeiras relativas a partida do sistema e a última relativa a gestão do funcionamento do sistema após concluída a partida.

As mensagens CAN criadas ou utilizadas para viabilizar essa estratégia estão listadas na Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10, de modo a elucidar o objetivo de cada parâmetro, temporizador e mensagem. A última, dependendo da arquitetura e das mensagens disponíveis em um dado veículo, pode ser um resultado lógico de outras variáveis, visto que cada veículo é gerido de uma forma. Como tais modos de gerenciamento, assim como o mapa de mensagem CAN, são considerados segredo industrial, foram utilizados nomes e funções genéricas para apresentação neste trabalho.

Vale ressaltar que a rede proveniente das mensagens, assim como a frequência das mesmas, também não é apresentada pois isso depende de cada tipo de arquitetura e também é segredo industrial.

A Tabela 8 mostra o que foi denominado como mensagens limitantes, pois o funcionamento do sistema está atrelado as condições atuais das mesmas.

TABELA 8 – MENSAGENS LIMITANTES

| Nome | Responsável pelo envio | Explicação |
|------------------------------|-------------------------------|--|
| Chassi pronto | Chassi | Ao ligar o veículo, o sistema principal VCU faz a verificação de todos os sub sistemas (freio, direção, baterias, cambio e etc.) e somente após verificação e a constatação que o veículo que o veículo para operar, esta central envia um <i>flag o sistema está pronto</i> . |
| Botão acionamento | Chassi | Botão de acionamento do sistema, quando o botão for desligado o sistema tem que descarregar imediatamente e iniciar o temporizador de descarga. |
| Contator pré carga | Chassi | Mostra o estado do contator de pre carga do sistema auxiliar (aberto/fechado) |
| Contator principal | Chassi | Mostra o estado (aberto/fechado) do contator principal do sistema auxiliar |
| Freio de mão/ estacionamento | Chassi | Mostra o estado do freio de estacionamento (acionado ou não acionado) |
| Marcha em Neutro (N) | Chassi | Mostra se câmbio do veículo está na posição “neutro”. |

| | | |
|-----------------------|--------|--|
| Velocidade do veículo | Chassi | Mostra a velocidade do veículo instantânea do veículo. |
| Comando de descarga | Chassi | Mensagem que condensa várias situações, desde o comando de desligamento do veículo (<i>key off</i>) até a ocorrência de alguma falha crítica que pode prejudicar a integridade do Chassi como por exemplo: baixa isolamento dos sistemas do caminhão, problemas relativos à bateria (inaptidão de realizar descarga, superaquecimento e etc.) Ao receber essa mensagem o inversor tem que imediatamente cortar a potência do motor e iniciar o processo de descarga. |

FONTE: o Autor (2020)

A Tabela 9 mostra os feedbacks das mensagens mínimas que o inversor tem que enviar para a rede, tanto para gestão do chassi em relação a algumas etapas quanto para o monitoramento do sistema.

TABELA 9 – MENSAGENS INVERSOR

| Nome | Responsável pelo envio | Explicação |
|-------------------------|------------------------|---|
| Inversor em falha | Inversor | Antes da partida do sistema o inversor faz uma auto-diagnose. |
| Sistema em falha | Inversor | Quando em via de partir ou com o sistema rodando, o inversor identifica uma falha no motor ou inversor. |
| Tensão do barramento CC | Inversor | O inversor deve informar ao chassi qual é a tensão no seu barramento de potência. |
| Motor ligado | Inversor | É uma sinalização (<i>flag</i>) que irá indicar para o sistema quando o motor estiver ligado. |
| Velocidade do motor | Inversor | Indica a velocidade instantânea do motor auxiliar do implemento. |
| Status da descarga | Inversor | Status da descarga, que indica se o inversor está parando o sistema, se a descarga foi finalizada e nulo (quando não há comando de descarga). |

FONTE: O Autor (2020)

A Tabela 10 mostra os parâmetros do sistema e os temporizadores necessários para controle do mesmo, seja pelo chassi ou seja pelo próprio inversor.

TABELA 10 – TEMPORIZADORES E PARÂMETROS

| Nome | Responsável pela gestão | Explicação |
|--|--------------------------------|--|
| Temporizador de parada do inversor | Chassi | Função que deve monitorar o tempo que o inversor leva para parar o motor. |
| Temporizador de não recebimento das mensagens limitantes | Inversor | Função que deve monitorar o tempo de não recebimento das mensagens pelo inversor. |
| Tempo de tolerância não comunicação | Inversor | Parâmetro para limitar o funcionamento do inversor sem comunicação. Caso nenhuma mensagem seja enviada por um tempo maior que o definido, o inversor inicia imediatamente o processo de descarga do sistema. |
| Tempo de confirmação de desligamento | Inversor | Tempo para iniciar o processo de desenergização do inversor, após o botão de acionamento na posição desligado. |

FONTE: O Autor (2020)

A seguir, são detalhadas as três fases da estratégia definida para o funcionamento do sistema auxiliar do implemento:

1) ENERGIZAÇÃO DO INVERSOR

Conforme pode ser visto na Figura 26, essa estratégia é antecedida pela fase “Chassi pronto”, que consiste na inicialização do chassi, onde são verificadas as condições atuais dos componentes e sistemas do veículo e é reportado qualquer estado de falha e sua respectiva gravidade. Importante enfatizar que durante essa fase a BMS verifica se a bateria está apta para efetuar uma descarga e de qual intensidade.

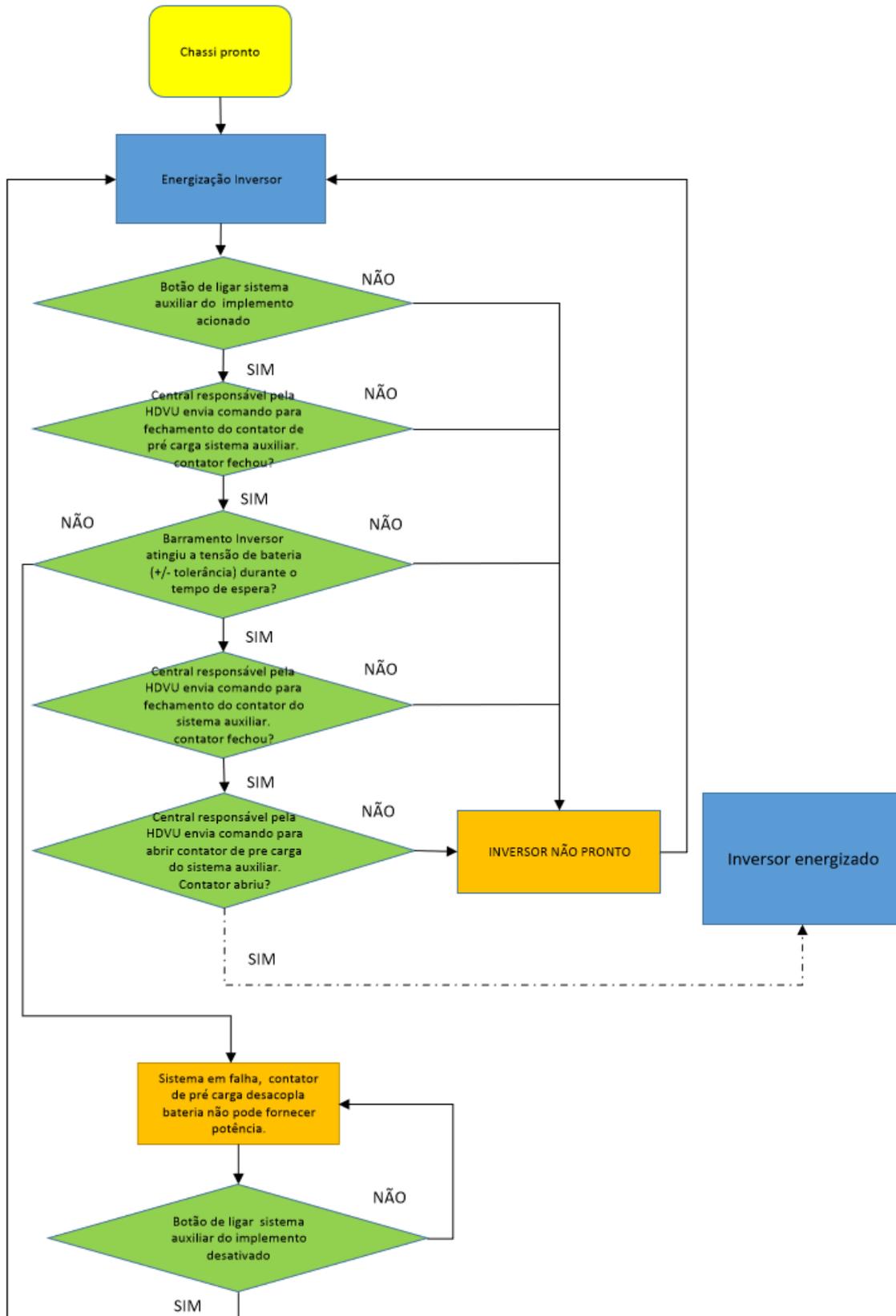
Após a checagem da integridade e disponibilidade dos sistemas principais do veículo com a posterior confirmação que eles estão aptos para utilização é finalizada a etapa “chassi pronto”.

A fase energização do inversor é a fase que o chassi faz a devida gestão para garantir a correta energização do barramento CC de entrada de potência do inversor. A mesma se inicia quando o operador pressiona o botão de acionamento do

implemento, fazendo com que a central que irá fazer a gestão do sistema auxiliar do implemento envie um comando para a central responsável pela gestão dos contatores da HVDU, solicitando o acionamento do contator do circuito de pré carga do sistema auxiliar e verificando se o mesmo efetuou o fechamento dos contatos, via contato auxiliar ou aumento de tensão no barramento do inversor.

O circuito de pré carga irá energizar o barramento de entrada do inversor e o mesmo deve reportar continuamente a tensão deste. Se o tempo máximo de espera for atingido (tempo que deve ser coerente com a constante RC relativa a este sistema, neste projeto de 3 segundos) e o barramento do inversor não alcançar a tensão de pré carga adequada (tensão comumente indexada ao valor atual da tensão da bateria de tração, com alguma tolerância de acordo com o fabricante do veículo e que geralmente gira em torno de poucas dezenas de Volts), o contator de pré carga deve desacoplar e o processo é interrompido. Para reinicialização do sistema sem precisar desligar o veículo, basta desligar o botão de acionamento do sistema auxiliar do implemento e ligá-lo novamente.

FIGURA 26 – FLUXOGRAMA ESTRATÉGIA ENERGIZAÇÃO INVERSOR



FONTE: O autor (2022).

Caso o inversor reporte que a tensão de entrada do seu barramento está conforme o especificado, a central responsável pela HDVU envia o comando fechar contator do sistema auxiliar do implemento e, após a confirmação de fechamento, o contator de pré carga desacopla do circuito. Após a confirmação que o contator de pré carga do sistema auxiliar do implemento está desacoplado o processo de energização do inversor é concluído.

2) CHECAGEM DAS CONDICIONAIS DA APLICAÇÃO

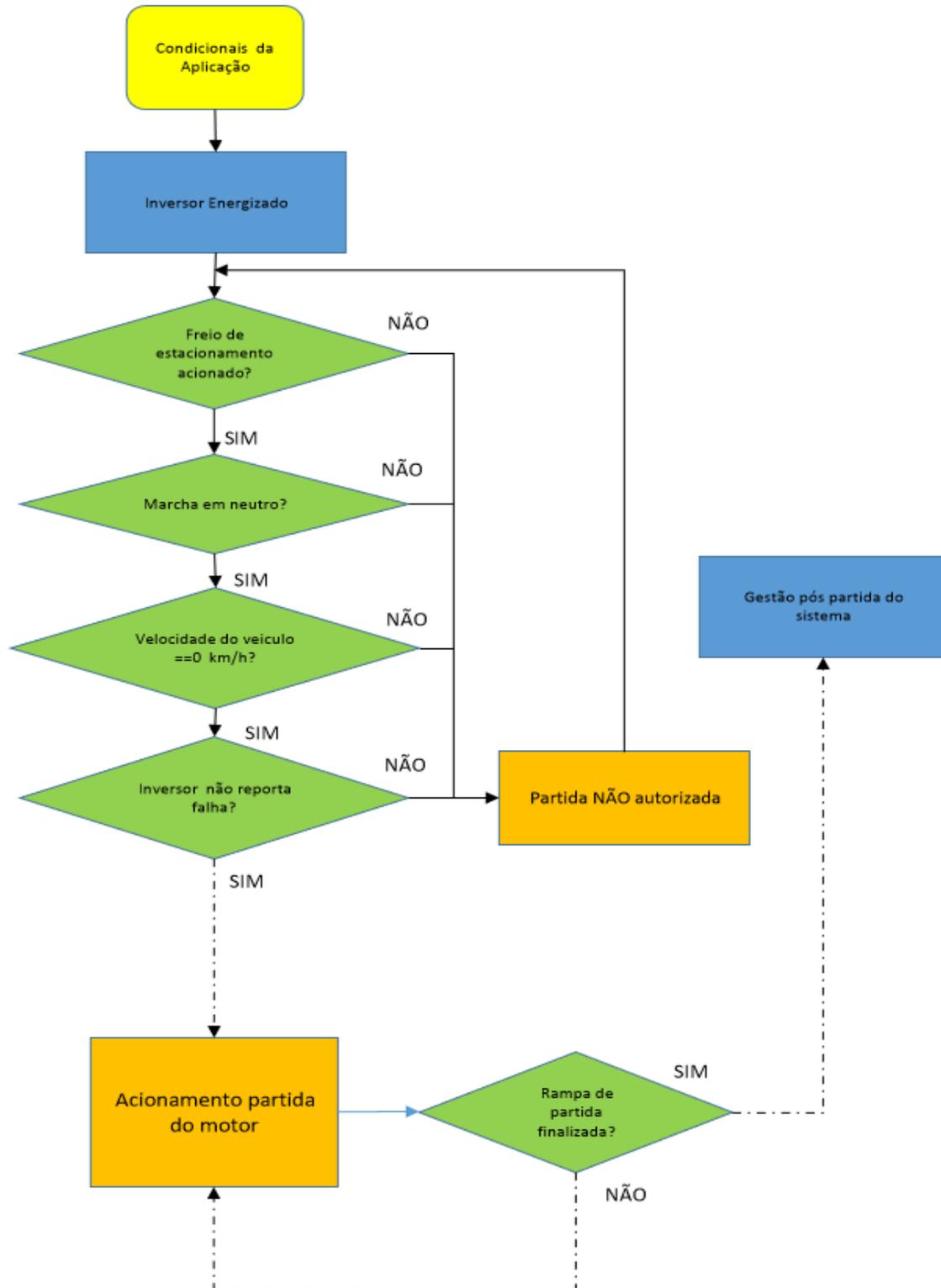
Após a conclusão da etapa de energização do inversor, a gestão das condicionais para a partida do sistema auxiliar do implemento passa a ser do inversor. Com isso a lógica de funcionamento do sistema estará no próprio inversor, e como o funcionamento do sistema depende de parâmetros do veículo, o inversor coletará os dados necessários pela rede CAN.

Os requisitos de funcionamento devem ser informados pelo usuário/fornecedor do implemento e o mapa de mensagens CAN relativas a tais requisitos deve ser disponibilizado pelo fabricante do veículo. Os requisitos funcionais em termos de lógica para essa aplicação são que o inversor somente irá partir o motor se o freio de estacionamento estiver acionado, marcha em NEUTRO e a velocidade do veículo for igual a 0 km/h. Em termos de integridade do chassi e do sistema auxiliar do implemento, o mesmo somente irá partir se o inversor não estiver em estado de erro e se o mesmo e o motor não estiverem em falha. A Figura 27 contém a estratégia delineada citando as condições para acionamento do sistema.

A parte de parametrização do funcionamento motor/inversor não foi contemplado neste trabalho, pois isso se faz diretamente no inversor e cada fabricante tem um modo diverso de fazer. No entanto, deve se atentar a rampa de aceleração do motor, que deve casar com o requisito do sistema, neste projeto 5 segundos após o botão ser pressionado para que o motor esteja em velocidade nominal.

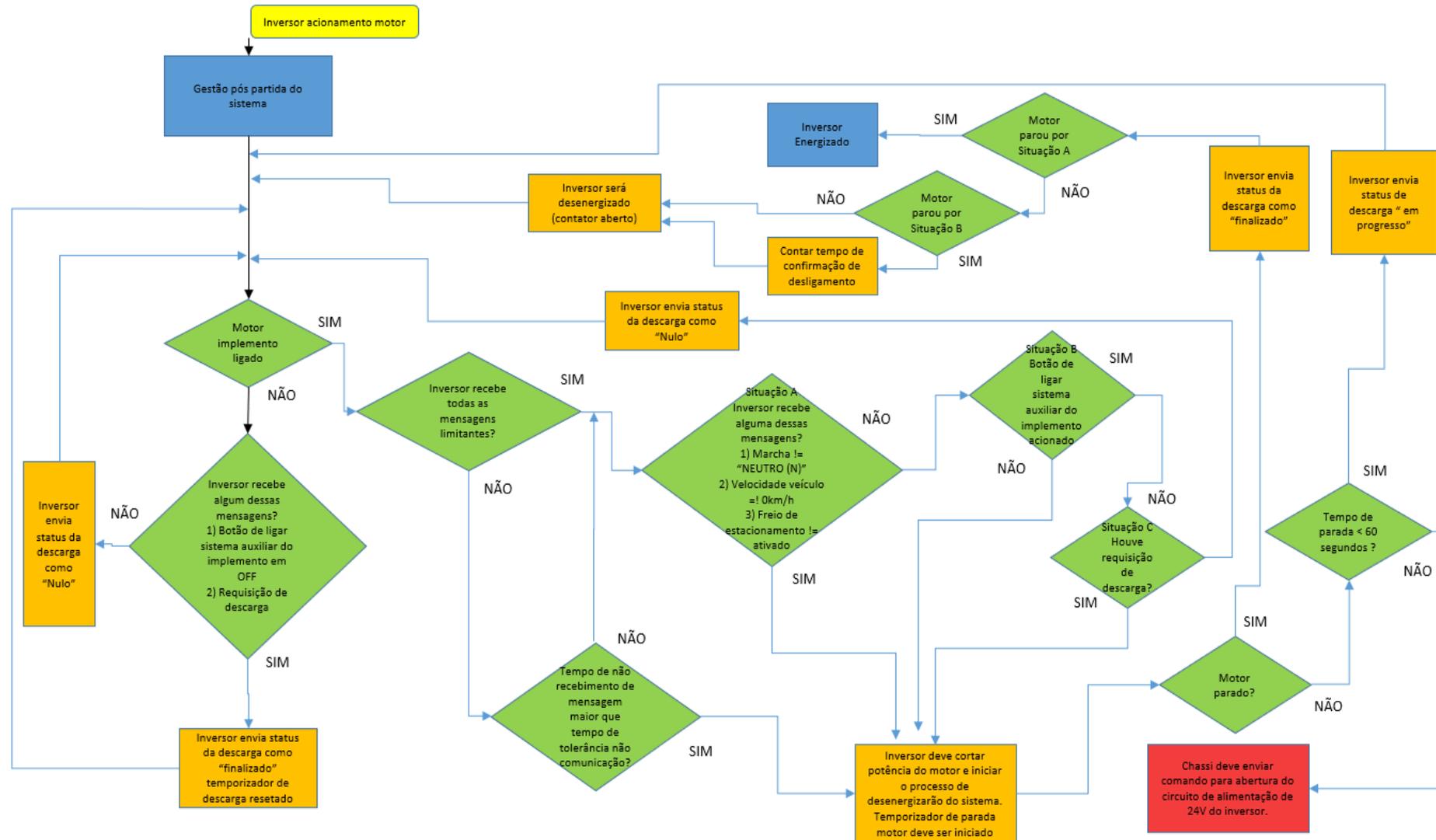
O processo de pré carga foi calculado para ser realizado em torno de 1,5 segundos neste projeto, levando em conta a constante RC calculada do sistema (1 s) somada a abertura e fechamento de contadores. Com isso o tempo de acionamento, na maioria das vezes, deve ficar abaixo de 5 segundos.

FIGURA 27 – FLUXOGRAMA ESTRATÉGIA GESTÃO DAS CONDICIONAIS DA APLICAÇÃO



FONTE: O autor (2022).

FIGURA 28 – FLUXOGRAMA ESTRATÉGIA GESTÃO PÓS PARTIDA DO MOTOR



FONTE: O autor (2022).

3) GESTÃO PÓS PARTIDA DO SISTEMA

A gestão pós partida é realizada após o inversor finalizar a rampa de aceleração do motor, etapa que foi calculada para ser realizada em torno de 2,5 segundos neste projeto. Conforme a Figura 28, a estratégia está fundamentada em duas etapas: motor desligado ou funcionando.

Quando o motor está desligado são verificados dois sinais: botão de ligar o sistema auxiliar do implemento e o sinal de requisição de descarga. Se não houver requisição de descarga ou o botão de acionamento do sistema auxiliar do implemento estiver na posição ligado, o sinal de status da descarga enviado pelo inversor é uma mensagem CAN definida como “nulo”, ou seja, o chassi não irá tomar nenhuma ação.

Se algumas das mensagens mencionadas anteriormente estiver em um estado diferente, isto é, botão de acionamento do implemento na posição desligado ou houver requisição de descarga, o inversor deverá enviar uma mensagem de descarga finalizada, com isso o chassi deve zerar o “Temporizador de parada do inversor”.

O motor ligado é a parte mais complexa da estratégia, onde existem mais possibilidades, a gestão do inversor e chassi é envolvida e possui algumas sub-rotinas, como descarga do sistema.

Quando o motor estiver ligado deve ser verificado primeiramente se o inversor recebe todas as mensagens limitantes. Caso faltar alguma, deve se iniciar o “temporizador de não recebimento das mensagens limitantes” e se o mesmo for maior que o parâmetro “tempo de tolerância de não comunicação”, neste projeto de 3 segundos, o inversor deve iniciar imediatamente o processo de descarga (corte da potência do motor) e o mesmo deve ser desenergizado. Caso o inversor receba todas as mensagens limitantes existem três situações que podem ocorrer:

- 1) Situação A: se as condições de aplicação não forem satisfeitas o inversor deve parar o motor imediatamente, mas não deve ser desenergizado. Se todas as condições da situação “A” forem satisfeitas então a situação B deve ser analisada.
- 2) Situação B: se o botão de desligar o implemento for acionado, o motor inicia o processo de parada imediatamente. Porém, nesse caso, um contador “tempo de confirmação de desligamento” é acionado antes de iniciar a desenergização do inversor. Essa estratégia é utilizada para,

caso ocorra algum tipo de desligamento involuntário do sistema, o mesmo possa ser rearmado imediatamente, sem a necessidade de passar pelo processo de pré carga do inversor. Caso o botão de acionamento esteja na posição ligado, a situação C deve ser analisada.

- 3) Situação C: se houver requisição de descarga o inversor deve parar imediatamente o motor e iniciar a desenergização do sistema, visto que a “requisição de descarga” se dá em situações bem especiais como uma falha grave do sistema chassi ou desligamento do veículo.

As três situações anteriores (A, B e C) podem culminar no processo de desligamento do motor do sistema auxiliar do implemento. Este processo se dá de modo igual nas três situações, diferenciando apenas se ocorrerá a desenergização do inversor e, em caso positivo, se ocorrerá de imediato ou com algum intervalo.

Quando iniciado o processo de parada do motor o “temporizador de parada motor” deve ser iniciado e o corte de potência iniciado (rampa de desaceleração). O chassi deve monitorar o tempo de parada do motor e o comparar com o tempo máximo de parada, que nesta estratégia está delimitada em 60 segundos, pois é um tempo razoável para esperar a finalização do processo de desligamento em caso de alguma falha do inversor que impeça ou atrase o desligamento do sistema. Caso o tempo decorrido para a parada do motor ultrapasse os 60 segundos, o chassi irá abrir o circuito de alimentação do inversor em 24V, impedindo assim que o circuito de controle tenha alimentação para fazer o gerenciamento do sistema.

É importante frisar que essa última se trata de uma redundância, pois o chassi pode requisitar a abertura do contator do sistema auxiliar do implemento, cortando assim a potência do inversor. Logo, essa estratégia se dá em caso de sucessivas falhas como contator colado, problema na central que faz o controle da HVDU e problema no circuito de comando do inversor.

5.2.2.6 REQUISIÇÃO DE DESCARGA

É a subfunção que visa garantir a integridade do chassi, que na ocorrência de certos eventos irá enviar uma ordem para o inversor cortar a potência do motor imediatamente, assim como irá enviar uma mensagem para a central responsável da HVDU para abrir o contator do sistema auxiliar.

Como pode ser visto na Figura 29 esta função, de maneira macro, se estrutura em torno de 5 pilares principais: integridade do próprio sistema auxiliar (motor e inversor), integridade do chassi, integridade do sistema de baterias, desligamento do sistema e consumo de potência.

- 1) Integridade do sistema auxiliar: caso o motor ou o inversor apresente algum tipo de falha, o inversor deve cortar a potência do sistema, visto que em sua especificação há esse requisito (auto proteção). Entretanto, de modo a ser redundante e garantir a integridade do sistema chassi durante a ocorrência de uma falha, o inversor deve enviar na rede CAN que o mesmo está em falha, e com isso o chassi irá enviar mensagem para o inversor para realizar o corte de potência do sistema auxiliar se o inversor, por algum motivo, não o fizer de maneira automática, assim como irá enviar o comando para a central responsável pela HDVU para abrir o contator que alimenta o sistema auxiliar do implemento.
- 2) Integridade do Chassi: se ocorrer alguma falha grave no chassi, como baixa isolamento elétrica em algum sistema, algum sistema em curto, alguma rede não comunicando como deveria, algum sistema prioritário não funcionando bem ou funcionando em modo de segurança (alguma limitação de potência), o chassi irá garantir a integridade do mesmo ao somente utilizar energia para os sistemas prioritários (tração, freio, refrigeração e etc.). Ao retirar a alimentação dos sistemas não prioritários há a possibilidade da baixa isolamento nos mesmos e o veículo pode operar com as suas funções principais de modo pleno.
- 3) Integridade da bateria: caso o BMS reportar algum tipo de desbalanceamento severo, alguma célula atingiu a tensão mínima, alguma célula está com sobre temperatura ou a corrente da bateria está com valores anormais para as cargas que estão sendo ativadas, a BMS irá reportar falha no sistema de baterias. Como o sistema de baterias é um dos sistemas prioritários, o chassi irá enviar o sinal de “Requisição de descarga” de modo a proteger esse sistema.
- 4) Desligamento do veículo: quando o operador colocar a chave do veículo na posição “desligada” (*key off*) o chassi deve garantir que todos os sistemas e sub sistemas sejam desligados e desenergizados e o inversor irá receber a mensagem de “requisição de descarga”. Além disso, o

desligamento via chave é o modo que os clientes costumemente realizam o “reset” do sistema.

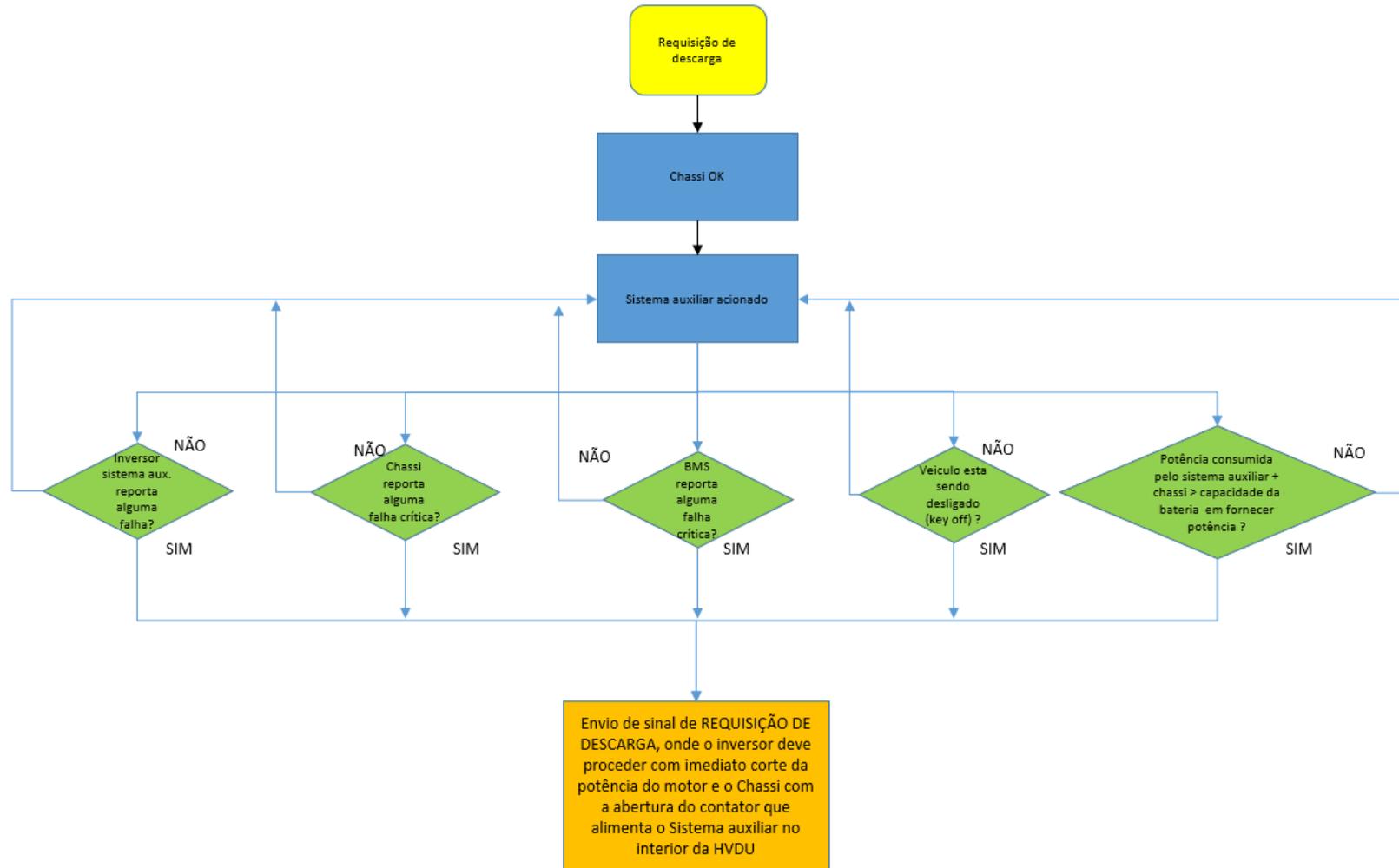
- 5) Consumo de potência: quando a potência que a bateria puder fornecer for menor que a soma do consumo de potência do chassi com o consumo do sistema auxiliar, isto é, a potência consumida é maior que a potência que a bateria está apta de fornecer de modo seguro, o chassi irá enviar a mensagem de “requisição de descarga” pois o sistema chassi é prioritário. Essa estratégia é mais útil quando se utiliza o sistema auxiliar enquanto o veículo está se movendo e com isso tem os sistemas principais acionados funcionando. Nessa aplicação, como o sistema auxiliar somente será acionado quando o veículo estiver com velocidade zero e como a ordem de grandeza do motor auxiliar é mais do que 10 vezes menor do que a potência do motor de tração (o sistema de bateria é dimensionado para alimentar o sistema de tração desde o SoC em 100% até 0%) pode se considerar que dificilmente essa estratégia será utilizada e funciona apenas como uma redundância de segurança do sistema. Entretanto de modo a fazer um software mais flexível e que possa ser utilizado em outros clientes e até mesmo em outras aplicações essa funcionalidade fora implementada.

5.2.2.7 SISTEMA DE BAIXA TENSÃO

A alimentação do inversor não pode ser feita com a ligação direta no barramento “pós chave”, isto é, alimentação 24 V disponível sempre que o veículo for ligado (*key on*), pois em caso de falha crítica o chassi deve ser capaz de cortar a alimentação do circuito de controle do inversor. Com isso, o circuito de alimentação do inversor oriunda de um barramento 24V que tenha relé dedicado para o ramo de alimentação do inversor e comandado por uma central que comunique na rede CAN.

Assim, deve haver uma saída disponível na central para fazer esse gerenciamento “extra” além de relés extras na caixa de relés. Não é incomum que haja soquetes e relés a mais e tidos como “reservado”, um modo que fabricantes operam visando deixar o veículo mais flexível, especialmente quanto a cargas opcionais. Normalmente a central que controla a caixa de relés é o BCM (*Body Computer module*).

FIGURA 29 – FLUXOGRAMA REQUISIÇÃO DE DESCARGA



FONTE: O autor (2022).

Basicamente, o sistema de baixa tensão se conectará ao inversor via conector com grau de proteção maior do que IP 66 com no mínimo 5 entradas (conexão do *encoder* não incluso) compatível com o inversor escolhido, sendo que os cabos para comunicação CAN são do tipo par trançado e, apesar de neles circular uma corrente baixa, deve se levar em conta a seção de cabo mínima para se fazer a correta crimpagem no conector, a se somar o fato que na aplicação de caminhões há elevada vibração, logo se faz necessário colocar um cabo de seção transversal mínima para garantir a resistência mecânica da conexão.

No circuito de alimentação do comando do inversor deve se dimensionar um cabo coerente com a potência deste sistema de comando e o comprimento do cabo, neste projeto o inversor consome 35W deste circuito o que resulta em 1,46A, e para esse projeto definido como parâmetro mínimo conforme a Tabela 11.

TABELA 11 – SINAIS ELÉTRICOS SISTEMA DE CONTROLE INVERSOR

| entrada | tipo | definição | tensão | faixa de corrente |
|---------|-------|---------------------------|--------|-------------------|
| 1 | +24V | alimentação 24V | +24V | ≤2A |
| 2 | GND | massa da alimentação | 0V | ≤2A |
| 3 | CAN-H | comunicação – CAN HIGH | | ≤1A |
| 4 | CAN-L | comunicação – CAN LOW | | ≤1A |
| 5 | GND | blindagem comunicação CAN | 0V | ≤1A |

FONTE: O Autor (2020)

5.2.2.8 HVDU

Para alimentação do sistema de tração do implemento em alta tensão, isto é, alimentação oriunda diretamente do sistema de bateria de tração do veículo, deve ser instalada uma HDVU com uma saída a mais e que tenha sido dimensionada para prover a potência maior do que a requerida pelo sistema auxiliar do implemento de modo contínuo. Isto é, deve ter barramentos contadores e conexões compatíveis com a carga a ser utilizada.

Deve conter também fusível e contator exclusivo para este sistema, sendo opcional um circuito extra de pré carga (contator e resistor de pré carga), se o já existente no veículo não puder ser utilizado.

O tempo de pré-carga depende da capacitância do sistema (capacitância dos cabos de alta tensão e da entrada do inversor) e das resistências do sistema (resistência do sistema de baterias mais resistências de cabos e conexões inerentes ao circuito), conforme as equações (7), (8), (9) e (10):

$$\tau = R_t \times C_t \quad (7)$$

$$R_t = R_{bat} + R_{cab} + R_{con} \quad (8)$$

$$C_t = C_{inv} + C_{cab} \quad (9)$$

$$t_{pch} = 5 \times \tau \quad (10)$$

onde τ representa a constante de tempo (s), R_t a resistência total (Ω), R_{cab} a soma das resistências dos cabos de alta tensão (Ω), R_{con} a soma das resistências das conexões (conectores, barramentos e etc.) (Ω), C_t a capacitância total (F), C_{inv} a capacitância vista da entrada DC de alta tensão do inversor (F), C_{cab} a capacitância dos cabos de alta tensão (F) e t_{pch} o tempo de pré carga (s).

Para este projeto foi calculado o valor do tempo de pré carga do sistema auxiliar do implemento seria de “ $\cong 1,5$ segundos”.

5.2.2.9 CABOS DE ALTA TENSÃO E CONECTORES

Como os cabos de alta tensão irão fazer basicamente duas conexões: HDVU inversor e inversor motor, as seções transversais devem ser coerentes com a frequência e intensidade da corrente que irá circular em cada circuito, comprimento dos cabos e com as dimensões dos conectores compatíveis com os seus respectivos pontos de conexão.

Apesar do sistema instalado ser baseado em sistemas industriais (no caso do motor é do tipo industrial), o mesmo tem que atender a requisitos das aplicações automotivas, logo normas automotivas tem que ser seguidas.

Como o inversor é um gerador de ruído eletromagnético e no chassi há muita eletrônica embarcada, os cabos obrigatoriamente tem de ser blindados. A blindagem em deve ser conectada em ambas as extremidades e garantir área de contato em toda a circunferência do cabo de acordo com os requisitos da norma LV 215. Logo, a carcaça do inversor, a HDVU e a carcaça do motor têm que ser conectada à massa

(ao chassi) e os conectores devem ser capazes de aterrar a blindagem dos cabos e tem que se conectar em ambos os pontos.

Os cabos de alta tensão devem ser capazes de suportar estresses mecânicos vibração e movimentos forçados em ambientes secos, molhados e úmidos e ter revestimento de material não higroscópico, já que a isolação elétrica é fundamental para a segurança e disponibilidade da aplicação. O revestimento mais externo do cabo deve ser da cor laranja fluorescente de modo a ficar evidente a diferença entre os cabos de alta e baixa tensão.

Os cabos definidos são classificados de acordo com a norma ISO 6469-3 ou ISO 6722-1 (classifica como classe 2 como 600Vac e 600Vdc e não considera tensões classe 3) e de acordo com a faixa de tensão dos mesmos se faz a especificação de classe conforme a Tabela 12.

TABELA 12 – CLASSE DE TENSÃO CABOS

| Classe de Tensão | | AC | | DC |
|------------------|--------|---------------|-------------|--------------|
| | | Tensão eficaz | Tensão pico | Tensão em DC |
| Baixa tensão | 1 (A*) | ≤ 30 V | ≤ 42 V | ≤ 60 V |
| Alta tensão | 2 (B*) | ≤ 600 V | ≤ 849 V | ≤ 900 V |
| Alta tensão | 3 (B*) | ≤ 1000 V | ≤ 1414 V | ≤ 1500 V |

FONTE: Adaptado das normas ISO 6469-3 e ISO 6722-1 (2020)

Para esse projeto, como a tensão máxima RMS é de 600Vdc no circuito bateria/inversor, e no circuito inversor/motor é de 270 Vac, cabos classe 2 ou 3 são as escolhas adequadas, com foco em custo neste projeto cabos classe 2 foram os definidos.

A norma LV 215, feita pelo grupo dos fabricantes de automóveis alemães VOLKSWAGEN, BMW, DAIMLER e PORSCHE, também classifica os conectores de alta tensão em diferentes categorias com base na seção transversal do cabo e na capacidade de condução de corrente. Muitos dos requisitos do produto têm um grande impacto na escolha de conectores do sistema de alta tensão, logo os cabos e conectores tem que atender a norma LV 215 no grau mais adequado com as necessidades da aplicação.

Na aplicação de caminhões o veículo é susceptível as intempéries do clima, lavagem sob pressão com uso de produtos químicos, queda de produto químico sobre o sistema, o veículo poderá ficar exposto ao sol, além da vibração excessiva que é normal em aplicações de caminhões, já que a suspensão é mais rígida para suportar o peso do implemento. Dessa forma, para este projeto foram definidas as especificações mínimas para o conjunto cabos e conectores conforme a Tabela 13.

TABELA 13 – PARÂMETROS PARA CABOS E CONECTORES

| Especificação elétrica | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Altitude | ≤2000 m |
| Isolação (1000Vdc, 60 segundos, 85°C) | >200MΩ |
| EMC | 360° LV 215 |
| Classe de tensão | ≥ 2 |
| Especificação mecânica | |
| Vibração | SG2, SG3 e SG4 segundo a LV 215-2 |
| Resistência a Corrosão | SG5 segundo a LV 215-2 |
| Resistência a carga química | LV215-2 |
| Grau de proteção | ≥ IP67 |
| Temperatura | -10 a 140°C |

FONTE: O autor (2020)

As seções transversais dos cabos foram definidas levando em conta a corrente que transita nos circuitos, além do mínimo conforme conectores necessários para a aplicação, e os valores das mesmas não serão divulgados.

5.2.2.10 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DO VEÍCULO

Caso os componentes do sistema de tração do implemento tenham a necessidade de ter refrigeração forçada, isto é, não consiga dissipar o calor de modo natural, deve se considerar 2 formas de refrigeração: forçada a ar e a refrigeração a água. Se o primeiro tipo for escolhido deverá ter uma ventoinha extra dedicada, o que pode impactar no sistema de fornecimento de potência em 24 V. Se a segunda opção for a escolhida há dois caminhos:

- 1) Integrar a refrigeração do(s) sistema(s) ao sistema de refrigeração do veículo, que pode ser feito de modo direto, isto é, sem modificações, ou deve se fazer um incremento no mesmo caso o sistema do veículo

de refrigeração esteja apto a dissipar o calor oriundo dos novos componentes, sem comprometer o chassi e os parâmetros mínimos para o sistema (pressão, vazão e temperatura máxima e mínima e taxa de dissipação de calor).

Caso o sistema precise de um incremento de pressão ou vazão pode ser necessário uma outra bomba elétrica, ou deve se aumentar o radiador e até a ventoinha para fazer a refrigeração do sistema de modo adequado.

- 2) Instalar um sistema de refrigeração adicional (ventoinha, radiador, tanque, sensor de temperatura e etc.). Esta opção é a mais custosa devido ao projeto de um outro sistema de refrigeração, que irá impactar eletricamente e mecanicamente de modo considerável o veículo, especialmente na questão de layout (onde e como será instalado esse sistema).

No caso deste projeto somente o inversor tem uma rejeição térmica de cerca de 750W na condição estabelecida de trabalho, o que está perto do limite conforme informado pelo fabricante do veículo. Logo, se fez necessário que o motor elétrico do sistema auxiliar do implemento fosse refrigerado a ar (refrigeração própria do motor) e que o inversor seria integrado a refrigeração do veículo que é feita por água mais Glicol 50%. Com isso a lógica de funcionamento do sistema de refrigeração deve ser alterada, pois também deve funcionar sempre que o sistema auxiliar do implemento estiver em funcionamento, independente se estiver no estado de espera.

5.2.2.11 SISTEMA DE POTÊNCIA DE BAIXA TENSÃO (DC/DC 24 V)

Devido às diversas cargas extras que instaladas no veículo e ao requisito de segurança (que trata da necessidade da bateria de 24V estar suficientemente carregada para fazer o resgate do operador em caso de falha do sistema de alta tensão via motor elétrico auxiliar 24V 2,1 kW), há a necessidade de submeter a bateria de 24V a condições mínimas de descarga. Visto que a vida da mesma é reduzida com a ciclagem do seu estado de carga e, em caso de baixo SoC durante o resgate do operador, pode ser que essa operação de segurança seja prejudicada ou até mesmo inviabilizada.

Deste modo existe a necessidade do redimensionamento do conversor DC/DC responsável por prover a potência elétrica para o sistema de 24V, no qual foram calculadas as cargas extras, isto é, as que irão ser colocadas no implemento e chassi para atendimento pleno da aplicação, como se fossem cargas utilizadas na metade de tempo de utilização do veículo, o que torna esse percentual muito alto, visto que não há um estudo sobre o percentual de utilização de cada deste tipo de carga. O extrato do levantamento de carga pode ser visto na Tabela 14:

TABELA 14 – LEVANTAMENTO DAS CARGAS ADICIONAIS DO IMPLEMENTO PARA BALANÇO ENERGÉTICO

| Cálculo de balanço energético - cargas adicionais implemento | | | | | | |
|--|------------------------|------------|--------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| Item | Componente | Quantidade | Potência (W) | Potência (W) x Qtd | % de utilização | carga considerada (W) |
| 1 | Giroflex | 1 | 15 | 15 | 100% | 15 |
| 2 | Farol de área | 1 | 55 | 55 | 50% | 27.5 |
| 3 | Lanternas laterais | 6 | 5 | 30 | 50% | 15 |
| 4 | Tomada | 2 | 120 | 240 | 50% | 120 |
| 5 | Farol de manejo | 1 | 55 | 55 | 50% | 27.5 |
| 6 | Fitas de LED | 7 | 12 | 84 | 50% | 42 |
| 7 | Sinalizador direcional | 1 | 136 | 136 | 50% | 68 |
| 8 | Caixa elétrica | 1 | 500 | 500 | 100% | 500 |
| 9 | Horímetro | 1 | 2 | 2 | 100% | 2 |
| 10 | Led vermelho | 1 | 1 | 1 | 50% | 0.5 |
| 11 | Led azul | 1 | 1 | 1 | 50% | 0.5 |
| 12 | Sirene | 1 | 10 | 10 | 50% | 5 |
| 13 | Sirene | 2 | 10 | 20 | 50% | 10 |
| 14 | Luz de placa | 1 | 1.5 | 1.5 | 100% | 1.5 |
| 15 | tablet | 1 | 70 | 70 | 100% | 70 |
| 16 | radio comunicador | 1 | 130 | 130 | 50% | 65 |
| 17 | tomada USB | 1 | 24 | 24 | 100% | 24 |
| 18 | inversor WEG | 1 | 35 | 35 | 100% | 35 |
| | | | | | potência total (W) | 1028.5 |
| 19 | Bomba de emergência | 1 | 2100 | 2100 | 0% | NA |

FONTE: O autor (2020)

Conforme o levantamento de cargas adicionais e o balanço energético do veículo utilizado, um conversor DC/DC de 2,5 kW atende plenamente a aplicação, visto que a potência do novo DC/DC irá proporcionar um balanço energético positivo para o veículo. Este cálculo pode ser feito de maneira direta conforme a equação 11, pois diferentemente de alternador veicular em que o fornecimento de potência depende da rotação instantânea do MCI, logo precisa ter um ciclo definido de rodagem, o conversor DC/DC do veículo elétrico consegue fornecer o valor de potência de modo contínuo, o que simplifica os cálculos inclusive ao fazer em função das potências ao invés de fazer em função da curva de corrente do alternador.

$$P_{DC/DC} > BE_{vei} + BE_{imp} \quad (11)$$

onde $P_{DC/DC}$ representa a potência do conversor DC/DC (kW), BE_{vei} o balanço energético do veículo (kW) e BE_{imp} o balanço energético do implemento (kW).

Outra medida implementada foi a modificação do funcionamento do conversor DC/DC, pois o mesmo é ativado em conjunto com a alta tensão para o sistema auxiliar. Com isso o mesmo estará em funcionamento sempre que o veículo estiver apto a se movimentar e também no estado de espera, que é o estado que o veículo não está se movimentando. O modo de funcionamento proposto, pode ser analisado de modo análogo a um veículo a gasolina que não está se movimentando, mas está ligado em marcha lenta (alternador girando e provendo energia elétrica), com isso as baterias do sistema de 24V somente irão se descarregar pela corrente de *stand by* que está prevista para ser menor do que 1 dezena de miliamperes.

Apenas a potência do DC/DC foi redimensionada, mas foi definido um conversor da mesma família, com chaveamento feito por MOSFET com chaveamento *soft switch*, visto que alta eficiência se faz necessário em VE, pois qualquer consumo extra impacta negativamente na autonomia do veículo. Apesar da modificação do DC/DC, a tensão regulada de saída continuará sendo de 28 V +/- 5% e foram utilizados 2 acumuladores de 12 V e 65 Ah do tipo SLI, já que não se espera oscilação acentuada do SoC, ligados em série.

5.2.2.12 Impacto do uso do implemento elétrico no consumo energético do veículo.

Como o sistema auxiliar do implemento será uma carga extra no sistema de baterias, foi estimado o consumo elétrico do mesmo na pior condição, isto é, em carga total de modo a verificar o impacto da utilização deste sistema na autonomia do veículo.

Levando em consideração que o motor elétrico tem potência de saída 11 kW e a versão refrigerada a ar tem eficiência de 90,4%, a potência consumida é de 12,2 kW, calculada conforme a equação 11.

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} \quad (11)$$

onde P_{in} representa a potência consumida (kW), P_{out} a potência de saída (kW) e η o rendimento (%).

A potência consumida pelo inversor é aproximadamente 750W, conforme a taxa de rejeição térmica informada pelo fornecedor, logo esse valor é o utilizado para cálculo. A potência consumida pelo implemento é de no máximo 1 kW, conforme balanço energético, e a eficiência do DC/DC informada pelo fornecedor é maior que 85%, mas para efeito de cálculo foi utilizado o valor de 85%. Também conforme a equação 11, a potência consumida pelo incremento de carga elétrica na baixa tensão é 1,18 kW.

Logo, a potência absorvida máxima pelo sistema auxiliar do implemento é a soma das potências consumidas máximas conforme a equação 12.

$$P_t = P_{mot} + P_{inv} + P_{limp} \quad (12)$$

onde P_t representa a potência consumida total (kW), P_{mot} a potência consumida pelo motor (kW), P_{inv} a potência consumida pelo inversor (kW) e P_{limp} a potência consumida pelo implemento (kW). Dessa forma, $P_t = 14,1$ kW para este caso.

Transformando a equação 1, que se refere a capacidade da bateria por potência, pode-se chegar à equação 13:

$$W_{atthora} = P_t * h \quad (13)$$

onde $W_{atthora}$ representa a capacidade da bateria (kW.h), P_t a potência consumida no sistema auxiliar do implemento (kW) e h o tempo (h).

Logo o valor de 42,3 kWh será o valor de capacidade que deverá ser reduzido do total presente na bateria do veículo de modo a fazer o cálculo de autonomia do mesmo (essa capacidade nos cálculos estará reservada para o funcionamento do implemento).

Neste caso a capacidade restante da bateria de tração do veículo deverá ser capaz de fornecer energia para que a autonomia do caminhão seja maior que 120 km, por um certo período de tempo. O cálculo da capacidade da bateria do veículo não é escopo deste trabalho.

5.3 ETAPA DE AVALIAÇÃO E PROPOSIÇÃO

Com o veículo já montado (implemento e chassi), foram realizados testes objetivos (funcionais e de medição) e subjetivos (avaliação do sistema pelo usuário baseado na sua experiência), de modo a verificar se o dimensionamento dos

componentes e do sistema atende aos requisitos funcionais e de segurança para qual foram projetados, assim como realizar uma verificação da metodologia proposta.

Para os testes funcionais subjetivos, foram realizados testes simulando a aplicação real, nos quais foi verificada a ativação e performance subjetiva do sistema sob a ótica de operadores e do fabricante do implemento. Nesses testes foram realizadas movimentações de elevação e abaixamento e extensão e rebaixamento do cesto aéreo, além da realização de pequenas movimentações do mesmo para verificar se a movimentação do equipamento se daria de modo paulatino (ajuste fino de posição).

Sob o ponto de vista dos usuários e do fabricante o comportamento dinâmico apresentado pelo sistema eletro hidráulico desenvolvido é muito semelhante ao cesto aéreo montados em um VMCI.

Os testes objetivos contam com três testes, dois de medição e um funcional, sendo: 1) Medição do sistema elétrico de 24V; 2) Medição do sistema elétrico de alta tensão; e 3) Teste funcional com aquisição de dados da rede CAN. O detalhamento e apresentação dos resultados é dado nas seções a seguir.

5.3.1 MEDIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE 24 V

O sistema provedor de potência de baixa tensão (conversor DC/DC) dimensionado para essa aplicação atendeu, conforme esperado, aos requisitos estabelecidos. O teste realizado consistiu no acionamento de todos os componentes elétricos, tanto do chassi quanto do implemento, e tomou-se a medição de corrente de carga da bateria, que ficou positiva em 0,3 A.

A tensão da bateria de baixa tensão ficou estável em 27,1V com todas as cargas acionadas e em funcionamento, por um longo período. Com apenas as cargas do chassi a tensão ficou no patamar de 27,6 V, valor dentro da faixa normal de operação do conversor DC/DC (de 28 V +/- 5%).

A corrente de *stand by* ficou dentro da normalidade, em torno de 6 mA após 4 minutos de “*key off*” e o sistema de refrigeração acionou de forma normal, tanto na condução do veículo quanto no modo de espera.

5.3.2 MEDIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE ALTA TENSÃO

Para este teste foram realizadas constantes e abruptas mudanças de carga mecânica (movimentações dos mais variados tipos), de forma a verificar o comportamento do consumo elétrico do sistema auxiliar do implemento em alta tensão. Os resultados mostraram que o mesmo se manteve dentro da normalidade e estável, o que é um indício que o conjunto motor inversor foi bem dimensionado.

Na Tabela 15 são apresentados os valores coletados de corrente e tensão de entrada do inversor do sistema auxiliar do implemento.

TABELA 15 – LEVANTAMENTO DE CONSUMO SISTEMA AUXILIAR IMPLEMENTO (MOTOR E INVERSOR)

| Carga | Tensão | Corrente | Potência |
|--|--------|----------|----------|
| Vazio | 521 V | 4.8 A | 2501 W |
| Movimentação das patolas estabilizadoras | 521 V | 5.5 A | 2866 W |
| Pressurização do circuito do braço | 521 V | 7.2 A | 3751 W |
| Movimentação do braço na manobra de alongamento do braço a vazio | 521V | 14 A | 7294 W |
| Movimentação do braço na manobra de alongamento do braço a vazio | 521V | 13 A | 6773 W |

FONTE: O autor (2022)

5.3.3 TESTES FUNCIONAIS COM AQUISIÇÃO DE DADOS DA REDE CAN

Os testes funcionais foram feitos de modo a verificar o funcionamento e a coordenação das lógicas propostas para o funcionamento do sistema e para a interação entre chassi e sistema auxiliar do implemento.

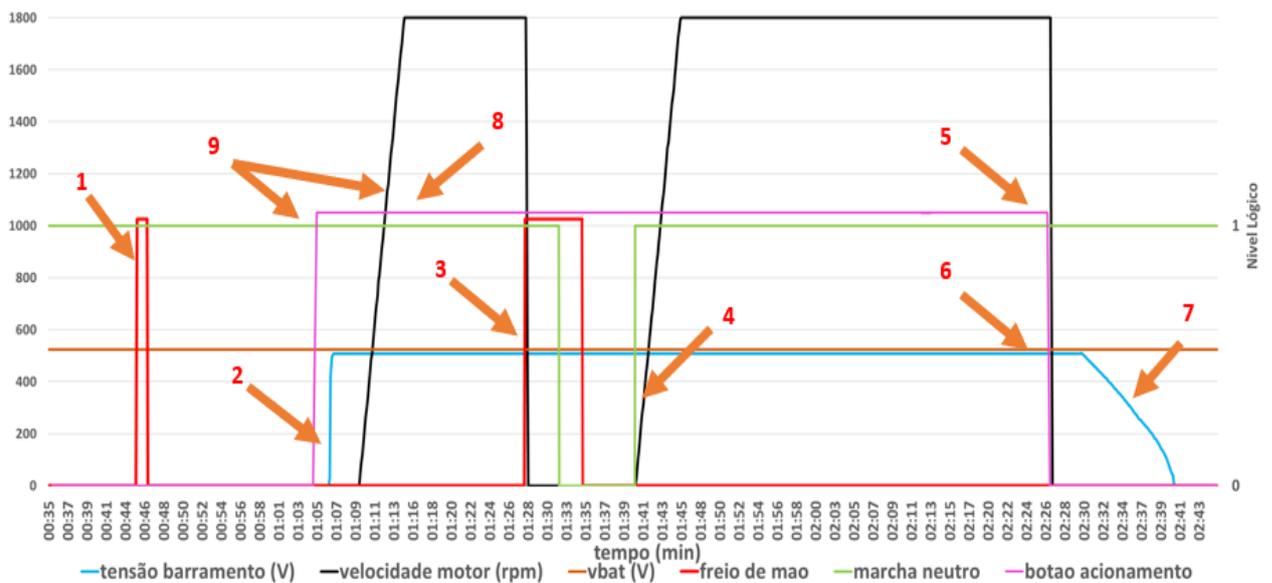
Como premissa para os testes foi considerado o veículo parado ($v = 0$), pois neste veículo em especial não há como engatar o freio de mão e acelerar, pois, a central do veículo (VCU) não habilita partida do motor. Outra premissa foi que o sistema inversor não estava em falha assim como o chassi não estava em erro.

Para verificação das funcionalidades do sistema foram realizados três testes, conforme detalhado a seguir.

5.3.3.1 Teste 1

No primeiro teste foi ensaiada a habilitação e posterior desabilitação do sistema com o desengate do freio de mão. Posteriormente o veículo é colocado em marcha diferente do neutro, engatado o freio de mão e com a posterior colocação do câmbio em neutro. Na Figura 30 são apresentados os dados coletados da rede CAN.

FIGURA 30 – TESTE DE LÓGICA DE FUNCIONAMENTO



FONTE: O autor (2022)

As setas indicadas na Figura 30 permitem realizar as seguintes análises:

Seta 1: Desde o instante 0 até o desengate do freio de mão, o sistema não foi ativado, mesmo com as condições satisfeitas ($v=0$, câmbio em Neutro e freio de mão acionado).

Seta 2: Com as condições satisfeitas ($v=0$, câmbio em Neutro e freio de mão acionado) e com o acionamento do botão (linha rosa), se iniciou o processo de pré carga (linha azul claro), isto é, a tensão do barramento CC do inversor do sistema auxiliar aumenta até chegar a um valor próximo da tensão da bateria de tração (linha marrom).

Seta 3: Assim que o freio de mão foi desengatado (linha vermelha) o funcionamento do motor foi interrompido (linha preta). Posteriormente o veículo foi colocado em uma marcha diferente de Neutro e o freio de mão foi novamente engatado, entretanto o motor continuou parado. Durante esse tempo a tensão do barramento do inversor (linha azul clara) continuou sem alteração, como previsto.

Seta 4: Logo que a marcha do veículo voltou para a posição Neutro o motor novamente voltou a funcionar.

Seta 5: Com o botão de acionamento na posição “desligado” o motor parou quase que instantaneamente.

Seta 6: Somente após 3 segundos do desligamento via botão de acionamento que o inversor iniciou a descarga do seu barramento de potência (o chassi também abriu o contator que alimenta esse sistema).

Seta 7: A auto descarga do inversor do sistema auxiliar do implemento está conforme especificação, pois é requerido que a tensão do barramento seja menor que 50V em até 2 minutos.

Seta 8: A rampa de aceleração do motor está em 5 segundos, indicando a necessidade de ajuste.

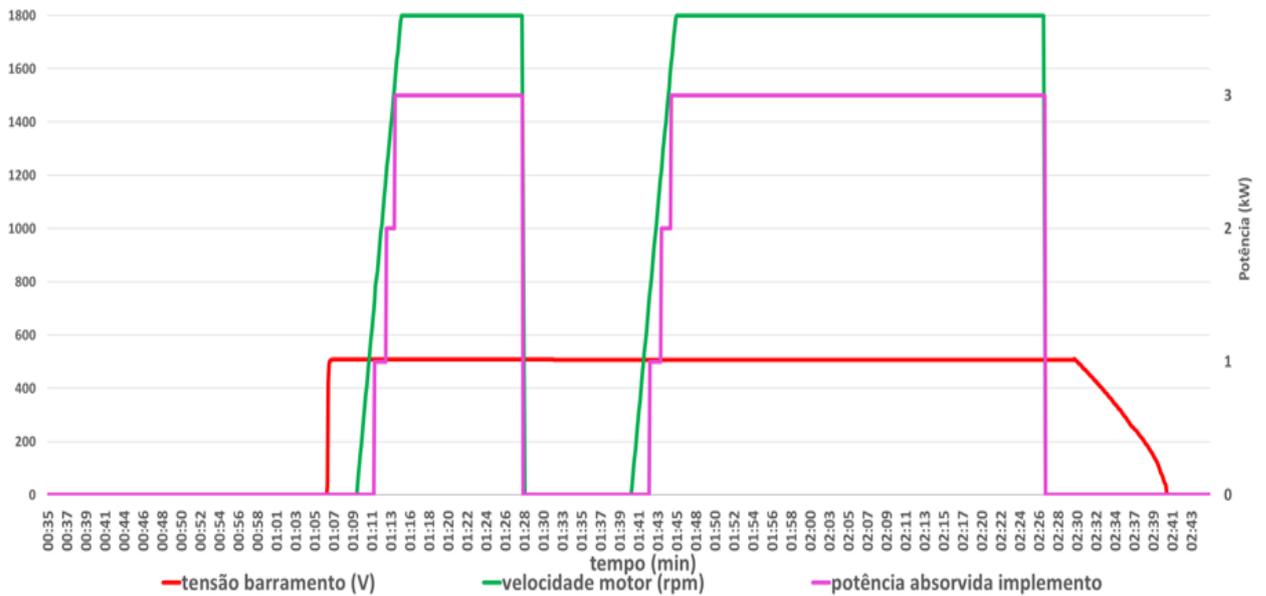
Seta 9: O processo de acionamento do sistema desde o botão pressionado até o motor atingir a rotação/torque nominais deveria ser de 5 segundos, mas está em 9 segundos, indicando a necessidade de ajuste.

Na Figura 31 é possível verificar que a potência consumida pelo implemento está coerente com a potência medida durante a movimentação das patolas. Entretanto, é possível observar que a mesma está condicionada a valores inteiros (1,2,3), logo tem de se verificar a real necessidade de se modificar a estrutura da mensagem CAN de modo a dar maior precisão ao valor da potência consumida pelo implemento, visto que nesta aplicação essa mensagem será utilizada apenas para leituras, já que a BMS deste veículo consegue fazer a medição do consumo energético do sistema auxiliar do implemento de maneira individualizada.

5.3.3.2 Teste 2

Neste teste foi ensaiado o envio do sinal de tensão do barramento do inversor com 3 segundos de atraso. Dessa forma, o botão de acionamento deve estar habilitado, o contator de pré carga deve entrar e ficar no máximo 3 segundos e o contator principal não deve fechar, pois não é atingido o patamar mínimo de tensão durante o tempo de pré carga (neste projeto 3 segundos).

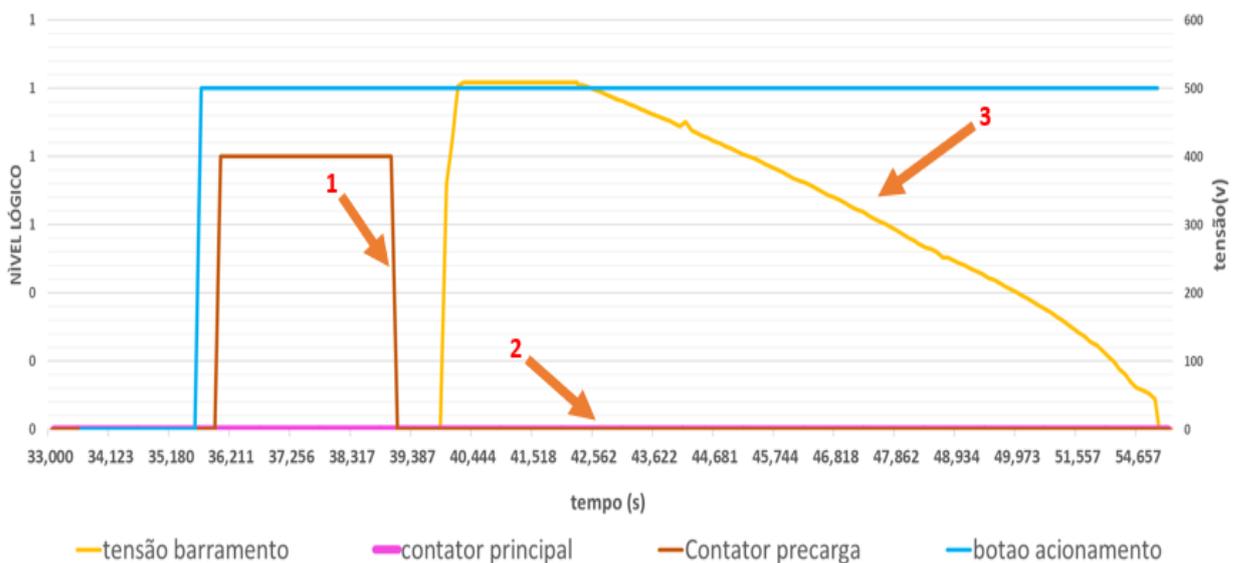
FIGURA 31 – CONSUMO ELÉTRICO



FONTE: O autor (2022)

Na Figura 32 pode se verificar os dados colhidos da rede CAN. A seta 1 mostra que após o tempo máximo de pré carga, o contator de pré carga do sistema auxiliar é aberto (linha marrom). A seta 2 indica que durante o tempo da pré carga (tempo que o contator auxiliar estava fechado), a tensão do barramento do inversor estava zerada (linha amarela) e o contator principal (linha rosa) não foi acionado. Na seta 3 é mostrado que, devido ao desacoplamento do contator de pré carga e ao não acoplamento do contator principal, a tensão do barramento CC do inversor foi decaindo devido ao processo de auto descarga, que neste caso foi de 14 segundos.

FIGURA 32 – FALHA NO PROCESSO DE PRECARGA

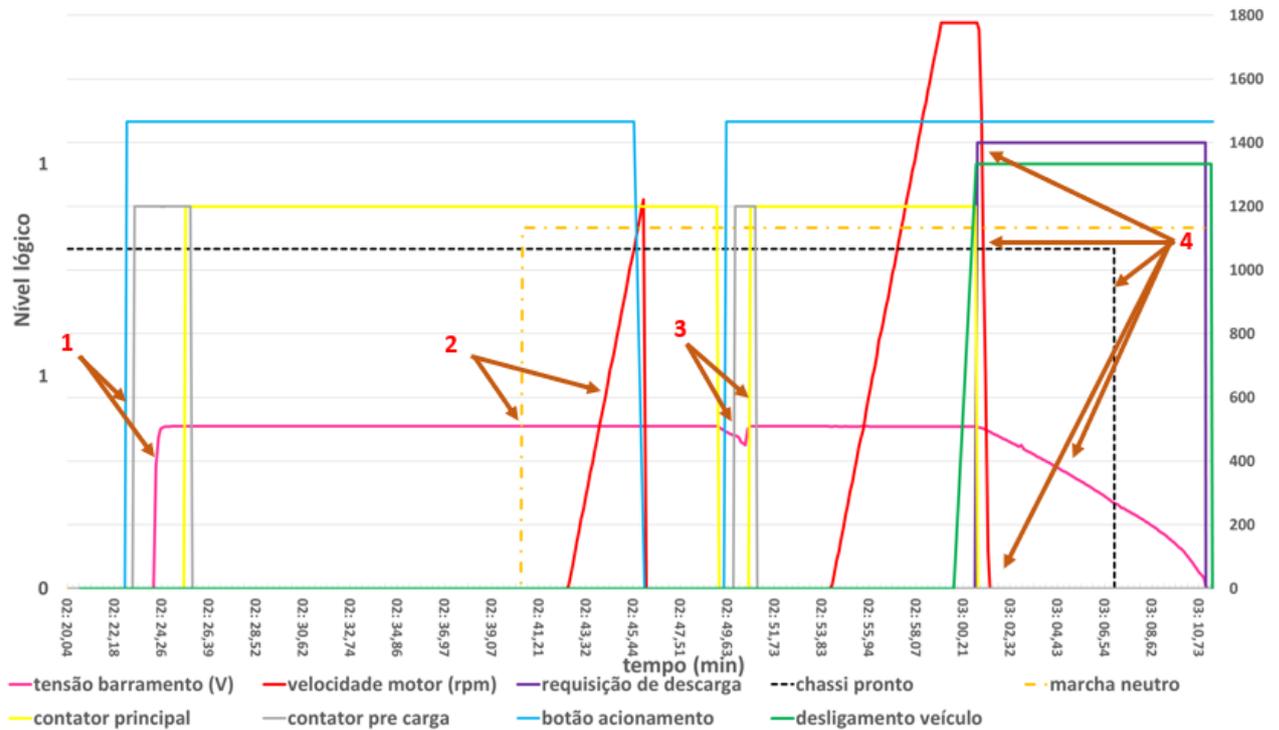


FONTE: O autor (2022).

5.3.3.3 Teste 3

Neste teste foi ensaiada a interrupção do sistema durante a rampa de aceleração do motor, o acionamento do sistema após o início da descarga do barramento CC do inversor e a interrupção por “requisição de descarga”, testada por meio do sinal de desligamento do veículo (*key off*). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 33.

FIGURA 33 – ENSAIO DE CORTE E REARME DO SISTEMA



FONTE: O autor (2022).

A seta 1 mostra que, após o acionamento do botão de ativação do sistema auxiliar (linha azul), o contator de pré carga foi acionado (linha cinza), a tensão do barramento CC do inversor (linha rosa) foi aumentando de maneira gradual até chegar em no seu valor máximo (509 V), próximo da tensão de bateria (523 V), antes do tempo limite para a pré carga. Como o processo de pré carga foi realizado com sucesso, o contator principal (linha amarela) é ativado com a consequente abertura do contator de pré carga (linha cinza).

Na seta 2 é mostrado que, como a marcha não estava em neutro (linha laranja tracejada), o motor não foi acionado. Ao colocar a marcha na posição N (neutro), o motor iniciou a rampa de partida (linha vermelha), quando foi interrompido pelo botão de acionamento (linha azul). Houve imediato corte da potência do motor, conforme

esperado, assim como a não desenergização imediata do barramento CC do inversor (linha rosa).

A seta 3 mostra que, após passado o tempo de espera para desenergização do barramento após desligamento via botão (3 segundos), pode se notar que o barramento iniciou o processo de descarga (linha rosa), entretanto poucos instantes depois o botão de acionamento do sistema auxiliar do implemento foi novamente ligado (linha azul), com isso o contator de pré carga foi novamente ativado (linha cinza). Como a tensão do barramento CC do inversor já se encontrava em um patamar mais alto, o valor de tensão mínimo foi alcançado mais rapidamente, com consequente entrada antecipada do contator principal (linha amarela) e abertura do contator auxiliar, o que resultou em um processo de pré carga mais rápido se comparado com o processo de recarga indicado pela na seta 1.

Na seta 4 é apresentado que, após o acionamento do sistema indicado pela seta 3, o motor inicia a rampa de aceleração até atingir o valor nominal de rotação de 1800 rpm (linha vermelha). Após algum tempo a manobra de desligamento do veículo é realizada, o que faz o sinal de desligamento do veículo (linha verde) ser enviado para a rede. Com isso, o chassi emite o sinal de “requisição de descarga” (linha roxa) que desencadeia diversas desativações de sistemas do veículo, como o corte de potência do motor (linha vermelha), abertura do contator principal (linha amarela), imediata descarga do barramento CC do inversor (linha rosa) e também o sinal de “chassi pronto” (linha preta pontilhada) também vai a zero.

5.3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ETAPA DE AVALIAÇÃO

Devido a limitação de tempo para realização de testes e coleta de dados, os testes objetivos tiveram como foco mostrar a lógica de funcionamento do sistema, a performance do sistema que se dá pelo conjunto das especificações de cada componente e a sua interação com o chassi do caminhão, assim como não houve nenhum erro reportado pelo chassi relativo à falha de quaisquer um dos seus sistemas. Entretanto devido ao cronograma do projeto não foi possível realizar uma análise de durabilidade do caminhão.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com base no levantamento das características dos caminhões elétricos feitos nesta dissertação, foi possível verificar que a fonte provedora de potência nestes é a bateria de tração e os sistemas auxiliares devem ser conectados de alguma forma a esta fonte, em contraponto aos VMCI no qual os sistemas auxiliares drenam potência do MCI, e para estes sistemas o MCI deve ser acionado.

O acompanhamento da operação de caminhões de manutenção de redes aéreas em campo possibilitou o levantamento das características e necessidades dessa aplicação. O sistema auxiliar deve funcionar em pior caso por cerca de 3 horas, ter o acionamento remoto e com tempo de *start* de 5 segundos, aplicação em ambiente de elevada severidade, e necessidade de disponibilidade da bateria de 24V em caso de resgate de emergência. Também foi possível identificar as cargas elétricas adicionais que utilizadas na operação e pontos de melhoria em segurança ao se realizar o intertravamento do sistema auxiliar do implemento.

Ao visitar fornecedores de implemento para caminhões de manutenção em redes aéreas de energia, foi possível levantar os requisitos técnicos do equipamento cesto aéreo, o que serviu para o correto dimensionamento da bomba hidráulica. Com base na experiência do fornecedor foi levantado que a bomba de engrenagens é a melhor solução técnica para esse tipo de aplicação, visto sua robustez diante dos constantes “solavancos” no sistema hidráulico. Com base neste levantamento foi possível definir o tipo de motor elétrico a ser utilizado no sistema auxiliar, além de fazer o levantamento das cargas elétricas dedicadas ao implemento especialmente o motor DC para resgate de emergência do operador.

Com o entendimento da operação e dos equipamentos que devem ser instalados, foi definido que o sistema auxiliar a ser incorporado deveria contar com motor, inversor, bomba hidráulica e cabeamento da comunicação e de potência em alta e em baixa tensão. Também foi necessário entender os impactos do sistema auxiliar no chassi, pois para atendimento dos requisitos do projeto foi preciso redimensionar o conversor DC/DC, de modo a garantir potência adequada para a aplicação e integrar a refrigeração do inversor com a refrigeração dos sistemas do chassi.

Uma vez que devido a rejeição térmica do inversor o mesmo não poderia ser refrigerado a ar, também foi necessário redimensionar a HDVU para que se pudesse

conectar o sistema auxiliar a bateria de alta tensão de modo seguro, confiável e que pudesse permitir a gestão, pelo menos em parte, do sistema auxiliar de modo a manter a integridade e segurança dos sistemas do chassi. A definição da interação entre chassi e o sistema auxiliar, e de lógica de funcionamento deste último, também foi produto do entendimento da arquitetura elétrica de um caminhão elétrico e das necessidades do fabricante do implemento e da operação em campo.

Testes que simularam o funcionamento do equipamento em uma operação de manutenção real foram realizados pelo fornecedor do implemento e por usuários da aplicação. Segundo a análise subjetivas dos mesmos, a performance de movimentação do sistema do braço hidráulico não apresentou nenhum demérito em relação a um sistema convencional montado em um veículo provido de MCI. Porém, em termos de conforto, a aplicação em VE apresenta consideravelmente menor ruído, pois a rotação do sistema é estável (1800 rpm fixo) e não há a presença do ruído do motor a diesel ligado durante a execução da atividade.

A realização dos testes objetivos e coleta de dados evidenciou o correto funcionamento da lógica do sistema, assim como a sua respectiva performance, pois os requisitos funcionais e de segurança foram plenamente atendidos e não se observou problema operacional no sistema auxiliar do implemento e tampouco algum tipo de erro ou interferência nos sistemas do chassi do caminhão, indicando que o sistema dimensionado está interagindo de maneira adequada com o chassi.

Em termos de performance não foi reportado nenhum demérito em relação a esse sistema pelo operador do sistema ou mesmo pelo fabricante do implemento, aliado com o balanço elétrico positivo medido no sistema de baixa tensão, comprovando que o dimensionamento foi adequado neste quesito.

A metodologia apresentada se mostrou assertiva ao atender plenamente aos requisitos funcionais e de segurança, entretanto não foi possível realizar todos os testes, especialmente os de redundância, que visam aumentar a segurança do sistema. Por exemplo, a não realização dos testes com a velocidade do veículo diferente de zero e do teste que simula o não desarme do inversor após excedido o tempo limite para desligamento (60 s).

O resultado também demonstrou que um pequeno ajuste na curva de aceleração do motor se faz necessário, o mesmo é de fácil ajuste e inclusive está previsto na última etapa da metodologia do trabalho (refinamento do projeto). Dessa maneira, conclui-se que a metodologia proposta funciona e inclusive pode ser

utilizada, realizando as devidas adaptações, para modificação de veículos elétricos que necessitam da implantação de circuitos auxiliares que demandam alta potência, como veículos para transporte de cargas refrigeradas, caminhões guincho, caminhões basculantes, caminhões com compactadores de lixo e etc.

Devido a limitação de tempo e de recursos, não foi possível fazer a completa verificação do sistema e a validação da aplicação junto ao cliente, especialmente no quesito durabilidade, pois demanda longo tempo. Logo, como sugestão de trabalhos futuros, devem ser conduzidos estudos de acompanhamento do caminhão em operação, de modo a verificar a performance do mesmo durante a operação rotineira e durabilidade do sistema visando encontrar pontos passíveis de otimização e melhoria em termos de custo, segurança, disponibilidade, manutenibilidade, confiabilidade, integração entre o sistema auxiliar e chassi, funcionalidades e até a proposição de padrões para a indústria, visto a incipiência deste tipo de aplicação em caminhões elétricos.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Chamada no 022/2018 projeto estratégico: “desenvolvimento de soluções em mobilidade elétrica eficiente”. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. Abr/2019. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d/-/asset_publisher/ahiml6B12kvf/content/temas-para-investimentos-em-p-d/656831>. Acesso em: 10 de junho de 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16092: Cestas aéreas - Especificações e ensaios. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR IEC 60529: Graus de proteção providos por invólucros (Códigos IP). Rio de Janeiro, 2017.

BARBI, I.; MARTINS, D. C. Conversores CC-CC Básicos Não Isolados. Edição dos Autores. Florianópolis, 2000.

BELLUR, Dakshina M.; KAZIMIERCZUK, Marian K. DC-DC converters for electric vehicle applications. In: 2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo. IEEE, 2007. p. 286-293.

BOSCH REXROTH AG. External Gear Pump High Performance AZPG, 2019.

BOSCH. Manual de Tecnologia Automotiva. 25ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. p. 1070-1075.

BRASIL, A. N. Hidráulica Básica e Máquinas de Fluxo. Faculdade de Engenharia Universidade de Itaúna. Itaúna, 2010.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR- 12 – Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos. Manuais de Legislação Atlas. 71ª. Edição. São Paulo: Atlas, 2013b.

BYD do Brasil LTDA. BYD eT7 11.200 Delivery: Ficha técnica, 2019.

BYD do Brasil LTDA. BYD eT8E: Ficha técnica, 2019.

CHEN, R.; LI, Q.; YU, X.; CHEN, L. e LI, H. Approaching practically accessible solid-state batteries: stability issues related to solid electrolytes and interfaces. Chemical reviews, v. 120, n. 14, 2019.

CHEN, Z.; XIONG, R.; LU, J. e LI, X. Temperature rise prediction of lithium-ion battery suffering external short circuit for all-climate electric vehicles application. Applied energy, v. 213, 2018.

CHEN, Z.; MI, C. C.; FU, Y.; XU, J. e GONG, X. Online battery state of health estimation based on Genetic Algorithm for electric and hybrid vehicle applications. Journal of Power Sources, v. 240, 2013.

CONSONI, F. L.; OLIVEIRA FILHO, A. A.; BARASSA, E.; BUIRAGO, J. M. e MARQUES, T. Estudo de Governança e Políticas Públicas para Veículos Elétricos. Universidade de Campinas. Promob-e. Brasília. 2018.

COP 21. UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT. Paris. 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acordodeparis/>>. Acesso em: 05 jun. 2020.

COPEL DISTRIBUIÇÃO. Manual de Instruções Técnicas – Equipamentos Especiais Cesto Acoplado para Guindauto, 2020.

CORRIGAN, S. Introduction to the Controller Area Network (CAN). TEXAS INSTRUMENTS, 2002.

DENTON, T. Electric and Hybrid Vehicles. Ed.:Routledge, New York, 2016.

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG E.V. (DIN). DIN 40050: Road vehicles – degrees of protection (IP-code); protection against foreign objects, water and impact; electrical equipment. Berlin,1993.

DIEESE. Nota Técnica nº 152 – “Desenvolvimento e estrutura da indústria automotiva no Brasil”. Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos. 2015. Disponível em: <<https://www.dieese.org.br/notatecnica/2015/notaTec152IndustriaAutomotiva.html>>. Acesso em: 10 de junho de 2020.

EMADI, A. Advanced Electric Drive Vehicles. Ed.:CRC Press, Boca Raton, 2015.

Associação Nacional dos Fabricante de Veículos Automotores; Boston Consulting Group. O caminho da descarbonização do setor automotivo no Brasil. 2021.

EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION
EN 50126: Railway applications — Part 1: - The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Bruxelas,2017.

EV SALES. 2018 ranking. 19 nov. 2018. Disponível em: <ev-sales.blogspot.com.br>. Acesso em: 29/05/2020.

FITZGERALD, A. E., KIGNSLEY, C.; STEPHEN, D.U. Máquinas Elétricas. 6ª. ed.: Bookman, 2006. p. 174-196.

FORSBERG, K. e MOOZ, H. The relationship of systems engineering to the project cycle. Engineering Management Journal, v. 4, n. 3, p. 36-43, 1992.

GRUPO MOURA. Apostila de Baterias Automotivas, 2007

GRUPO MOURA. Apresentação técnica EFB MOURA BATTERY, 2016

HABIB, A.A.; MAHMUD, M.; MOTAKABBER, S. M. A.; IBRAHIMYA, M. I. e ISLAM, S. A review: Energy storage system and balancing circuits for electric vehicle application. IET Power Electronics, v. 14, n. 1, p. 1-13, 2021.

HANNAN, M. A.; HOQUE, M. M.; MOHAMED, A.; AYOB, A. Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 69, p. 771-789, 2017.

HANNAN, M. A.; HOQUE, M. M.; HUSSAIN, A.; YUSOF, Y. e KER, P. J. State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations. IEEE Access, v. 6, p. 19362-19378, 2018.

HOQUE, M. M.; HANNAN, M. A.; MOHAMED, A. Voltage equalization control algorithm for monitoring and balancing of series connected lithium-ion battery. Journal of Renewable and Sustainable Energy, v. 8, n. 2, p. 025703, 2016.

HYBEL. Catálogo de Produtos. Criciúma, 2018.

IEA. Global EV Outlook 2017: two million and counting. IEA. Paris, p.65. 2017.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60034: Rotating electrical machines— Part 1: Rating and performance. Genebra, 2022.

IMAP. Catálogo Técnico de Cestas Aéreas - Linha Isolada 140000 SGI TDI. Antônio da Patrulha, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11898: Road vehicles — Controller area network (CAN) — Part 1: Data link layer and physical signalling. Genebra, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 6469: Electrically propelled road vehicles — Electrical safety — Part 3. Genebra, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 6722: Road vehicles — 60 V and 600 V single-core cables— Part 1: Dimensions, test methods and requirements for copper conductor cables. Genebra, 2011.

JUNG, C. Power up with 800V System. IEEE Electrification Magazine, 2017.

JAC MOTORS. FICHA TECNICA iEV1200T, 2019.

LIIMATAINEN, H.; VAN VLIET, O.; APLYN, D. The potential of electric trucks—An international commodity-level analysis. Applied energy, v. 236, p. 804-814, 2019.

LINDEN, D.; REDDY, T. B. Handbook of batteries. 3ª. ed.: McGraw-Hill, 1995.

LINSINGEN, Irlan Von. Fundamentos de sistemas hidráulicos. 1ª Ed. Florianópolis ED. da UFSC, 2001.

MARCA, L. Instalação guindaste c70g sobre coletor de lixo. Palfinger, 2020.

OMAR, N. et al. Evaluation of performance characteristics of various lithium-ion batteries for use in BEV application. 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. IEEE, 2010.

PEREIRA, A.M. Sistema de Tração de um ônibus elétrico híbrido com pilhas a combustível e baterias. Universidade de Federal do Rio de Janeiro, 2007.

POMILIO, J.A.; MORALES, H. K.; OTA, J. I. Y.; DECKMANN, S. M. Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica. Universidade de Campinas. Campinas, 2021.

QI, F.; WANG, M.; XU, L. Investigation and review of challenges in a high-temperature 30-kVA three-phase inverter using SiC MOSFETs. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 54, n. 3, p. 2483-2491, 2018.

RANDAU, S.; WEBER, D.A.; KÖTZ, O.; KOERVER, R.; BRAUN, P.; WEBER, A. e JANEK, J. Benchmarking the performance of all-solid-state lithium batteries. Nature Energy, v. 5, n. 3, p. 259-270, 2020.

SEN, B.; ERCAN, T; TATARI, O. Does a battery-electric truck make a difference? – Life cycle emissions, costs, and externality analysis of alternative fuel-powered Class 8 heavy-duty trucks in the United States. Journal of cleaner production, v. 141, 2017.

SOUZA, C. M. F. Balanço Elétrico – Eletrificação Veicular. Fiat Chrysler Automobiles, 2016.

SOUZA, C.M.F. Avaliação dos Parâmetros de Baterias Chumbo-ácido e sua Utilização para o Controle do Aquecimento de Combustível em Veículos Flex. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2016.

SOUZA, F.M. Eletrônica de Potência I. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2017.

STANLEY. CS25/28 Hydraulic pole chain saw user manual. New Britain, 2016.

TIME MANUFACTURING CO. VERSALIFT Electric Drive, disponível:<<https://versalift.com/electricdrive/>>. Acesso em: 20/01/2020.

VOLKSWAGEN AG, BMW AG, DAIMLER AG and POSCH AG WORKING GROUP. LV 215 – MOTOR VEHICLE HIGH VOLTAGE CONTACTS - Part 1: PERFORM SPECIFICATION, Berlin, 2013.

VOLKSWAGEN AG, BMW AG, DAIMLER AG and POSCH AG WORKING GROUP. LV 215 – MOTOR VEHICLE HIGH VOLTAGE CONTACTS - Part 2: TEST SPECIFICATION, Berlin, 2013.

VOLKSWAGEN CAMINHÕES E ONIBUS. VW e-Delivery 14 - Especificações Técnicas, 2021

VOLKSWAGEN CAMINHÕES E ONIBUS. VW e-Delivery 11 - Especificações Técnicas, 2021

WORLD ECONOMIC FORUM. Electric Vehicles for Smarter Cities: The Future of Energy and Mobility. Jan 2018.

XIONG, R.; CAO, J.; YU, Q.; HE, H. e SUN, F. Critical review on the battery state of charge estimation methods for electric vehicles. IEEE Access, v. 6, 2017.

XIONG, R.; HE, H.; SUN, F. e ZHAO, K. Evaluation on state of charge estimation of batteries with adaptive extended Kalman filter by experiment approach. IEEE Transactions on Vehicular Technology, v. 62, n. 1, 2012.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS LTDA. Análise Técnica Rede de Comunicação CAN BUS. Jaraguá do Sul, 2019.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS LTDA. Motores Elétricos: Guia de Especificação. Jaraguá do Sul, 2015.

ZHANG, P.; YAN, F.; DU, C. A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on bibliometrics. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 48, 2015.