



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica

Guilherme Felipe da Silva

**Análise técnica do desenvolvimento de uma
roçadeira elétrica com 1,5kW de potência para
trabalhos profissionais**

Uberlândia

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S586 2024	<p>Silva, Guilherme Felipe da, 1998- Análise técnica do desenvolvimento de uma roçadeira elétrica com 1,5kW de potência para trabalhos profissionais [recurso eletrônico] / Guilherme Felipe da Silva. - 2024.</p> <p>Orientador: Luciano Coutinho Gomes. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia elétrica. I. Gomes, Luciano Coutinho , 1972-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3</p>
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

Guilherme Felipe da Silva

Análise técnica do desenvolvimento de uma roçadeira elétrica com 1,5kW de potência para trabalhos profissionais

Trabalho apresentado ao programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como exigência parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Uberlândia

Orientador: Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes

Uberlândia

2024

Guilherme Felipe da Silva

Análise técnica do desenvolvimento de uma roçadeira elétrica com 1,5kW de potência
para trabalhos profissionais

Trabalho aprovado para a obtenção do
título de Bacharel no programa de
Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Uberlândia,
pela banca examinadora formada por:

Uberlândia, 22 de Março de 2024

Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes

Prof. Dr. Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira

Prof. Dr. Gustavo Brito de Lima

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me abençoado e amparado em todos os momentos de vida.

A minha família por sempre me ter dado apoio durante os tempos difíceis e estarem presentes nos momentos felizes.

Aos meus amigos, pelas grandes amizades e companheirismo durante toda a trajetória dentro da universidade e que fizeram colecionar boas histórias.

Ao Professor Dr. Coutinho pela paciência, auxílio e compreensão durante a confecção deste trabalho.

A todos os Professores da Faculdade de Engenharia Elétrica que estão dedicados a fornecer conhecimento de qualidade.

E a Universidade Federal de Uberlândia pelas inúmeras ofertas de carreiras e experiências durante o período da minha graduação.

Resumo

Este documento tem como objetivo desenvolver uma roçadeira elétrica capaz de suprir a carência de potência do produtor rural nas suas atividades cotidianas no campo. A implementação de um equipamento elétrico com rotação considerável e um alto torque para as tarefas rurais tornou-se necessária, uma vez que o maquinário elétrico disponível no mercado possui uma baixa potência, bem como as reclamações relacionadas às roçadeiras a combustão e as diversas inovações tecnológicas muitas vezes inacessíveis ao pequeno produtor. Desse modo, por meio da integração de um motor de corrente contínua Brushless, conversor SEPIC, microcontrolador, banco de baterias com a tecnologia LiPo e acoplamento de engrenagens por meio de corrente, foi possível desenvolver um protótipo de roçadeira que consegue atender a demanda de potência dos implementos manuais e proporciona diversos benefícios ao operador quando comparado ao motor a combustão.

Palavras-chave: roçadeira, roçadeira elétrica, conversor CC-CC, microcontrolador, corrente de transmissão, banco de baterias.

Abstract

This document aims to develop an electric mower capable of addressing the power deficiency of rural producers in their daily activities in the field. The implementation of an electrical equipment with considerable rotation and high torque for rural tasks became necessary, considering the low power of the electrical machinery available in the market, as well as complaints related to combustion mowers and the various technological innovations often inaccessible to small producers. Thus, through the integration of a brushless direct current motor, SEPIC converter, microcontroller, LiPo technology battery bank, and gear coupling through a chain, it was possible to develop a prototype mower that meets the power demand of manual implements and provides several benefits to the operator compared to a combustion engine.

Keywords: mower, electric mower, DC-DC converter, microcontroller, transmission chain, battery bank.

Lista de Figuras

Figura 1 – Roçadeira elétrica

Figura 2 – Roçadeira à combustão.

Figura 3 – Motor de Indução em corte

Figura 4 – Motor síncrono em corte

Figura 5 – Motor de corrente contínua em corte

Figura 6 – Topologia do conversor Buck

Figura 7 – Topologia do conversor Boost

Figura 8 – Topologia do conversor Buck-Boost

Figura 9 – Topologia do conversor CÚK

Figura 10 – Topologia do conversor SEPIC

Figura 11 – Esquema de pinos do TMS320F28378S (a) e o componente físico MSPM0G3107 (b).

Figura 12 – Arduino Uno R3

Figura 13 – Raspberry PI 4 Model

Figura 14 – Bateria de chumbo-ácido em corte

Figura 15 – Bateria de Lítio-Ion

Figura 16 – Bateria LiPo

Figura 17 – Engrenagem em contato direto com luva de conexão e outra engrenagem

Figura 18 – Acoplamento de engrenagens e corrente de transmissão

Figura 19 – Motor Brushless

Figura 20 – Conversor SEPIC

Figura 21 – Banco de baterias

Figura 22 – Sistema de transmissão

Figura 23 – Simulação do Arduino com $D = 0,547$ e frequência de 62.5kHz

Figura 24 – Osciloscópio no teste com $D = 0,547$ e frequência de 62,5kHz

Figura 25 – Simulação do Arduino com $D = 0,547$ e frequência de 62.5kHz

Figura 26 – Osciloscópio no teste com $D = 0,547$ e frequência 62.5kHz

Figura 27 – Simulação Arduino com $D=0,25$ e frequência 62.5kHz

Figura 28 – Osciloscópio no teste com $D=0,25$ e frequência 62.5kHz

Figura 29 – Simulação do conversor SEPIC no Proteus

Figura 30 – Resultado da simulação do conversor SEPIC com $D = 0,547$ e frequência 62.5kHz

Figura 31 – Resultado da simulação do conversor com $D = 0,25$ e frequência 62.5kHz

Figura 32 – Projeto final unindo todas as partes dimensionadas

Figura 33 – Representação do protótipo com capa de proteção dos componentes, guidão e cano de acoplamento dos acessórios.

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Dados técnicos do motor

Tabela 2 – Norma ASA 35 para engrenagens simples

Tabela 3 – Normas ASA para correntes

Tabela 4 – Dados para cálculo do conversor SEPIC

Tabela 5 – Valores de tensão registrados de acordo com a variação da razão cíclica

Sumário

1. Introdução	12
2. Referencial Teórico	15
2.1. Motor	15
2.2. Conversor	18
2.3. Controlador	21
2.4. Baterias	24
2.5. Transmissão	26
3. Metodologia	28
3.1. Escolha das peças	28
3.1.1. <i>Motor</i>	28
3.1.2. <i>Conversor</i>	30
3.1.3. <i>Controlador</i>	31
3.1.4. <i>Baterias</i>	32
3.1.5. <i>Acoplamento</i>	33
3.2. Memorial de cálculo	36
3.2.1. <i>Motor</i>	36
3.2.2. <i>Acoplamento</i>	38
3.2.3. <i>Conversor</i>	46
3.2.4. <i>Controlador</i>	56
3.2.5. <i>Bateria</i>	57
3.3. Simulação	60
3.4. Melhorias comerciais	68
4. Conclusão	70

5. Referências	71
6. Apêndice	74
Apêndice A – Código Arduino	74

1. Introdução

Ao longo do tempo, a crescente ênfase na criação de máquinas e tecnologias mais eficientes, capazes de oferecer um desempenho superior, tornou-se notável. Ao compararmos os motores elétricos atuais com os primeiros modelos comercializados, podemos observar um considerável avanço tecnológico que resultou na significativa redução de seu tamanho e peso, ao mesmo tempo em que mantêm ou aumentam sua potência. Como resultado, diversos setores estão direcionando esforços para automação de seus processos, incorporando motores e sistemas computacionais. Isso visa não apenas diminuir as chances de falhas humanas, mas também acelerar eficientemente a produção.

De acordo com a fabricante de motores WEG, cerca de 70% de todo consumo energético do setor industrial é devido ao emprego de motores elétricos, que representa cerca de 25% do consumo nacional de eletricidade (WEG,2019). E devido a essa grande demanda de motores, as fabricantes são obrigadas desenvolverem técnicas inovadoras para o mercado, para não só aumentarem suas vendas, mas que gerem grandes benefícios aos compradores e a rede de distribuição de energia elétrica.

Enquanto o setor industrial representa 37,4% de consumo de energia elétrica nacional, somando todas as cargas elétricas, os setores da agropecuária e agricultura juntos consomem cerca de 5,9% da energia disponível nacionalmente (BEN, 2022). Essa discrepância mostra que as tecnologias voltadas para o desenvolvimento rural estejam um pouco atrasadas. Uma vez que, esses setores são dependentes de motores para otimizar a produção.

Por conta dessa falta de motores elétricos para suprir as necessidades dos produtores rurais, eles optam em utilizar motores a combustão. Na maioria das fazendas possuem pelo menos uma roçadeira que utiliza o motor à combustão 2 tempos, como ilustrada na Figura 2, que leva esse nome por conta de funcionar somente em 2 etapas de operação, onde na primeira etapa ocorre a admissão e compressão da mistura ar combustível, que então segue para a segunda etapa de ignição da mistura e escape do produto da explosão. Esse tipo de motor pode ser encontrado em perfuradores, geradores, multicultivadores, subsoladores e nas roçadeiras, por ter um custo de aquisição baixo, mais fácil de ser utilizado e implementado nas atividades. Por conta disso, se tornou um motor enraizado na vida cotidiana dos produtores. À primeira vista apresentam um menor custo de aquisição, mas possuem uma alta manutenção, menor confiabilidade e contribuem para o aumento da poluição do meio ambiente e sonora. O que torna uma alternativa econômica a curto prazo, mas prejudicial a longo prazo.

Nas lavouras é recorrente diversas reclamações dos operadores ou de ajudantes, sobre o alto barulho que é contínuo por várias horas, do forte cheiro de fumaça por conter um aditivo lubrificante no combustível, e das fortes vibrações ocasionadas pelo acoplamento da embreagem do motor e a carga. Essas reclamações não só desagradam os produtores na utilização desses equipamentos, como podem ocasionar danos a sua saúde, como problemas de audição, respiratórios e ortopédicos.

Além desses malefícios, se tem também os danos ambientais pela utilização de motores à combustão seja como força motriz ou geração de energia, que são uma das principais fontes de emissão de gás carbônico e que contribuem substancialmente para o aumento do efeito estufa (SCOLARO; BELIGOJ; ESTEVEZ; ALBERTI; RENZI, 2021). E nos motores 2 tempos, que há a necessidade de fazer a lubrificação do cilindro e pistão no ato da combustão, colocando um óleo lubrificante como aditivo no tanque de combustível, se tem a carbonização do cilindro que degrada a vida útil do motor e a combustão dessa mistura de ar, combustível e lubrificante aumenta o nível de gases nocivos liberados na atmosfera pelo escapamento do motor, potencializando ainda mais o prejuízo ambiental e saúde individual.

Contudo, hoje em dia se é possível encontrar uma alternativa para o motor de combustão com a implementação da roçadeira elétrica no mercado, como pode ser visualizada pela Figura 1. Essas roçadeiras podem ser encontradas para cortar grama de jardins, pastos e terrenos com uma ótima eficiência. Mas quando se olha para o uso profissional, essas máquinas deixam a desejar, uma vez que sua potência não é compatível com as tarefas a serem realizadas. Um exemplo a ser citado é a utilização de um derriçador, que é uma carga que necessita de um torque e rotação mais elevados para uma boa operação, e como a roçadeira elétrica possui uma potência reduzida e nenhum acoplamento para contornar essa situação, ela acaba ficando com desempenho reduzido se comparado ao motor de combustão. Até mesmo a função de aparar grama, que para situações domésticas ou corriqueiras as roçadeiras elétricas existentes atendem bem, mas não atendem com eficiência ao trabalho profissional, uma vez que são submetidas a altos esforços e obstruções que são encontrados nas lavouras, como troncos, pedras e até o próprio relevo, que com os constantes choques da lâmina de corte e os obstáculos, podem degradar a sua vida útil, danificar o conjunto e aumentar o descontentamento do usuário

Em razão dos problemas relatados, se sentiu a necessidade de criar um equipamento que utilizasse um motor elétrico, que fosse capaz de entregar a mesma potência do motor a combustão, porém reduzindo a poluição sonora e ambiental. E utilizando um sistema de

transmissão diferente se consegue reduzir ou eliminar as vibrações ocasionado pelo acoplamento da embreagem e fazer um pequeno amortecimento dos choques com obstáculos. Dessa forma, proporcionando qualidade de vida ao operador nas suas atividades profissionais e benefícios ao ambiente de trabalho, além de poder fornecer funcionalidades que não são encontradas nas roçadeiras tradicionais.

Figura 1: Roçadeira elétrica.



Fonte: HUSQVARNA, 2024, <<http://tinyurl.com/yv6d6utm>>

Figura 2: Roçadeira à combustão.



Fonte: HUSQVARNA, 2024, <https://www.ecompletocdn.com.br/i/fp/6/25628_2_1414094640.jpg>

2. Referencial Teórico

2.1. Motor

De acordo com o livro Fundamento de Máquinas Elétricas de Stephen J. Chapman (CHAPMAN, 2015), as máquinas elétricas diferenciam três modelos, que são: máquinas de indução, síncronas ou de corrente contínua (CC).

A máquina de indução é a categoria de máquinas que se tem mais facilidade em encontrar no mercado devido a sua simplicidade de construção, custo reduzido, eficiência, torque robustez e confiabilidade (LEE; HUA; LONG; JIANG; IYER, 2021), onde a maioria das aplicações as máquinas de indução são utilizadas como motor. O tipo de construção dessas máquinas se assemelha muito ao que já foi dito, porém se tem duas diversificações dos rotores, sendo rotor gaiola de esquilo e bobinado, porém é largamente utilizado o do tipo gaiola (CHAPMAN, 2015).

O rotor tipo gaiola, consiste em um conjunto de barras de cobre curto-circuitadas nas extremidades do núcleo por anéis; tais barras estão inseridas dentro do núcleo e são dispostas com determinada angulação ao invés de totalmente retas. É feito dessa forma pois se consegue ter uma distribuição dos efeitos do campo magnético pelo rotor que provocam altos ruídos e vibrações na máquina, suavizando o movimento (VARSHNEY; GUPTA; DEBNAT, 2016); também com essa angulação das barras se tem uma redução no efeito de tranco ou cogging, que se dá quando o campo magnético faz o rotor iniciar sua rotação que provoca um torque repentino de partida.

A máquina de indução também pode ser chamada de máquina assíncrona (BOLDEA, 2017), isso se dá porque a velocidade do rotor não acompanha a velocidade do campo girante, que por conta desse detalhe se é mais encontrados os motores ao invés de geradores de indução. A relação entre a velocidade do rotor com a do campo girante é dita como escorregamento.

Dando sequência a categorização das máquinas, se tem as do tipo síncronas, e recebem esse nome por conta que a velocidade do eixo da máquina é igual à do campo girante (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014). Tal feito acontece pois agora se tem energização do rotor com corrente contínua, enquanto a armadura ainda recebe corrente alternada (CA); a corrente contínua para alimentação do rotor é conduzida à parte móvel por meio de escovas de carbono que estão em contato direto com anéis que estão presentes em

uma das extremidades do rotor. Por se ter um controle melhor do que as máquinas de indução, são largamente usadas como geradores síncronos, onde se tem um controle da velocidade do eixo e com isso fornece potência a uma frequência fixa, devido ao sincronismo do rotor e o campo girante. Além disso, as máquinas síncronas conseguem fazer o controle de reativos da rede fazendo ajustes na alimentação de corrente contínua do rotor e assim absorvendo ou fornecendo potência reativa para o sistema em que está conectada, sendo então uma característica que contribui em utilizar essas máquinas como geradores. Também se consegue encontrar motores síncronos em aplicações industriais com cargas conectadas em seu eixo, porém esses motores operando comumente como compensadores síncronos, por conta sua capacidade de controle de reativos da rede.

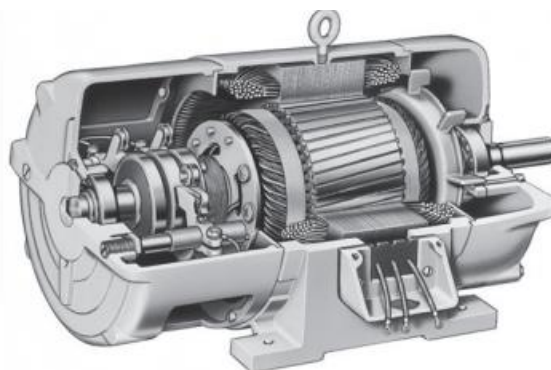
Apesar das máquinas síncronas apresentarem benefícios em relação as de indução, não se encontra com tanta facilidade esse modelo em aplicações que as utilizam como motores. Isso se dá pelo seu custo elevado de manutenção e fabricação, além de que a maioria dos motores síncronos não apresentam o mesmo nível de robustez e proteção contra umidade e poeira. Sendo assim, usados somente em objetivos onde a carga requer uma velocidade com o mínimo de variação.

E por fim, se tem os motores de corrente contínua que estão presente em uma infinidade de aplicações seja no meio industrial, residencial, brinquedos, equipamentos de ar-condicionado, controles, veículos elétricos etc. O princípio de funcionamento desses motores se difere um pouco dos já mencionados por não ser alimentado com corrente alternada, como isso não se consegue ter a geração do campo girante. No entanto, para que se haja a rotação do eixo, se utiliza comutadores que irão inverter a polaridade da alimentação de corrente contínua em determinado período de rotação do rotor, fazendo então com que aconteça o giro do motor (CHAPMAN, 2015). O funcionamento do comutador acaba tendo o efeito de faiscamento, isso acontece em determinado momento de troca de polaridade, onde a escova do comutador estará em contato com as duas partes de energização do rotor, assim ocasionando um pequeno curto-circuito, que acaba tendo um efeito negativo no rendimento da máquina. Mas, com o avanço da tecnologia, se tem máquinas CC que não fazem a utilização de escovas, onde a inversão de polaridade é feita a partir de um comutador eletrônico que faz a alteração por meio de um circuito eletrônico, tais máquinas são denominadas como Brushless (ZHU; HOWE, 2007).

Então, analisando as possibilidades do mercado e buscando atender em todos os pontos os requisitos de projeto de uma roçadeira elétrica, a escolha será um motor de corrente

contínua, que consegue satisfazer todas as exigências de desenvolvimento do protótipo em questão, onde sua escolha será debatida com mais detalhes no tópico 3.1.1.

Figura 3: Motor de indução em corte.



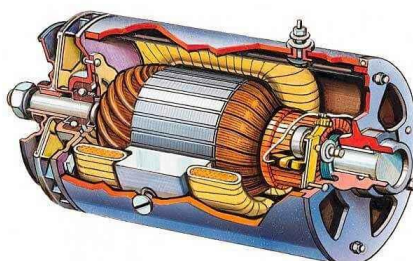
Fonte: CHAPMAN, Porto Alegre, 2018 .

Figura 4: Motor síncrono em corte.



Fonte: Camilo Castaño Mejia, YouTube, 2016, <<https://tinyurl.com/2s42khrm>>

Figura 5: Motor de corrente contínua (CC) em corte.



Fonte: ENGEASIER, 2022, <<https://tinyurl.com/3jnj9cuv>>

2.2. Conversor

O papel dos conversores CC-CC é basicamente o mesmo do transformador de energia CA, onde com um determinado arranjo se consegue controlar a tensão de saída, sendo ela, maior ou menor que a entrada. Contudo, os conversores se conseguem ter um ajuste muito mais fino e uma facilidade maior de controle da tensão de saída pois com eles não se tem a necessidade de alterar diretamente o arranjo dos componentes para tal ajuste. O controle de tensão é feito a partir do pulso emitido para o gate do transistor, onde a depender de sua razão cíclica (D), define o comportamento do conversor.

Os conversores CC-CC possuem vários modelos e metodologias disponíveis para uso. No entanto, o princípio de funcionamento é praticamente o mesmo para todos, onde se tem um conjunto de indutor, capacitor, diodo e transistor que são posicionados de forma que consigam ter uma tensão na saída do conversor. O indutor e o capacitor normalmente atuam como filtros para componentes harmônicas mais altas e controlam tensão e corrente internamente; o diodo e o transistor funcionam basicamente como chaves, onde um pulso de baixa tensão é enviado com uma determinada frequência e razão cíclica ao gate do transistor (que define o tempo que a chave ficará aberta ou fechada). Esse componente faz o chaveamento entre o coletor e o emissor, que da mesma forma funciona o diodo, porém não há necessidade de se ter um sinal nesse componente, onde o chaveamento irá acontecer quando houver inversão de polaridade nos seus terminais, que irá fazer ele fechar ou abrir como uma chave (HART, 2012).

Dentre os conversores se possuem topologias que abaixam ou elevam a tensão de saída em relação a entrada. O conversor abaixador utiliza de uma topologia bem simples e com ele independente da razão cíclica se tem uma tensão menor na saída, onde esse modelo é conhecido como Buck. Já a topologia que eleva a tensão, utiliza também de um arranjo simples, que também independente da razão cíclica, a tensão de saída sempre será maior que a entrada; esse tipo de conversor é conhecido como Boost. Tanto os conversores Buck e Boost, fazem suas operações de abaixar e elevar a tensão, respectivamente, ao um custo energético que afeta diretamente sua eficiência e não possuem um grande faixa de operação de tensão (WU; MU; GE; XING, 2016)

Também, existem topologias que elevam e abaixam a tensão, esses conversores utilizam de uma topologia um pouco mais complexa e aumentando o número de componentes passivos, mas a depender de sua razão cíclica a tensão de saída pode ser maior ou menor que a entrada,

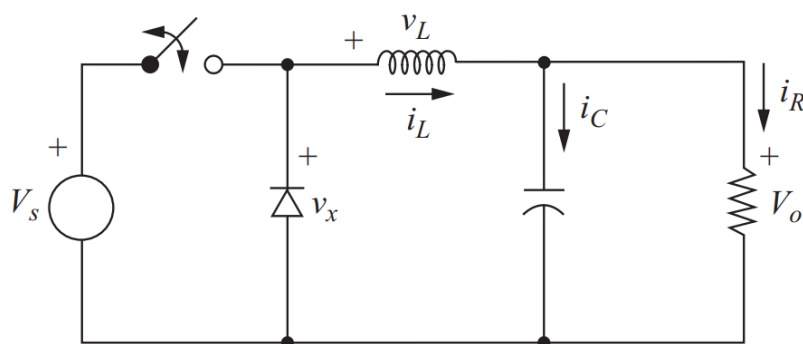
como são os casos dos conversores SEPIC e CÚK. No entanto, também existe o conversor Buck-Boost, que também consegue abaixar e elevar a tensão sem a necessidade de adicionar mais componentes passivos, sendo necessário somente fazer uma mudança no arranjo que une os dois conversores que lhe dão o nome.

Apesar da topologia Buck-Boost conseguir abaixar ou elevar a tensão, não se tem sua utilização em esquemas de alta potência, pois a topologia padrão possui um baixo rendimento energético, apesar de fornecer uma melhor vida útil da bateria (SOHELI; SAROWAR; HOQUE; HASSAN, 2018). Para isso, se tem as topologias dos conversores SEPIC e CÚK, que podem aguentar uma potência maior com uma menor deterioração dos componentes e um bom rendimento.

Os arranjos dos dois tipos de conversores são parecidos, porém algumas particularidades os diferem. No conversor CÚK, se tem um indutor de entrada que age como filtro para ruídos de altas frequências, pode apresentar tensão maior ou menor na saída se comparada a entrada, porém com a inversão de polaridade na saída. Já o conversor SEPIC, apresenta os mesmos componentes de entrada, contudo alterando a posição entre o diodo e o indutor de saída; esse conversor consegue fornecer uma tensão maior ou menor na saída se comparado a entrada e com a mesma polaridade de entrada (HART, 2012).

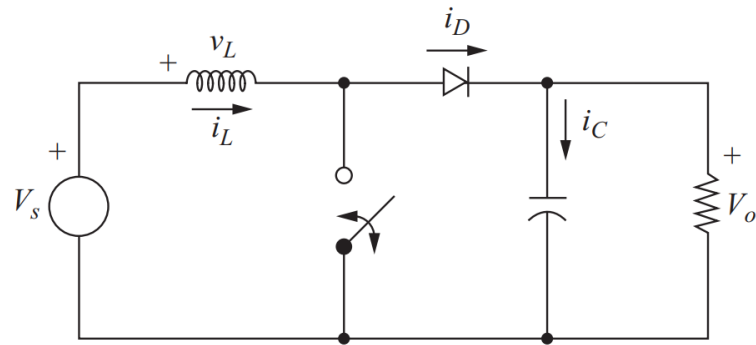
Analisando as possibilidades apresentadas, a escolha inicial para o projeto será o conversor SEPIC, que irá atender as necessidades de tensão do motor, garantindo seu bom funcionamento. Tal escolha terá seus pontos estudados no tópico 3.1.2

Figura 6: Topologia conversor Buck



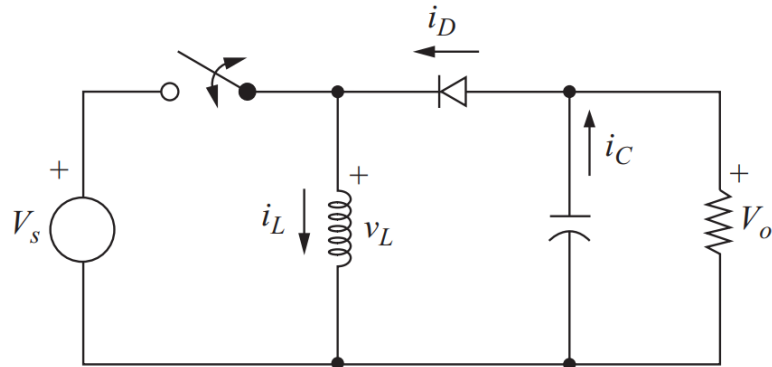
Fonte: HART, Porto Alegre, 2012

Figura 7: Topologia conversor Boost.



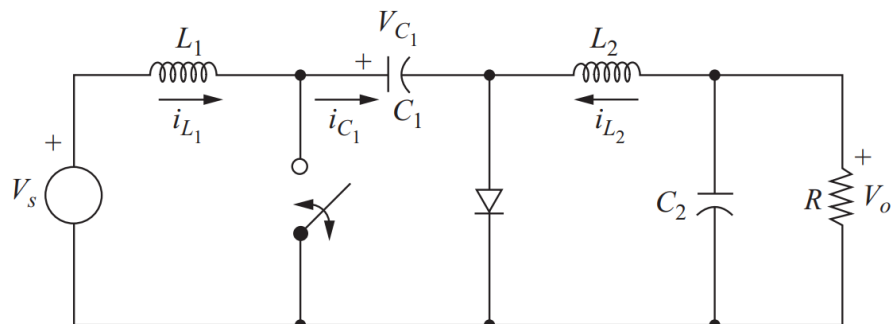
Fonte: HART, Porto Alegre, 2012

Figura 8: Topologia conversor Buck-Boost.



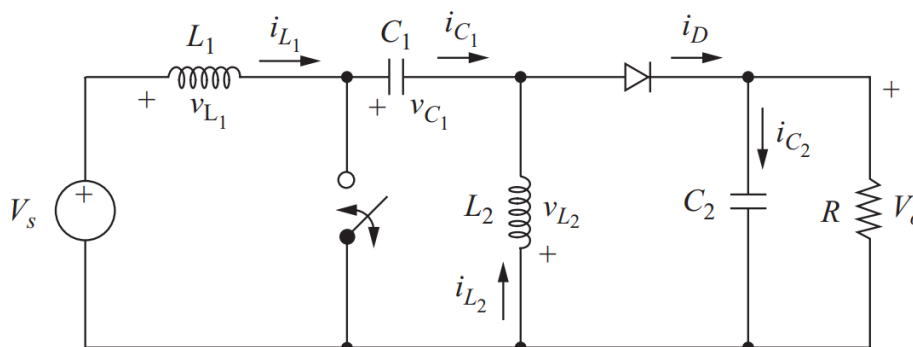
Fonte: HART, Porto Alegre, 2012

Figura 9: Topologia dos conversores CÚK.



Fonte: HART, Porto Alegre, 2012

Figura 10: Topologia conversor SEPIC.



Fonte: HART, Porto Alegre, 2012

2.3. Controlador

Em praticamente todos os projetos de automação de processos, utiliza-se um controlador para tornar as operações mais simples, e com isso se tornou uma peça essencial em processos industriais. E por serem bastante requisitados para a automação, foram criados vários modelos, oferecendo mais opções na escolha do controlador.

Para o perfeito funcionamento dos conversores CC-CC, é necessário um sistema capaz de emitir um sinal com frequência e razão cíclica ajustadas para que nos terminais de saída do conversor se tenha a tensão desejada. Para isso se tem várias alternativas disponíveis no mercado, mas das alternativas que fornecem um ajuste fino de controle e ainda se consegue implementar várias funcionalidades, os microcontroladores e microprocessadores são ideais para esse tipo de aplicação.

Os microcontroladores são chips que foram desenvolvidos para resolver operações lógicas em sistemas embarcados a partir de um terminal próprio de programação. São dispositivos que possuem uma unidade computacional (CPU), que é integrada com memórias de armazenamento de dados e de acesso rápido para funções temporárias (Memória Flash/SD e RAM, respectivamente), onde esse conjunto é acoplado com entradas e saídas físicas, que irão conciliar processos analógicos e digitais para utilização do usuário definir suas funções e aplicações.

No mercado pode-se encontrar microcontroladores AVR, como o Arduino Uno R3, que utiliza do controlador ATmega328p (ARDUINO, 2024), que fornece diversas funções e opções de acessórios que são acoplados diretamente em sua placa, aumentando suas funcionalidades. Esse modelo de microcontrolador possui uma interface de programação

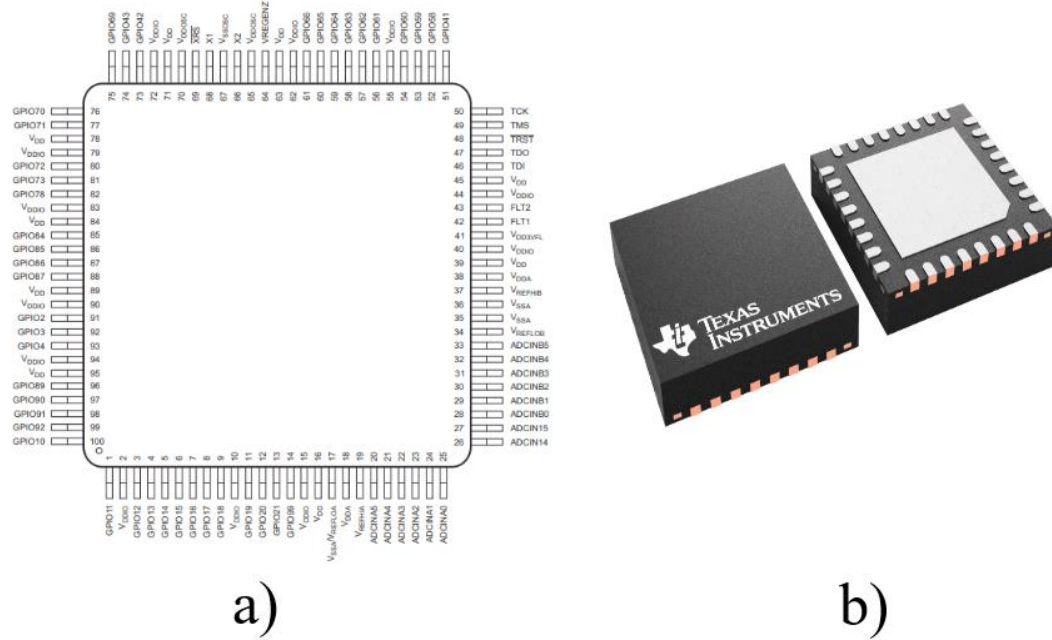
visual capaz de compilar e depurar o código e envia para a memória do Arduino através de um cabo. Normalmente, esse tipo de microcontrolador é utilizado em prototipagem

No entanto, se consegue encontrar no mercado diversos fabricantes e modelos de microcontroladores, que para uma aplicação profissional e comercial podem satisfazer o desenvolvimento de um projeto de forma segura e eficiente, como é o caso da fabricante Texas Instruments, com a família de controladores TMS e MSPM, como exemplo os microcontroladores TMS320F28378S e MSPM0G3107, que podem oferecer altos clocks de operação e controle sofisticado. Vale destacar também as fabricantes STMicroelectronics, Microchip e Analog Devices, que também fornecem ótimas opções de microcontroladores

Os microprocessadores são semelhantes aos microcontroladores, possuindo CPU, memórias RAM e Flash, e entradas e saídas para periféricos para propósitos do usuário. Porém com esses componentes se é capaz de utilizar um sistema operacional (SO) e desenvolver um ambiente de trabalho único dentro de sua arquitetura. Por ter a possibilidade de se instalar um SO em sua memória, a gama de aplicações de utilização dos microprocessadores aumenta consideravelmente, abrindo um caminho de possibilidades mais complexas e usuais, com a implementação de apenas um dispositivo. No mercado encontra várias opções para aquisição de microprocessadores, porém os dispositivos da marca Raspberry são mais conhecidos e usuais, como o modelo Raspberry PI 4 Model, que são implementados em automações residenciais, comerciais e industriais com mais usabilidade. No entanto, as fabricantes Texas Instruments, STMicroelectronics, Microchip e Analog Devices, também possuem em seu acervo excelentes escolhas de microprocessadores competentes para se utilizar em diversas aplicações de automação.

Sabendo das inúmeras possibilidades de escolha e como pode ser visto no tópico 3.1.3, esse projeto utilizará o microcontrolador Arduino Uno R3, que apesar de apresentar algumas limitações, em um único produto conseguimos ter um controlador capaz de atender as especificações do projeto, com um ambiente de programação facilitado e fácil implementação.

Figura 11: Esquema de pinos do TMS320F28378S(a) e o componente físico MSPM0G3107(b).



Fonte: Texas Instruments, 2024. < <https://www.ti.com/>>

Figura 12: Arduino Uno R3.



Fonte: ARDUINO, 2024, < https://store.arduino.cc/cdn/shop/products/A000066_03.front_1000x750.jpg?v=1629815860>.

Figura 13: : Raspberry PI 4 Model.



Fonte: MAKER HERO, 2024, <<https://www.makerhero.com/wp-content/uploads/2019/11/DRA43-5-min.jpeg>>.

2.4. Baterias

As baterias são componentes que foram responsáveis pelo grande avanço da tecnologia, uma vez que possibilitou a criação de dispositivos portáteis, com praticamente as mesmas funções que se encontra nos equipamentos fixos. E por possuir alta usabilidade, a criação de bancos de baterias com alta eficiência virou uma necessidade, sendo desenvolvidas frequentemente novas topologias que beneficiam seu rendimento. No mercado, existem três modelos típicos de baterias, as de chumbo-ácido, Lítio-Ion e LiPo.

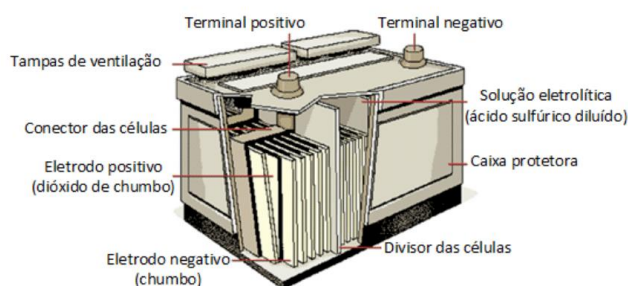
As baterias de Chumbo-Ácido são as mais fáceis de se encontrar, uma vez que está presente em veículos e bancos de bateria. Esse tipo de bateria teve uma grande evolução com o tempo, e hoje pode ser comparada às baterias que usam outras reações químicas, como as de Lítio, e ainda conseguir ser praticamente 100% reciclável, fornecendo segurança no seu uso (MCKEON, 2014). Como o seu nome já diz, esse tipo de bateria possui uma reação química que utiliza de um metal, nesse caso o Chumbo, e um ácido, onde o Ácido Sulfúrico é comumente utilizado, que formam uma solução capaz de produzir energia elétrica.

Já as baterias de Lítio-Ion, são aquelas que possuem em sua composição o Lítio como principal material, que é um metal positivamente carregado e muito leve, com isso reduzindo o tamanho das baterias se comparada as de Chumbo-Ácido. Nessas baterias, se há a necessidade de combinar esse metal com outro elemento, pois o Lítio por possuir cargas positivas e compõem o catodo da bateria, então se deseja colocar materiais que irão comportar como anodo. E o tipo de bateria que prevalece no mercado é a de Óxido de Titânio e Lítio (ROUHOLAMINI, 2022).

Junto com as baterias de Lítio-Ion se tem também uma derivação de topologia que são as baterias do tipo LiPo, que são uma liga polimérica de Lítio, que fornece um peso ainda mais leve, maior confiabilidade e segurança, ao troco de fornecer um pouco menos de capacidade energética. Esse tipo de bateria possui boas características como maior vida útil, tensão maior por célula, baixo fator de autodescarga, entre outros; no entanto, quanto maior for o número de células utilizadas para compor a bateria de LiPo, pode diminuir a sua confiabilidade. (YANG; JIANG; DENG; 2015).

Quando se olha nos parâmetros de construção deste protótipo, a escolha das baterias de LiPo é mais atrativa, pois fornece uma capacidade um pouco maior pelo mesmo peso das baterias de Lítio-Íon, dessa forma, com as mesmas dimensões se consegue ter uma autonomia maior. Onde seus detalhes são analisados no tópico 3.1.4.

Figura 14: Bateria de chumbo-ácido em corte.



Fonte: EMBARCADOS, 2024, <<https://embarcados.com.br/wp-content/uploads/2020/10/bateria-chumbo-acido-850x510.png>>.

Figura 15: Bateria de Lítio-Ion.



Fonte: RAISA, 2024, <<https://tinyurl.com/j2847wpp>>.

Figura 16: Bateria de LiPo.



Fonte: RAISA, 2024, < <https://tinyurl.com/2swvmx6h> >.

2.5. Transmissão

Quando se entra na área de transmissões mecânicas, a gama de possibilidades é bem vasta, sendo possível combinar engrenagens, polias, correias, correntes dentre outros para fazer que seja propagada uma potência entre carga e motor.

Para qualquer projeto, o melhor método de acoplamento existente é quando o eixo do motor é diretamente conectado ao eixo da carga, o que evita qualquer tipo de perda. Porém, em alguns casos não se é possível fazer esse acionamento, sendo necessário adotar uma metodologia diferente.

Nos casos que se tem a junção de polias e correias, essa transmissão de potência mecânica fica prejudicada, pois como não há um ‘apoio’ na polia, a correia tem a possibilidade de não aderir a superfície da peça e acabar deslizando e com isso aumentando a perda de potência. Mesmo quando se estica para se ter um melhor acoplamento, se tem um aumento de atrito entre correia e polia, essa tensão pode ocasionar numa menor vida útil do conjunto e uma perda no rendimento.

Então, conhecendo os sistemas disponíveis para acoplar uma carga, se percebe que os métodos mais eficientes são os que possuem engrenagens dentadas, que podem estar em contato direto ou interligadas por correntes.

Para as engrenagens com contato direto é necessário a constante lubrificação do acoplamento para assim evitar desgastes precoces, que conseqüentemente diminui seu rendimento. A lubrificação normalmente é feita em uma câmara isolada, que é preenchida com graxa ou óleo que ficam em contato direto e uniforme com as peças, aumentando a necessidade de se ter um ambiente com baixa sujidade e uma necessidade de manutenção

constante do fluido. Já a conexão de engrenagens feita por corrente não se tem as mesmas exigências, podendo trabalhar em ambientes mais sujos sem a necessidade de uma câmara de lubrificação, onde um bom exemplo de seu uso é a relação de transmissão em motos, que conseguem suportar diversas situações com pouca manutenção de lubrificação, em longos períodos de uso, sem grandes impactos na sua performance e rendimento. No entanto, sua lubrificação deve ser feita por algum tipo de óleo não tão viscoso e sem aditivos para garantir sua maior vida útil (BUDYNAS; NISBETT, 2015).

Com as vantagens de manutenção apresentadas, a escolha do acoplamento de engrenagens por meio de corrente é a que melhor irá atender as especificações desse projeto, contudo, os detalhes dessa decisão serão apresentados no tópico 3.1.5

Figura 17: Engrenagem em contato direto com luva de conexão e outra engrenagem.



Fonte: MULTENGRENAGENS, 2024, <<https://tinyurl.com/3vnn77fb>>.

Figura 18: Acoplamento de engrenagens e corrente de transmissão.



Fonte: GO DISTRIBUIÇÕES, 2024, <<https://tinyurl.com/452msmvu>>.

3. Metodologia

3.1. Escolha das peças

Nesse subcapítulo será debatido sobre a escolha das peças que irão compor o projeto, levando em consideração o que já foi apresentado no capítulo anterior. Esse tópico será dividido nas seguintes partes: escolha do motor, escolha do tipo de conversor, escolha do controlador, baterias e o tipo de acoplamento entre motor e carga.

3.1.1. Motor

O tipo de motor que melhor se encaixa a esse projeto é o motor de corrente contínua Brushless, pois olhando suas especificações se tem um motor mais adequado, conseguindo ter um bom desempenho atrelado a uma fácil adaptação, possuindo um peso menor que os motores síncronos e de indução, exigindo uma tensão reduzida. O leque de opções para motores CC é muito grande, podendo encontrar modelos que funcionam de 12V CC até 600V CC, para aplicações móveis, e até 3kV CC, para aplicações industriais. E dentro desta topologia, a categoria de motor Brushless é mais eficiente do que o motor com escovas, pois com ele não se tem as perdas pelo faiscamento, o que aumenta ainda o interesse em utilizá-lo.

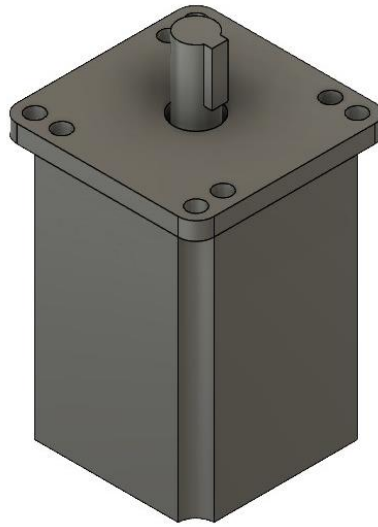
Se for olhar para um ambiente rural onde se necessita de equipamentos com maior robustez, durabilidade e que conseguem desempenhar um ótimo trabalho mesmo em situação muito atípica de sujidade, temperatura e esforço, o motor de indução poderia ser o modelo mais adequado para aplicação. Porém, por conta de sua construção, esses motores costumam ser muito pesados de acordo com a sua potência. Utilizando como base a tabela de motores de indução W22 Super Premium da fabricante WEG (WEG, 2024), se percebe que os motores iniciam com seu peso em 9 Kg em 2 polos, que à primeira vista pode parecer pouco, porém se levar em consideração um turno de trabalho constante esse valor começa a ser considerável, além de que, esse é o peso do motor mais fraco da fabricante, de 0,75 CV de potência. E nesse ponto ainda foi considerado o controle que deve ser feito para conversão de energia CC – CA e as baterias, que irão aumentar consideravelmente o peso do conjunto final. Por conta desses problemas que irão dificultar a usabilidade do equipamento e irá reduzir drasticamente a portabilidade, o motor de indução não é indicado para usar no projeto.

Em sequência se tem os motores síncronos, que apesar de serem também AC e ainda necessitar de uma alimentação CC no rotor, apresentam uma grande vantagem de peso se comparado ao de indução. Em teor de comparação, utilizando os motores síncronos das fabricantes Siemens (SIEMENS, 2017), para o mesmo peso de motor, se consegue ver 2 vezes mais potência no eixo do que nos de indução, 1,5 HP do motor síncrono contra 0,75 CV do motor de indução. Contudo, esse motor possui algumas características que devem ser levadas em consideração que são a tensão de operação e conversor de energia. Apesar de mostrarem um peso e tamanho reduzido, esses motores síncronos exigem uma tensão muito alta tanto para a armadura quanto para o rotor, sendo de ordem de 380V, que levando em consideração um conjunto de baterias de 20V ou 40V, se deve ter um conversor resistente e bem isolado para evitar curtos-circuitos. Dentre as soluções das fabricantes para ligar seus motores, se encontra os conversores de energia que podem ser ligados diretamente ao banco de baterias e no motor, sem a necessidade de um controlador externo. Porém, além de apresentar um custo de aquisição alto, também exigem uma tensão das baterias na ordem de 540V CC, para uma tensão de 380V. Por conta do alto nível de tensão exigido pelos equipamentos do motor síncrono que podem ocasionar acidentes em ambientes rurais e pelo custo de aquisição do conjunto, o motor síncrono deixa de ser uma opção para o projeto.

Por conta desses problemas relatados das outras topologias de motores, a utilização do motor CC Brushless é benéfica ao projeto. Mas o único problema desses motores é a escassez no mercado, que por se tratar de uma aplicação muito específica, se percebe que há uma falta desse equipamento. Mesmo com a importação, quando se tem modelos compatíveis, não consegue obter com facilidade informações importantes para projeto. Apesar desse detalhe, não será um impedimento para demonstrar sua aplicação prática.

Para se ter uma representação do motor que será incorporado ao projeto, realizou-se uma modelagem do mesmo no programa Fusion 360, com o objetivo de idealizar essa montagem. Então de acordo com a figura 19, se tem a representação do motor utilizado.

Figura 19: Motor Brushless.



Fonte: Autoria própria, 2024

3.1.2. Conversor

Para o conversor que atende este projeto o modelo SEPIC foi escolhido, pois com ele consegue operar como um conversor Buck-Boost, porém com uma eficiência um pouco maior, além de fornecer um baixo esforço nos componentes devido ao chaveamento, redução dos níveis de ripple de tensão e corrente (SIVAPRIYA, MINIMARAN, BASKARAN, 2017), uma maior resistência a variação de tensão e ruídos na entrada, uma estabilidade aprimorada em baixas potências e uma ampla faixa de operação de tensão. No entanto, como se tem um aumento de componentes e a utilização de um capacitor eletrolítico, a confiabilidade do sistema pode ser prejudicada, mas se tratando de um protótipo o conversor atende bem. Uma escolha de componentes e alteração do conversor seja necessária para se ter um projeto que pode ser inserido no mercado.

O conversor CÚK possui uma sensibilidade maior para variações de tensão, possui menor usabilidade em aplicações de baixa tensão e apresenta instabilidade quando opera com baixa potência, que são pontos levados em consideração. Porém isso pode ser contornado, fazendo modificações de sua topologia, com isso se consegue ter uma redução nos esforços de corrente e tensão sobre os componentes e de seus respectivos ripples, mantendo assim uma polaridade inversa na saída do conversor (TUVAR, AYALANI, 2019). E apesar, de se ter essa solução que equipara ao conversor o SEPIC, não é tão viável pois se deve fazer alterações a

topologia base para fornecer quase os mesmos benefícios, além de não atender à exigência de estabilidade a baixa potência e tensão.

Como no projeto se deseja elevar e abaixar a tensão em uma única topologia, pode-se descartar os modelos Buck e Boost. E como o conversor SEPIC já possui uma forma de operação melhor que o Buck-Boost, então se descarta essa topologia também.

Portanto, a melhor escolha é o conversor SEPIC, que como será visto a diante, irá operar com uma faixa de tensão de partida em 0V até chegar à tensão de operação do motor, porém operando com uma tensão de entrada próxima a tensão máxima de saída.

A figura 20, mostra a modelagem 3D que representa de forma didática a organização dos componentes do conversor. Uma observação a ser feita na modelagem, os componentes parecem ser muito grandes e outros muito pequenos, isso acontece pois se utilizou modelagem já pronta por outros usuários, e dessa forma, não se tem uma padronização de elementos.

Figura 20: Conversor SEPIC.



Fonte: Autoria própria, 2024

3.1.3. Controlador

Para a escolha do controlador se tem uma facilidade, pois sabendo qual é o conversor e que o motor não vai realizar trabalhos de precisão, mas sendo necessário se ter uma boa responsividade, com possibilidade de implementar funções futuras com certa facilidade sem

a necessidade de instalar qualquer software no dispositivo, se escolhe o microcontrolador Arduino.

O microprocessador a primeiro momento parecer ser mais interessante ao projeto uma vez que oferece mais possibilidade de funções, contudo o fator decisivo para o projeto além do peso é o custo de implementação. E comparando os dois componentes, o microcontrolador é mais fácil e barato de implementar do que o microprocessador. Além de que as funções a serem implementadas futuramente não são tão complexas, fazendo que o microprocessador seja uma escolha superestimada ao projeto.

Portanto, a escolha do microcontrolador Arduino é mais do que suficiente para esse projeto, pois possui uma interface de programação própria, fácil implementação, e tira a necessidade de ter que calcular cada componente que irão fazer o conjunto do controlador funcionar. Nesse primeiro momento o Arduino irá atuar como acionador, que para essa função poderia ser facilmente substituído ao acrescentar um potenciômetro no circuito de armadura do motor, mas por fazer uma partida suave, parada suave e pela possibilidade de funções que serão implementadas futuramente esse componente se torna necessário.

3.1.4. Baterias

Para a escolha das baterias, se deve ficar atento ao peso que esse banco de baterias terá junto ao projeto, pois esse é o fator crucial para essa execução. Além de que, o banco de baterias deve se ter cuidados com temperatura e nível de descarregamento para que não afete a vida útil das células.

Sabendo desses detalhes e se apoiando na teoria apresentada no capítulo anterior, se escolhe as baterias do tipo LiPo, que apresentam um menor peso se comparado os outros modelos, mesmo apresentando uma menor capacidade de armazenamento.

As baterias de chumbo-ácido já foram descartadas de imediato, pois para uma capacidade mais alta seu peso fica muito elevado, podendo alcançar facilmente 30kg, que é impraticável para um projeto onde se tem um manuseio de um operador.

Já as baterias de Lítio-Ion poderiam encaixar no projeto, mas por fornecerem um nível de tensão mais baixo, se deve ter mais células para atingir a tensão desejada e com isso aumentando seu peso. Também para uma descarga elevada e uma alta circulação de corrente a sua estabilidade fica afetada, juntamente com seu rendimento. Dessa forma, não se fez escolha das baterias de Lítio-Ion.

Com as baterias de LiPo, se consegue ter um menor peso, devido ao seu nível de tensão maior e por sua topologia fornecer um peso reduzido se comparado as outras tecnologias. Assim, com os devidos cálculos se tem o dimensionamento do banco de baterias que irá atender as especificações desejadas da roçadeira, com um alto desempenho.

A figura 21 que vem a seguir, representa o banco de baterias a ser utilizado no projeto. E seu formato adotado será discutido a diante na seção de cálculo desse componente.

Figura 21: Banco de baterias.



Fonte: Autoria própria, 2024

3.1.5. Acoplamento

Por fim, se tem a escolha do tipo de acoplamento que será feito entre o motor e o eixo da carga.

Como apresentado anteriormente, o melhor meio de acoplamento existente seria conectar a carga diretamente no eixo do motor. Porém o projeto do motor deve se comportar a atender as necessidades de torque e velocidade da carga, que não é o caso desse projeto. Onde o motor possuirá uma velocidade bem reduzida se comparada a necessidade da carga. Dessa forma se faz necessário utilizar um acoplamento capaz de transmitir a potência do eixo do motor para a carga com velocidade maior e menor torque, com o máximo de eficiência possível.

Sabendo disso o acoplamento de engrenagens que utiliza corrente se torna mais atrativo, pois o uso profissional da roçadeira irá ocasionar muitos esforços para o acoplamento que poderão danificar os dentes das engrenagens se estiverem em contato direto. Danos por desgastes, serão corriqueiros para o sistema que utiliza corrente, mas por se tratar de um sistema mais robusto com engrenagens mais aparente, apresenta maior durabilidade e resistência a impactos, além de não necessitar de uma lubrificação constante, como nos sistemas de transmissão das motocicletas.

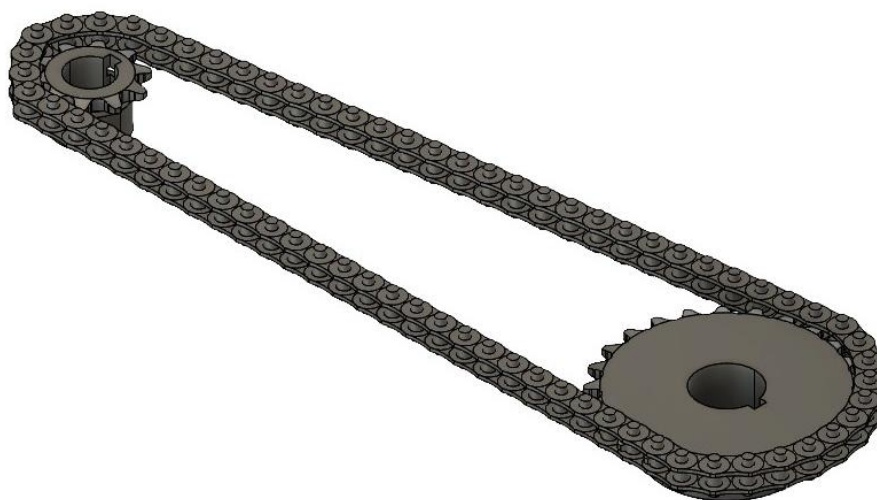
Dos modelos de correntes disponíveis no mercado, pode-se filtrar em dois tipos usados frequentemente, de rolo e de precisão. As correntes de rolos são as mais encontradas, pois são aquelas que possuem uma bucha de aço, que são responsáveis pela absorção de impactos e faz o espaçamento entre os dentes da relação. Já a de precisão se trata de uma corrente mais justa a engrenagem e é altamente utilizada dentro de motores para fazer a sincronização de válvulas, pois não há uma folga entre os espaçamentos como na de rolo.

Apesar das correntes de precisão ter um rendimento maior e serem mais precisas, esse modelo exige uma lubrificação constante de suas juntas dentro de uma câmara isolada para não se ter um desgaste excessivo das peças. Por conta desse detalhe, a utilização da corrente de rolo é mais atrativa para o projeto, pois não necessita da lubrificação constante, além de fornecerem uma tolerância a impacto muito maior, por conta de suas buchas realizarem a função de amortecimento.

Portanto, para esse projeto será utilizado o sistema de acoplamento com engrenagens e corrente de rolos, a fim de aumentar a confiabilidade e durabilidade sem a necessidade de criar um compartimento apropriado para acondicionamento do sistema e lubrificação. Com isso, se tem a utilização de engrenagens que conseguem ter uma eficiência muito próxima do acoplamento direto, que fazendo os devidos ajustes nos tamanhos, se consegue atingir a velocidade desejada. E por se tratar de um ambiente rural, onde o profissional irá trabalhar no meio da lavoura com alto teor de poeira e sujeira, o conjunto de transmissão pode oferecer uma solução segura, baixa manutenção, custo reduzido e excelente rendimento.

A figura 22, mostra a modelagem do acoplamento de corrente e engrenagem utilizado nesse projeto.

Figura 22: Sistema de transmissão.



Fonte: Autoria própria, 2024

3.2. Memorial de cálculo

3.2.1. Motor

Iniciando o dimensionamento dos equipamentos e componentes que irão compor a roçadeira elétrica, o motor é a parte principal desse desenvolvimento, pois é dele que se irá definir as especificações do acoplamento e do conversor CC-CC.

Já definido que o motor será Brushless a busca se torna mais simples, onde se consegue definir a partir do cálculo da potência da carga rotativa que será acoplada em seu eixo.

De acordo com Chapman (CHAPMAN, 2015), a potência de uma carga rotativa pode ser encontrada seguindo a fórmula 1.1.

$$P = \omega \cdot \tau \quad (1.1)$$

Onde:

P – Potência [W]

ω – Rotação [rad/s]

τ – Torque [N.m]

Por essa fórmula pode-se notar que a rotação é dada em radianos por segundo (rad/s), contudo em diversos manuais e datasheets se encontra que a velocidade do eixo é representada por rotações por minuto (RPM). Dessa forma, é necessário a utilização de uma fórmula para se ter a conversão das unidades como a equação 1.2 representada a seguir.

$$\omega = \frac{N}{60} * 2\pi \quad (1.2)$$

Onde:

N – Rotação [RPM]

Unindo as expressões, se tem a fórmula 1.3.

$$P = \frac{N}{60} * 2\pi * \tau \quad (1.3)$$

Com isso, se consegue definir a potência do motor para atender a demanda da carga.

Em pesquisas no mercado, contemplando roçadeiras à combustão das principais marcas, como Shindaiwa, Stihl e Husqvarna, se descobriu que a rotação do eixo pode variar de 7000 a 12000 RPM e o torque pode variar entre 1 e 3N.m, em contrapartida, as cargas que serão acopladas têm uma exigência de potência bastante linear, em média elas operam bem com 7500RPM e 1,5N.m, dessa forma se obtém a seguinte potência exigida pela carga:

$$P = \frac{7500}{60} * 2\pi * 1,5$$

$$P = 1178,0972 \text{ W}$$

Então conhecendo a potência da carga, se consegue filtrar o motor a ser utilizado e fazer uma escolha prévia do modelo.

O motor escolhido será da marca Brushless, que leva o mesmo nome de sua construção e modelo. Olhando o catálogo de produtos da fabricante o motor Brushless-D110DLD1500-48 é ideal, pois possui uma potência de 1500W e irá atender com folga a exigência da carga. Essa potência excedente será explicada no próximo tópico, onde é sendo necessária por conta das perdas mecânicas ocorridas no conjunto de acoplamento e assim evitando que a falta de potência sobrecarregue o motor.

O motor escolhido possui os seguintes parâmetros técnicos, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Dados técnicos do motor.

Dados Motor	
Potência	1,5 kW
Tensão	48 V
Corrente	39,06 A
Torque	4,78 N.m
Rotação	3000 RPM

Fonte: Brushless

A fim de conseguir organizar todo o projeto e fazer seu correto dimensionamento, se deseja encontrar o rendimento do motor, que pode ser calculado a partir da seguinte fórmula:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{P_o}{V_i * I} \quad (1.4)$$

$$\eta = \frac{1500}{48 * 39,06}$$

$$\eta = 80\%$$

A partir desse cálculo se poderá definir a potência que será drenada da bateria. E esse rendimento será utilizado como rendimento global do motor, apesar de não ser uma prática muito viável e fora do ideal de cálculo, mas a fabricante não fornece dados suficiente para executar um cálculo mais preciso de eficiência do motor a depender da carga em seu eixo.

3.2.2. Acoplamento

Nesta seção se terá o dimensionamento do acoplamento que nesse projeto será através de correntes de transmissão.

De acordo com Zhang e Tak (ZHANG; TAK, 2020), Para se definir o rendimento de todo o conjunto da corrente de transmissão, primeiro se deve conhecer quais serão as perdas na bucha e no pino, devido sua angulação de operação, torque e força de contra torque que serão exercidas. Também, se deve conhecer o coeficiente de amortecimento, que mostrará os esforços que ocorrerão, além de ser necessário para calcular a força de amortecimento.

Para se encontrar a perda de potência nas buchas, utiliza -se da fórmula 2.1.

$$W_{Bucha} = \frac{\pi}{2} * \frac{\sin(\theta)}{\sqrt{1 + \mu_2^2} * \sin(\beta - \theta)} * T_c * \cos(\gamma) * \mu_2 * R_{bo} * \theta \quad (2.1)$$

Onde:

W_{bucha} - Perda da bucha [W];

θ – Ângulo da corrente relacionada a conexão na engrenagem [rad];

β – Ângulo de pressão nominal [rad];

γ – Ângulo de offset lateral entre as engrenagens [rad];

μ_2 - Coeficiente de fricção entre bucha e o rolo;

T_c – Tensão de esticamento da corrente [N];

R_{bo} – Raio do rolo [m].

Já para encontrar as perdas no pino se utiliza a equação 2.2.

$$W_{pino} = 2 * \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \mu_1^2}} * T_c \right) * \mu_1 * R_{bi} * \theta \quad (2.2)$$

Onde:

W_{pino} – Perdas no pino [W];

μ_1 – Coeficiente de fricção entre o pino e a bucha;

R_{bi} – Raio interno da bucha [m];

Sabendo dessas equações, se consegue definir quais serão as perdas do conjunto quando estiver em operação. Porém para se definir o rendimento com clareza, deve ter conhecimento da força de amortecimento que será exercida, que pode ser calculada seguindo a equação 2.3, que demonstra todo esforço exercido nas peças que compõem a corrente de transmissão.

$$F_d = D_{corrente} [R_{s,1} * \sigma_1 * \cos(\sigma_1 - \theta_{in,1}) - R_{s,2} * \sigma_2 * \cos(\sigma_2 - \theta_{in,2})] \quad (2.3)$$

Onde:

F_d – Força de amortecimento;

$D_{corrente}$ – Coeficiente de amortecimento;

$R_{s,1}$ – Raio de condução entre a corrente e a engrenagem primária;

σ_1 – Ângulo entre a circunferência de assentamento da conexão do elo da corrente com o primeiro dente da engrenagem primária;

$\theta_{in,1}$ – Ângulo de conexão relacionado ao eixo x entre a primeira conexão do elo da corrente com as engrenagens primária e secundária.

$R_{s,2}$ – Raio de condução entre a corrente e a engrenagem secundária;

σ_2 – Ângulo entre a circunferência de assentamento da conexão do elo da corrente com o primeiro dente da engrenagem secundária;

$\theta_{in,2}$ – Ângulo de conexão relacionado ao eixo x entre a primeira conexão do elo da corrente com as engrenagens secundária e primária.

Então definido a força de amortecimento, as perdas nas buchas e rolos, rotação e torque que será exercido sobre o conjunto engrenagem corrente, é utilizado a fórmula 2.4, para definir o rendimento da relação de transmissão.

$$\eta = \frac{T_0 * \omega_{s,2}}{T_0 * \omega_{s,2} + N_{s,1} * \omega_{s,1} * (W_{pin} + W_{bush}) + |F_d| * \omega_{s,1} * R_{s,1}} \quad (2.4)$$

Onde,

$\omega_{s,1}$ – Rotação da engrenagem primária [rad/s];

$\omega_{s,2}$ – Rotação da engrenagem secundária [rad/s];

$N_{s,1}$ – Número de dentes da engrenagem primária;

T_0 – Torque incidente na primeira engrenagem [N.m];

$R_{s,1}$ – Raio da primeira engrenagem.

Ao analisar a expressão 2.4, se percebe a aceleração das engrenagens é adotada em rad/s. Porém, se utilizar a fórmula de conversão de RPM para rad/s e realizar uma simplificação dos termos que são comuns, resulta na velocidade diretamente em RPM, fazendo com que essa expressão em específico, não tenha necessidade de realizar a conversão, desde que os valores se mantenham em mesma unidade.

Para padronização da nomenclatura, a engrenagem conectada a carga receberá o nome de pinhão e a conectada ao motor será chamada de coroa, pois esses nomes são adotados pelo mercado.

Então com toda a base necessária para cálculo do rendimento do acoplamento e analisando o datasheet do motor previamente calculado, encontra que a rotação do motor é 3000 RPM, sendo um valor menor do que o desejado para o bom funcionamento da carga, dessa forma se deve fazer uma relação entre as velocidades para descobrir o tamanho da coroa e do pinhão para atender os requisitos de velocidade. A fórmula para isso é bem simples, como pode ser demonstrada pela equação 2.5, fazendo a relação entre a velocidade da coroa e do pinhão.

$$R = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (2.5)$$

$$R = \frac{3000}{7500}$$

$$R = 0,4$$

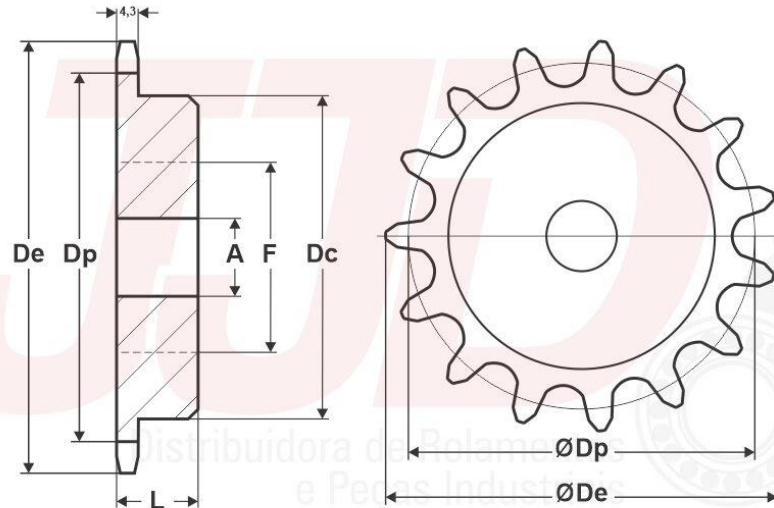
A partir dessa equação, o pinhão deve possuir um tamanho de 0,4 vezes menor em relação à coroa. Então para se encontrar a quantidade de dentes que terão as engrenagens se consulta a tabela de polias ANSI/ASA, norma que padroniza a correntes e engrenagens mundialmente. Como nesse projeto se irá trabalhar com um sistema de alta velocidade e uma potência considerável, a norma ASA de número 35 possui as engrenagens e correntes que atenderão tanto em resistência quanto em tamanho. E consultando a tabela, o pinhão deve possuir 10 dente, e pela relação, a coroa deve possuir 25 dentes.

Os parâmetros da coroa e do pinhão são definidos pela Tabela 2, enquanto para a corrente que irá fazer o acoplamento do sistema pode ser parametrizada pela Tabela 3.

Tabela 2: Norma ASA 35 para engrenagens simples.

Engrenagens Para Corrente Passo 9,525mm

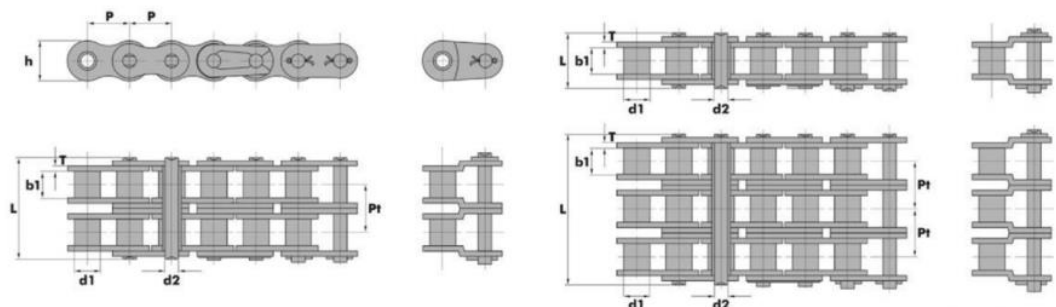
Norma ASA / Simples



Nº de dentes	REF	Dp	De	Dc	A	Furo Máximo	L
9	13509	27,85	31,9	17	12	12	16
10	13510	30,82	35,0	20	8	13	16
11	13511	33,81	38,2	23	8	15	16
12	13512	36,80	41,3	26	12	17	16
13	13513	39,80	44,4	29	12	19	16
14	13514	42,81	47,5	32	12	21	16
15	13515	45,81	50,6	35	12	23	20
16	13516	48,82	53,6	38	12	25	20
17	13517	51,84	56,7	41	12	27	20
18	13518	54,85	59,8	44	12	29	20
19	13519	57,87	62,8	47	12	31	22
20	13520	60,89	65,9	50	12	33	22
21	13521	63,91	68,9	53	12	35	22
22	13522	66,93	72,0	56	12	37	22
23	13523	69,95	75,1	59	12	39	22
24	13524	72,97	78,1	62	15	41	22
25	13525	76,00	81,2	65	15	43	22
26	13526	79,02	84,2	68	15	45	22
27	13527	82,05	87,2	70	15	47	22
28	13528	85,07	90,3	72	15	48	22
30	13530	91,12	96,4	78	15	52	25
31	13531	94,15	99,4	81	14	43	25
32	13532	97,18	102,5	84	15	56	25
33	13533	100,2	105,5	87	14	43	25
34	13534	103,23	108,5	90	15	60	25
35	13535	106,26	111,6	93	15	62	25
36	13536	109,29	114,6	96	15	64	25
38	13538	115,34	120,7	103	15	69	25
40	13540	121,40	126,8	110	15	73	25
45	13545	136,55	142,0	126	20	82	25
48	13548	145,64	151,1	130	20	87	25
54	13554	163,82	169,3	145	20	48	30
57	13557	172,91	178,4	150	20	48	30
60	13560	182,00	187,5	155	20	57	30
76	13576	230,49	236,0	180	20	57	30
95	13595	288,08	293,0	200	20	57	30
114	135114	345,68	351,3	220	20	65	30

Fonte: LOJA DE ROLAMENTOS, 2024, < <https://tinyurl.com/yc4w6ed9> >.

Tabela 3: Tabela normativa ASA para correntes.



Dimensões em mm

Referência		Passo P	Diâmetro do Rolo máx. d1	Largura entre Placas mín. b1	PINO		PLACA		Passo Trans- versal kgf ANSI	Carga de Ruptura máx. kgf	Peso kg/m
ANSI	ISO e ABNT				Diâme- tro d2	Comprimento L	Altura h	Espes- sura T			
25-1	04 A-1	6,35	3,30	3,18	2,31	7,90	6,00	0,80	-----	350	0,15
25-2	04 A-2					14,50			700	0,28	
25-3	04 A-3					21,00			1050	0,44	
25-4	04 A-4					27,20			1440	0,52	
35-1	06 A-1	9,525	5,08	4,77	3,58	12,40	9,00	1,30	-----	790	0,33
35-2	06 A-2					22,50			1580	0,63	
35-3	06 A-3					32,70			2370	1,05	
35-4	06 A-4					47,30			3200	1,41	
40-1	08 A-1	12,70	7,95	7,85	3,96	16,60	12,00	1,50	-----	1410	0,62
40-2	08 A-2					31,00			2820	1,12	
40-3	08 A-3					45,40			4230	1,90	
40-4	08 A-4					59,80			5640	2,57	
50-1	10 A-1	15,875	10,16	9,40	5,08	20,70	15,09	2,03	-----	2220	1,02
50-2	10 A-2					38,90			4440	2,00	
50-3	10 A-3					57,00			6660	3,09	
50-4	10 A-4					75,10			8880	4,30	
50-5	10 A-5					93,20			11100	5,37	
60-1	12 A-1	19,05	11,91	12,57	5,94	25,90	18,00	2,42	-----	4150	1,50
60-2	12 A-2					48,80			6360	2,92	
60-3	12 A-3					71,50			9540	4,54	
60-4	12 A-4					94,50			13992	6,21	
60-5	12 A-5					117,00			15900	7,75	
80-1	16 A-1	25,40	15,88	15,75	7,92	32,70	24,00	3,25	-----	5670	2,60
80-2	16 A-2					62,70			11340	5,15	
80-3	16 A-3					91,70			17010	7,89	
80-4	16 A-4					121,00			22680	10,10	
80-5	16 A-5					149,90			28350	12,96	
100-1	20 A-1	31,75	19,05	18,90	9,53	40,40	30,00	4,00	-----	8850	3,91
100-2	20 A-2					76,40			17700	7,80	
100-3	20 A-3					112,20			26550	11,77	
100-4	20 A-4					147,80			35400	15,60	
100-5	20 A-5					183,60			44205	19,46	
120-1	24 A-1	38,10	22,23	25,22	11,10	50,30	35,70	4,80	-----	12700	5,62
120-2	24 A-2					95,80			25400	11,70	
120-3	24 A-3					141,40			38100	17,53	
120-4	24 A-4					187,00			50800	23,56	
120-5	24 A-5					233,30			63530	29,40	
140-1	28 A-1	44,45	25,40	25,22	12,70	54,40	41,00	5,60	-----	17240	7,50
140-2	28 A-2					103,30			34480	15,14	
140-3	28 A-3					152,20			51720	22,20	
140-4	28 A-4					200,40			68932	28,10	
140-5	28 A-5					249,10			86165	34,90	
160-1	32 A-1	50,80	28,58	31,55	14,27	64,80	47,80	6,40	-----	22680	10,10
160-2	32 A-2					123,30			45360	20,14	
160-3	32 A-3					181,80			68040	30,02	
160-4	32 A-4					241,40			90712	38,60	
160-5	32 A-5					300,30			113390	48,20	
200-1	40 A-1	63,50	39,68	37,85	19,85	80,30	60,00	8,00	-----	35380	16,15
200-2	40 A-2					151,90			70760	32,24	
200-3	40 A-3					223,50			106140	49,03	
200-4	40 A-4					-----			141536	64,50	
200-5	40 A-5					-----			176920	80,50	
240-1	48 A-1	76,20	47,63	47,35	23,81	95,50	72,39	9,50	-----	51030	23,20
240-2	48 A-2					183,40			102060	45,23	
240-3	48 A-3					271,30			153090	71,60	
240-4	48 A-4					-----			204108	91,30	
240-5	48 A-5					-----			255135	114,00	

Fonte: USICORP, 2024, <https://www.usicorp.com.br/Usicorp/imagens/corrente_ansi.png>.

Definidos os parâmetros e dimensões das engrenagens, se inicia os cálculos para encontrar o rendimento da corrente de rolos que irá fazer a conexão. Primeiramente, encontrando a potência dissipada nas buchas da corrente, onde se define os valores das constantes próximos aos que são encontrados na realidade, considerando uma certa margem para demonstrar o rendimento mesmo em uma situação de estresse.

Considerando que:

$$\theta = 0,017453 = 1^\circ;$$

$$\beta = 0,785398 = 45^\circ;$$

$$\mu_2 = \mu_1 = 0,11 - \text{Coeficiente de fricção aço - aço de acordo com (ZHANG; TAK, 2020);}$$

$$\gamma = 0,034906 = 2^\circ$$

$$R_{bo} = 2,54 \text{ mm}$$

$$T_c = 1,5 \text{ N.m}$$

Com esses dados se tem que a potência dissipada nas buchas é:

$$W_{Bucha} = \frac{\pi}{2} * \frac{\sin(0,017453)}{\sqrt{1 + 0,11^2} * \sin(0,785398 - 0,017453)} * 1,5 * \cos(0,034906) * 0,11 * 0,00254 * 0,017453$$

$$W_{Bucha} = 2,8676 * 10^{-7} W$$

Encontrando as perdas nas buchas e definindo que $r_{bi} = 1,79 \text{ mm}$, se tem que a potência dissipada no pino é:

$$W_{pino} = 1,5 * \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 0,11^2}} * 2 \right) * 0,11 * 0,00179 * 0,017453$$

$$W_{pino} = 1,0248 * 10^{-5} W$$

Sabendo as perdas tanto nas buchas e pinos, se deseja encontrar a força de amortecimento do kit, que pode ser calculada considerando os seguintes dados:

$$D_{\text{corrente}} = 40$$

$$R_{s,1} = 38 \text{ mm}$$

$$R_{s,2} = 15,41 \text{ mm}$$

$$\sigma_1 = 1,553343 = 89^\circ$$

$$\sigma_2 = 3,124139 = 179^\circ$$

$\theta_{in,1} = \theta_{in,2} = 0$ – Em testes reais esse valor é diferente de 0, porém seu valor é muito baixo sendo assim plausível fazer tal consideração.

Com esses dados em mãos, se encontra que o força de amortecimento é:

$$F_d = 40 [0,038 * 1,553343 * \cos(1,553343 - 0) - 0,01541 * 3,124139 * \cos(3,124139 - 0)]$$

$$F_d = 1,9666 \text{ N.m}$$

Sabendo das perdas, força de amortecimento, especificações de operação do projeto, encontra que o rendimento do acoplamento é:

$$\eta = \frac{1,5 * 7500}{1,5 * 7500 + 25 * 3000 * (2,8676 * 10^{-7} + 1,0248 * 10^{-5}) + |1,9666| * 3000 * 0,038}$$

$$\eta = 0,9804 = 98,04\%$$

Pelos cálculos realizados foi possível encontrar que o rendimento da relação de transmissão é aproximadamente 98,04%, um valor excelente para esse tipo de acoplamento. Ainda considerando que esse rendimento é para o maior nível de estresse do conjunto de relação, onde esse mesmo kit, se realizado a manutenção correta, se obtém um rendimento ainda maior.

Utilizando o valor onde se tem o maior estresse do acoplamento, se tem que a potência necessária para o motor conseguir desenvolver seu papel mesmo em questões críticas, é:

$$P_{\text{eixo-motor}} = \frac{1178,0972}{0,9804}$$

$$P_{\text{eixo-motor}} = 1201,6495 \text{ W}$$

Pode-se notar que a potência que a carga vai exigir do motor através do acoplamento é menor do que a sua potência nominal. Essa margem extra que o motor possui é necessária, pois caso seja acoplada uma carga na ponta da roçadeira que seja mais exigente de torque, esse motor conseguirá entregar sem problemas, tornando um sistema mais robusto e mais confiável por não trabalhar com o sistema sobrecarregado. Além de ser mais resistente aos impactos ocasionados pela operação das cargas

3.2.3. *Conversor*

Nessa seção de dimensionamento do conversor, se utiliza como uma bibliografia base o livro de Daniel W. Hart, *Eletrônica de Potência – Análise e projetos de circuitos* (HART, 2012)

Para iniciar o desenvolvimento do conversor CC – CC do tipo SEPIC, de antemão se define a tensão que se terá nos terminais de saída, a sua tensão de entrada e a razão cíclica (D) do pulso aplicado no gate do transistor. Essa razão cíclica é o tempo de duração do pulso em relação ao tempo que a tensão permanece em 0 durante um ciclo. Com isso, a fórmula 3.1 mostra como se pode encontrar a tensão de saída.

$$V_0 = V_i \left(\frac{D}{1 - D} \right) \quad (3.1)$$

Onde,

V_0 – Tensão de saída [V];

V_i – Tensão de entrada [V];

D – Razão cíclica.

Determinado os parâmetros de tensão que o conversor deverá operar e a carga que será conectada, se tem a base para encontrar os componentes que irão compor o circuito e alguns dados que irão definir seu comportamento.

Iniciando pelos indutores, onde o conhecimento da sua corrente de operação é necessário para determinar o tipo de condutor que será utilizado na sua manufatura. Então com a equação 3.2, é capaz de encontrar a corrente de operação do indutor L_1 .

$$I_{L1} = \frac{V_0 * I_0}{V_i} \quad (3.2)$$

Onde,

I_{L1} – Corrente no primeiro indutor ou indutor de entrada L_1 [A];

I_0 – Corrente nos terminais de saída [A].

Para o dimensionamento do indutor também se deseja saber qual será a variação de corrente no componente a fim de definir a corrente máxima e mínima. Tal oscilação de corrente pode ser encontrada a partir da fórmula 3.3.

$$\Delta i_{L1} = \frac{V_i * D}{L_1 * f} \quad (3.3)$$

Onde,

Δi_{L1} – Variação de corrente do indutor L_1 [A];

L_1 – Indutância do indutor L_1 [H];

f – frequência de operação [Hz]

Com a variação de corrente definida e a partir das fórmulas 3.4 e 3.5, encontra a corrente máxima e mínima do indutor L_1 , respectivamente.

$$I_{L1,max} = I_{L1} + \frac{\Delta i_{L1}}{2} \quad (3.4)$$

$$I_{L1,min} = I_{L1} - \frac{\Delta i_{L1}}{2} \quad (3.5)$$

Com todos os cálculos para o primeiro indutor realizados, agora se faz o mesmo para o indutor L_2 , onde a sua corrente de operação é a mesma da corrente de saída, ou seja, $I_{L2} = I_0$. Com isso, se faz necessário definir a sua variação de corrente que pode ser descrita utilizando a fórmula 3.6.

$$\Delta i_{L2} = \frac{V_i * D}{L_2 * f} \quad (3.6)$$

Onde,

Δi_{L2} – Variação de corrente do indutor L_2 [A];

L_2 – Indutância do indutor L_2 [H];

Com isso, se tem que a corrente máxima e mínima do indutor L_2 podem ser encontradas utilizando as fórmulas 3.7 e 3.8, nas quais são iguais as utilizadas para o indutor L_1 .

$$I_{L2,max} = I_{L2} + \frac{\Delta i_{L2}}{2} \quad (3.7)$$

$$I_{L2,min} = I_{L2} - \frac{\Delta i_{L2}}{2} \quad (3.8)$$

Esses cálculos determinam a corrente do indutor, porém para saber se um indutor está bem dimensionado para o circuito é necessário conhecer a indutância mínima para o circuito funcionar com estabilidade. Então, são utilizadas as equações 3.9 e 3.10 para encontrar a indutância crítica de L_1 e L_2 , respectivamente.

$$L_{1(Crítica)} = \frac{(1 - D)^2 * R}{2 * f * D} \quad (3.9)$$

$$L_{2(Crítica)} = \frac{(1 - D) * R}{2 * f} \quad (3.10)$$

Onde,

R – Resistência equivalente da carga conectada [Ω];

$L_{1(Crítica)}$ – Indutância crítica para L_1 [H];

$L_{2(Crítica)}$ – Indutância crítica para L_2 [H];

Com os parâmetros de operação dos indutores definidos, agora se deseja saber o comportamento dos capacitores, pois são esses componentes que irão controlar a tensão da

saída e mitigação de ruídos na entrada. A fim de definir a variação do ripple de saída, primeiro se projeta o capacitor C_2 situado na parte final do circuito, a partir da fórmula 3.11 se consegue ter noção do ripple de saída ou a variação de tensão sobre C_2 .

$$\Delta V_0 = \Delta V_{C2} = \frac{V_0 * D}{R * C_2 * f} \quad (3.11)$$

Onde,

ΔV_0 – Ripple de tensão na saída [V];

ΔV_{C2} – Variação de tensão no capacitor C_2 [V];

C_2 – Capacitância do capacitor C_2 [F].

E da mesma forma que foi feito no capacitor C_2 , se faz para encontrar o capacitor C_1 , que pode ser encontrada a variação de tensão que se tem no mesmo pela seguinte equação 3.12.

$$\Delta V_{C1} = \frac{V_0 * D}{R * C_1 * f} \quad (3.12)$$

Onde,

ΔV_{C2} – Variação de tensão no capacitor C_1 [V];

C_1 – Capacitância do capacitor C_1 [F].

Para definir os componentes semicondutores, se encontra a tensão e corrente de operação na qual eles serão submetidos. Normalmente são utilizados os valores de pico e médios, pois assim se consegue filtrar as categorias que melhores encaixam no projeto.

Os valores de tensão no qual o transistor é submetido, podem ser definidos pelas fórmulas 3.13 e 3.14 dos valores médios e de pico, respectivamente.

$$V_{ss} = (V_i + V_0) * (1 - D) \quad (3.13)$$

$$V_{ss(pico)} = V_i + V_0 \quad (3.14)$$

Onde,

V_{ss} – Tensão no transistor [V];

$V_{ss(pico)}$ – Tensão de pico no transistor [V].

Já os valores de corrente, podem ser definidos a partir das fórmulas 3.15 e 3.16:

$$I_{ss} = (I_{L1} + I_{L2}) * D \quad (3.15)$$

$$I_{ss(pico)} = I_{L1(máx)} + I_{L2(máx)} \quad (3.16)$$

Onde,

I_{ss} – Corrente no transistor [A];

$I_{ss(pico)}$ – Corrente de pico no transistor [A].

Definidos os parâmetros de operação do transistor, agora se descobre os mesmos parâmetros do diodo, onde seus valores de tensão média e de pico podem ser definidos utilizando as fórmulas 3.17 e 3.18.

$$V_{Ds} = (V_i + V_0) * D \quad (3.17)$$

$$V_{Ds(pico)} = V_i + V_0 \quad (3.18)$$

Onde,

V_{Ds} – Tensão no diodo [V];

$V_{Ds(pico)}$ – Tensão de pico no diodo [V].

E no diodo, utilizando as equações 3.19 e 3.20, se consegue definir a corrente média e de pico que circula pelo componente, respectivamente:

$$I_{Ds} = (I_{L1} + I_{L2}) * (1 - D) \quad (3.19)$$

$$I_{Ds(pico)} = I_{L1(máx)} + I_{L2(máx)} \quad (3.20)$$

Onde,

I_{Ds} – Corrente no transistor [A];

$I_{Ds(pico)}$ – Corrente de pico no transistor [A].

Com todas as fórmulas definidas, se consegue desenvolver o projeto de um conversor SEPIC com um comportamento adequado para o projeto.

Para que o motor funcione corretamente, se deseja que a variação do circuito seja baixa, pois assim não se terá problemas no controle de velocidade e potência que serão definidas pelo controlador. Então, para a tensão nos terminais do motor, a oscilação não deve ser maior que 5% e para que se tenha um mesmo nível de estabilidade no capacitor C_1 , se adota a mesma variação de tensão. Para a corrente, se deseja ter uma oscilação de no máximo de 5% também, que deverá ser a mesma para os dois indutores.

A tensão que será necessária para o motor é de 48V e a tensão de entrada proveniente das baterias será de 37V. O motor operando de forma nominal possui uma corrente de 39,06A e a frequência de operação do transistor será de 62,5 kHz.

Para agrupar as informações pertinentes ao desenvolvimento do projeto, se elaborou a Tabela 4 com os parâmetros necessários para cálculo dos componentes do conversor.

Tabela 4: Dados para cálculo do conversor SEPIC.

Dados	
Frequência (f)	62,5 kHz
Tensão bateria (V_i)	37 V
Tensão motor (V_0)	48 V
Corrente nominal motor (I_0)	39,06 A
Ripple tensão (ΔV)	5%
Ripple corrente (ΔI)	5%

Com os parâmetros bases definidos, se encontra a razão cíclica de operação.

$$D = \frac{V_0}{V_0 + V_i} = \frac{48}{48 + 37}$$

$$D = 0,5647$$

Pelas fórmulas também pode-se notar que será necessário encontrar a resistência equivalente da carga, que nesse caso é o motor. Que poderá ser encontrada da seguinte forma:

$$R = \frac{48}{39,06} = 1,2289 \Omega$$

Então com as fórmulas 3.11 e 3.12, se tem que as capacitâncias C_1 e C_2 serão de:

$$C_1 = \frac{D}{R * \frac{\Delta V_{C1}}{V_0} * f} = \frac{0,5647}{1,2289 * 0,05 * 62500}$$

$$C_1 = 147,0453 \mu F$$

$$C_2 = \frac{D}{R * \frac{\Delta V_{C2}}{V_0} * f} = \frac{0,5647}{1,2289 * 0,05 * 100000}$$

$$C_2 = 114,882263 \mu F$$

A capacitância encontrada para os componentes possui um valor atípico do mercado, que por conta disso faz necessário pegar um capacitor próximo desse valor. Existem capacitores de $150\mu F$ e $220\mu F$, porém a gama de opções dos capacitores de $220\mu F$ é bem maior, sendo uma escolha bem melhor para o projeto, além de conseguir fornecer uma oscilação de tensão ainda menor. O ripple de tensão que se terá com essa nova capacitância é:

$$\Delta V_0 = \Delta V_{C2} = \frac{48 * 0,5647}{1,2289 * 220 * 10^{-6} * 62500}$$

$$\Delta V_{C2} = 1,6041V$$

$$\Delta V_{C1} = \frac{48 * 0,5647}{1,2289 * 220 * 10^{-6} * 62500}$$

$$\Delta V_{C1} = 1,6041V$$

Definidos os capacitores, agora se calcula os valores das indutâncias L_1 e L_2 . Para determinar esses componentes, primeiro se deve conhecer as correntes médias de operação. Que são definidas da seguinte forma:

$$I_{L1} = \frac{48 * 39,06}{37}$$

$$I_{L1} = 50,6724 A$$

$$I_{L2} = I_0 = 39,06 A$$

Com a corrente média encontrada, a variação de corrente que deverá existir no sistema será de acordo com as seguintes equações.

$$\Delta i_{L1} = 50,6724 * 0,05$$

$$\Delta i_{L1} = 2,5336 A$$

$$\Delta i_{L2} = 39,06 * 0,05$$

$$\Delta i_{L2} = 1,953 A$$

Com os parâmetros de corrente definidos para os dois indutores, se encontra que as indutâncias desse circuito serão de acordo com os seguintes cálculos:

$$L_1 = \frac{37 * 0,5647}{2,5336 * 62500}$$

$$L_1 = 131,9476 * 10^{-6} H$$

$$L_2 = \frac{37 * 0,5647}{1,953 * 62500}$$

$$L_2 = 171,1738 * 10^{-6} H$$

Com isso, se tem os valores dos indutores para atender os requisitos pré-estabelecidos do conversor. Porém, como acontece nos capacitores, esses valores são atípicos dos que são vendidos no mercado, obrigando a adoção de outra indutância, que para esse caso será de 150uH para L_1 e de 180uH para L_2 . Apesar de serem valores comerciais, os indutores deverão ser fabricados exclusivamente para esse circuito por conta da alta corrente que irá percorrer nesses componentes.

A partir desses novos componentes que serão inseridos no projeto, se tem a seguinte variação de corrente apresentada pelos indutores.

$$\Delta i_{L1} = \frac{37 * 0,5647}{150 * 10^{-6} * 62500}$$

$$\Delta i_{L1} = 2,2287 A$$

$$\Delta i_{L2} = \frac{37 * 0,5647}{180 * 10^{-6} * 62500}$$

$$\Delta i_{L2} = 1,8572 A$$

Sendo possível agora encontrar as correntes máximas e mínimas que irão fluir pelos indutores, de acordo com os seguintes cálculos para L₁ e L₂.

$$I_{L1,max} = 50,6724 + \frac{2,2287}{2}$$

$$I_{L1,max} = 51,7867 A$$

$$I_{L1,min} = 50,6724 - \frac{2,2287}{2}$$

$$I_{L1,min} = 49,5581 A$$

$$I_{L2,max} = 39,06 + \frac{1,8572}{2}$$

$$I_{L2,max} = 39,9886 A$$

$$I_{L2,min} = 39,06 - \frac{1,8572}{2}$$

$$I_{L2,min} = 38,1314 A$$

Determinados os parâmetros dos indutores, agora se deseja saber se atendem aos requisitos mínimos do sistema encontrando as indutâncias críticas de L₁ e L₂, de acordo com suas respectivas fórmulas a seguir

$$L_{1(Critica)} = \frac{(1 - 0,5647)^2 * 1,2289}{2 * 62500 * 0,5647}$$

$$L_{1(Critica)} = 3,2989 * 10^{-6} H$$

$$L_{2(Critica)} = \frac{(1 - 0,5647) * 1,2289}{2 * 62500}$$

$$L_{2(Critica)} = 4,2795 * 10^{-6} H$$

Como as indutâncias escolhidas são bem maiores do que os valores críticos calculados, então os indutores atendem perfeitamente o projeto do conversor.

Com os capacitores e os indutores dimensionados, agora se encontra os valores de corrente que irão determinar qual transistor e diodo serão ideais para o conversor. Iniciando pelo transistor, a tensão e corrente médias desse componente serão de:

$$V_{SS} = (37 + 48) * (1 - 0,5647)$$

$$V_{SS} = 37 V$$

$$I_{SS} = (50,6724 + 39,06) * 0,5647$$

$$I_{SS} \cong 50,6724 A$$

E os valores de pico de operação do transistor podem ser definidos de acordo com os seguintes cálculos.

$$V_{SS(pico)} = 37 + 48$$

$$V_{SS(pico)} = 85 V$$

$$I_{SS(pico)} = 50,7867 + 39,9886$$

$$I_{SS(pico)} = 91,7753 A$$

Agora, o mesmo é feito para o diodo, onde a tensão e corrente médias que irão atuar em cima do componente pode ser encontrada a partir das seguintes proposições.

$$V_{DS} = (37 + 48) * 0,5647$$

$$V_{DS} = 48V$$

$$I_{DS} = (50,6724 + 39,06) * (1 - 0,5647)$$

$$I_{DS} = 39,06 A$$

Com a tensão e corrente de cada um dos componentes do conversor SEPIC calculadas e definindo os seus limites de operação, se tem o dimensionamento completo do arranjo que irá atender os requisitos de projeto do motor.

Agora para se encontrar o rendimento desse conversor, se define de acordo com Beligoj (BELIGOJ; SCOLARO; ALBERTI; RENZI; MATTETTI, 2022), um valor de eficiência de 0,85 ou 85%, que é um valor adotado em comum pela comunidade científica para os conversores DC-DC Então considerando o rendimento do motor de 80% e 85% do conversor, a potência que deverá ser extraída da bateria deverá atender a seguinte predefinição:

$$P_{motor} = \frac{1201,6495}{0,80}$$

$$P_{motor} = 1502,0619 \text{ W}$$

$$P_{conversor} = \frac{1502,0619}{0,85}$$

$$P_{conversor} = 1767,1316 \text{ W}$$

Com isso se define que a potência que deverá ser extraída da bateria é de 1767,1316W

3.2.4. Controlador

Para desenvolvimento do controlador, nesse momento não irá necessitar de fórmulas ou equações para fazê-lo, pois se irá programar o Arduino Uno R3 para exercer as funções desejadas no motor.

A operação desejada é emitir um pulso de baixa tensão que será enviado ao gate do transistor do conversor fazendo com que a potência entregue ao motor seja controlada. O Arduino nesse caso irá atuar como sensorless, ou seja, não se terá a presença de nenhum sensor para realizar o controle de rotação e torque, onde tudo será feito somente por código.

Nesse projeto não irá implementar funções muito complexas para um uso mais profissional, será feito somente um controle de velocidade, onde o motor vai acelerar gradativamente até atingir a rotação máxima e frenagem suave do rotor, assim reduzindo os esforços de corrente pelo motor e possibilitando a realização de manobras de aceleração onde o eixo não trave repentinamente.

O controlador em si possui todas as funções desejadas, sendo necessário acrescentar somente um botão de acionamento que nesse projeto será o acelerador. Nas roçadeiras à combustão se tem um manete que faz a função de aceleração, onde se consegue ir acelerando gradualmente de acordo com que vai pressionando-o, contudo, não se é comum utilizar o acelerador dessa forma, o que mais acontece é uma manobra chamada popularmente de “repicado”, que consiste em acelerar totalmente até que o motor atinja a rotação máxima e depois soltar completamente o acelerador para perder um pouco da rotação e repetir esses mesmos movimentos várias vezes sem que o eixo pare. Por conta disso, será implementado um botão de pressão comum, que por meio de programação, conseguirá replicar essa manobra no projeto.

O código que será enviado para o Arduino está disponível no Apêndice A.

Nesse código se tem um esquema que executa uma partida suave no motor e uma parada suave, permitindo que seja replicado a manobra. Para que isso aconteça, o botão de acionamento deve ser conectado no pino A1 do Arduino. A saída do PWM ao gate do transistor deve ser conectada no pino 3 da placa, que irá enviar um pulso em forma de onda quadrada com uma determinada razão cíclica. Com isso, dependendo do momento do acionamento do botão, o motor irá aumentar a sua velocidade até o máximo ou reduzi-la até a sua parada dentro de um período de 1 segundo.

3.2.5. Bateria

Por fim do desenvolvimento do projeto se tem o dimensionamento das baterias que irão energizar o sistema sem a necessidade dele estar conectado na tomada o tempo todo. Como o tipo de bateria LiPo foi escolhida para esse projeto, primeiro se deseja saber a corrente que esse banco de baterias deverá suportar.

De forma mais simplificada, para definir a capacidade e a corrente que a bateria deverá fornecer para o sistema, se utiliza a fórmula geral de dimensionamento 5.1 (ELECTRICAL ACADEMIA, 2024).

$$C_{bateria} = E * \frac{k_{af} * k_{tcf} * k_{crt}}{V * k_{mdod} * k_{se}} \quad (5.1)$$

Onde,

$C_{bateria}$ – Capacidade de fornecimento de corrente hora da bateria [Ah];

E – Energia da carga conectada [VAh];
 k_{af} – Fator de envelhecimento da bateria;
 k_{tcf} – Fator de correção de temperatura;
 k_{crt} – Fator de relação de capacidade;
 V – Tensão de operação do banco de baterias [V];
 k_{mdod} – Máxima descarga da bateria;
 k_{se} – Eficiência do sistema

Com isso, se levar em consideração os parâmetros de uma bateria de chumbo-ácido, define que o banco de baterias LiPo irá operar com seguintes definições arbitrárias:

$V = 37V$;
 $t = 1h$;
 $P_{bateria} = 1767,1316W$;
 $k_{af} = 0,05$;
 $k_{tcf} = 1,1$ – Considerando a temperatura base em $25^{\circ}C$;
 $k_{crt} = 0,05$;
 $k_{mdod} = 0,9$;
 $k_{se} = 0,95$.

Onde alguns desses parâmetros foram definidos considerando uma elevação de temperatura e como possuem a tecnologia das baterias LiPo, possuem alta eficiência, baixo fator de envelhecimento e baixa variação de potência entregue.

Se comparado aos padrões dos equipamentos sem fio disponível no mercado, o período escolhido é bem curto, pois como será demonstrado a seguir, quanto maior o tempo de operação das baterias, maior deverá ser sua capacidade e conseqüentemente maior seu volume e peso.

Então utilizando a fórmula 5.1 apresentada se tem que:

$$C_{bateria} = (1767,1316 * 1) * \frac{1,05 * 1,1 * 1,05}{37 * 0,9 * 0,95}$$

$$C_{bateria} = 67,7442 Ah$$

Sabendo que o banco de baterias será constituído por células de 7,4V e 2,2Ah, que serão ligadas em série para se ter a tensão de 37V e em paralelo para atingir a corrente de 68,2Ah, com isso será necessário utilizar 155 células de bateria LiPo.

Essa quantidade de células resulta em um conjunto relevante tanto em peso quanto em volume, em torno de 15kg, o que não é viável utilizar acoplado junto ao motor. A solução seria organizar essas células de forma que se parece com uma mochila. Com isso, se tem a criação de duas unidades que irão constituir o sistema, uma onde ficará o conjunto motriz com motor, conversor, controlador e carga, e outro que será o banco de baterias que estará conectado ao conjunto motriz, porém não afetará no peso em que o operador deverá manusear com as mãos.

Com isso se tem a finalização dos cálculos do projeto em geral e agora na próxima sessão será apresentada as simulações pertinentes, comprovando o funcionamento do conversor e controlador na utilização desse projeto.

3.3. Simulação

Nesse capítulo se demonstrará, por meio de simulações, o comportamento esperado do projeto utilizando os parâmetros de construção abordados no capítulo anterior.

Iniciando as simulações com o controlador, se utilizou o software SimulIDE, que possui uma interface intuitiva para sua utilização e proporcionou um resultado satisfatório com o código desenvolvido.

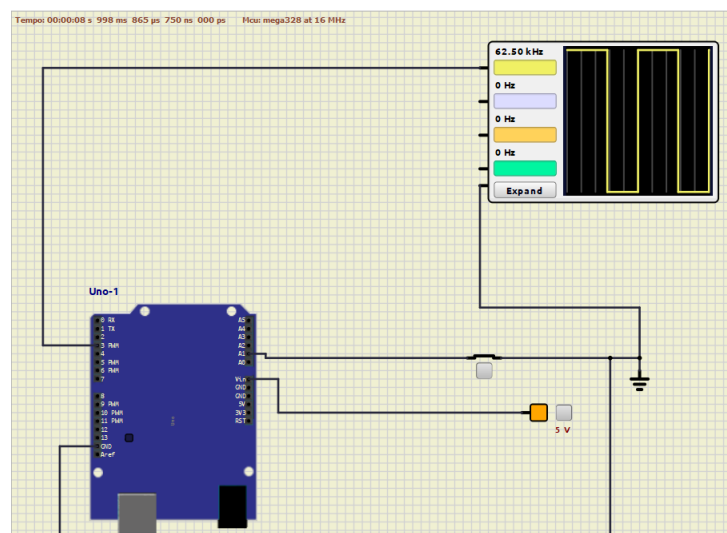
Para essa simulação, foi feito um código que funcione no Arduino Uno R3, que irá emitir o sinal para o transistor e assim controlando a tensão de saída. Esse modelo se mostrou eficiente e suficiente para atender as demandas atuais e futuras do projeto.

Para energizar o Arduino, foi implementado via software uma fonte de tensão contínua com amplitude de +5V, mas para esse projeto, essa fonte deve ser desenvolvida utilizando de um outro artifício, seja por um divisor resistivo ou um novo conversor que irá reduzir a tensão das baterias e alimentar o controlador.

Então com o parâmetro de energização de +5V e GND, também incluindo um botão acionador para que se tenha o sinal PWM na saída 3 e colocando a ela um osciloscópio, se tem o projeto do controlador pronto para fazer a simulação

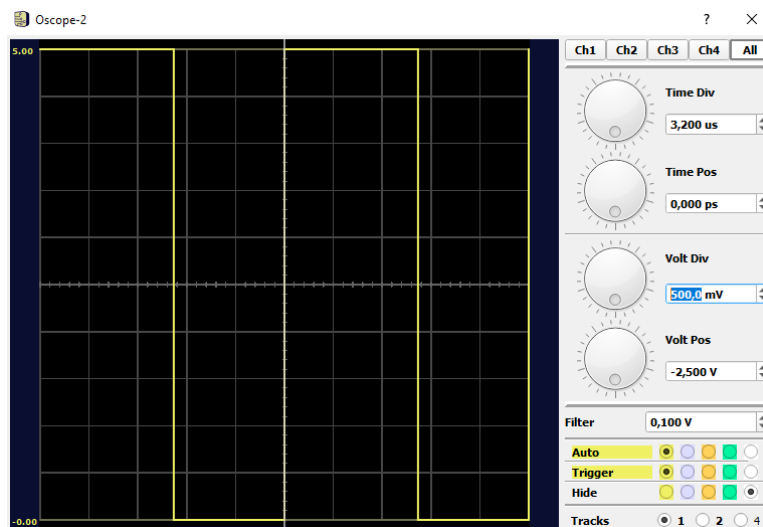
Em seguida, pode-se ver o comportamento do Arduino que foi capturado por um osciloscópio nativo do software e que são referidas pelas figuras 23 e 24, adotando a razão cíclica (D) em 0,547, timestep em 0,001, frequência de 62,5kHz e com o botão acionado.

Figura 23: Simulação do Arduino com $D = 0,5647$ e frequência de 62.5kHz.



Fonte: Autoria própria, 2024

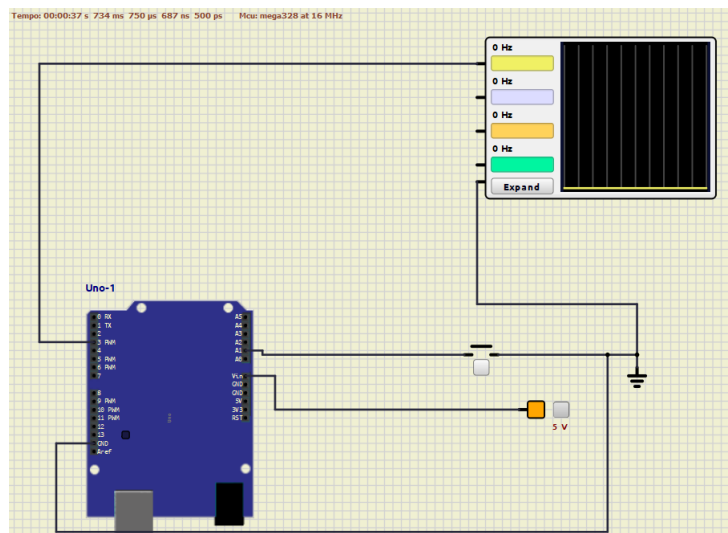
Figura 24: Osciloscópio no teste com $D=0,5647$ e frequência 62.5kHz.



Fonte: Autoria própria, 2024

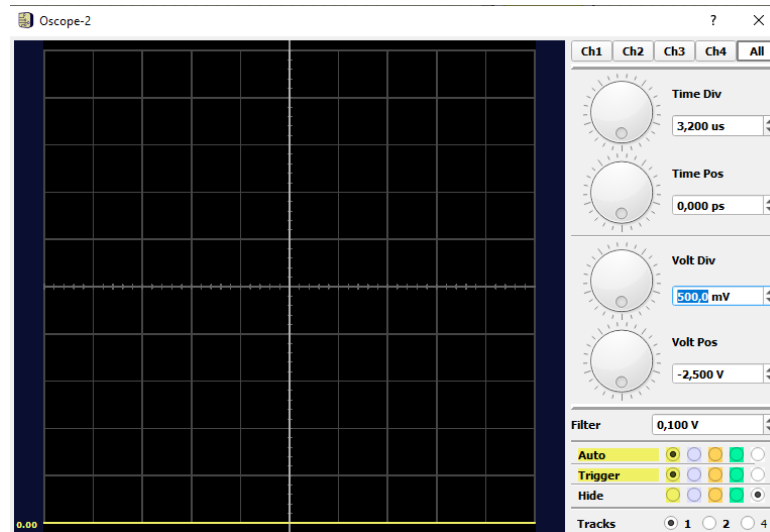
Após a realização desse teste, foi mantido o valor para a razão cíclica e timestep, contudo o botão não está pressionado

Figura 25: Simulação do Arduino com $D = 0,5647$ e frequência de 62.5kHz.



Fonte: Autoria própria, 2024

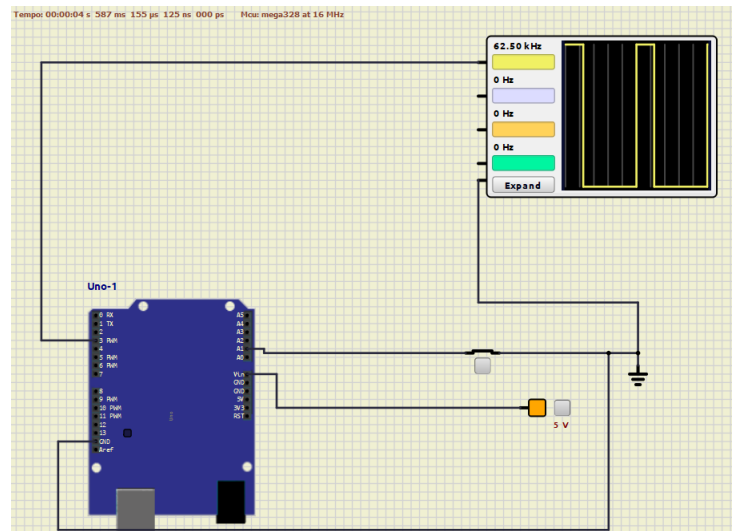
Figura 26: Osciloscópio no teste com $D=0,5647$ e frequência 62.5kHz.



Fonte: Autoria própria, 2024.

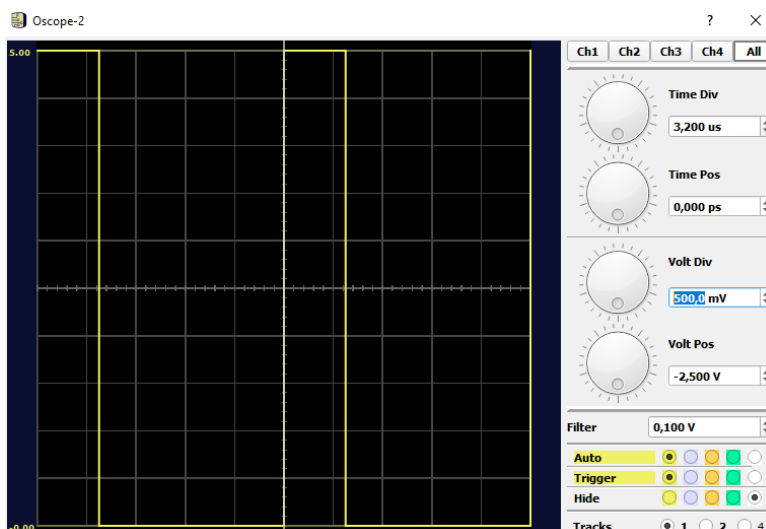
Após a conclusão dos testes, se fez uma nova simulação com o botão pressionado e a razão cíclica em 0,25, que demonstrou o seguinte comportamento no osciloscópio.

Figura 27: Simulação Arduino com $D=0,25$ e frequência 62.5kHz.



Fonte: Autoria própria, 2024

Figura 28: Osciloscópio no teste com $D=0,25$ e frequência 62.5kHz.



Fonte: Autoria própria, 2024

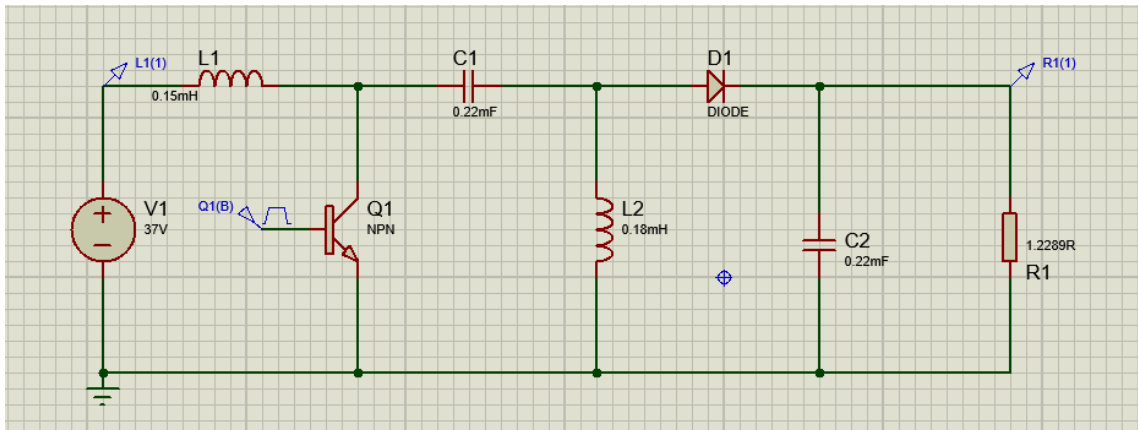
Com esses testes é possível concluir que o controlador cumpre a sua proposta, uma vez que tem uma tensão que varia com pulso alto de 5V e pulso baixo de 0V, que é suficiente para controlar o transistor do conversor. E com o código desenvolvido é possível incrementar e variar a razão cíclica de forma progressiva, fazendo com que o motor tenha uma partida e uma parada suave. Mostrando que o conjunto do controlador está funcionando da forma esperada.

Continuando as simulações, agora se deseja testar o funcionamento do conversor CC-CC. No entanto, não foi possível simular no software SimulIDE, pois como se trata de um circuito de eletrônica de potência com uma frequência elevada de chaveamento, o software não consegue convergir para um resultado aceitável.

Por conta dessa divergência que acontece no software SimulIDE, foi simulado o conversor SEPIC no software Proteus, que oferece ferramentas para forçar o circuito convergir a um resultado que chega próximo ao que se encontra na prática.

Então, seguindo os parâmetros calculados para o conversor SEPIC, se montou o seguinte circuito no software Proteus.

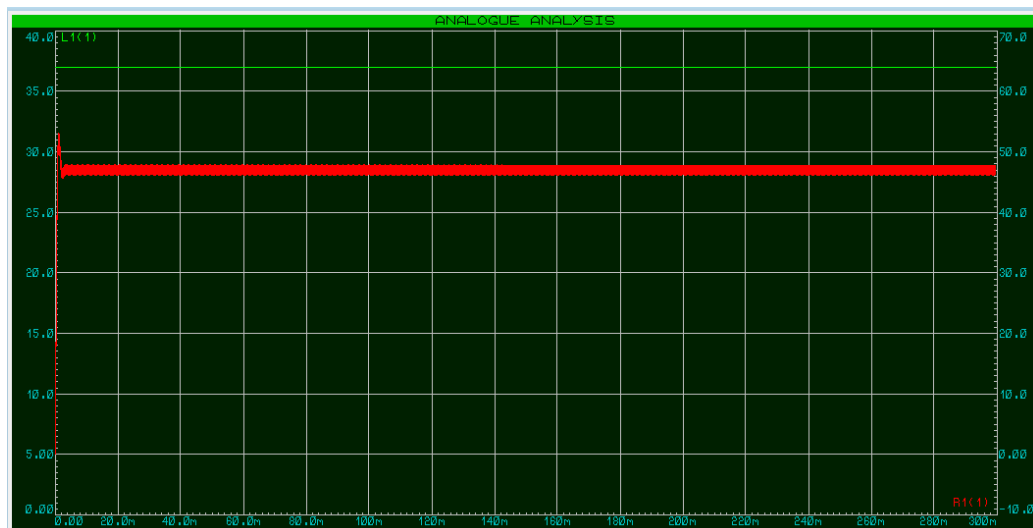
Figura 29: Simulação do conversor SEPIC no Proteus.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

A partir desse circuito e definindo no programa para fornecer os resultados que melhor convergem, se obteve o seguinte gráfico de tensão comparando a tensão de entrada (V_{L1}) e a tensão de saída (V_{R1}) com a razão cíclica do sinal enviado para o transistor em 0,5647 e frequência de 62,5kHz.

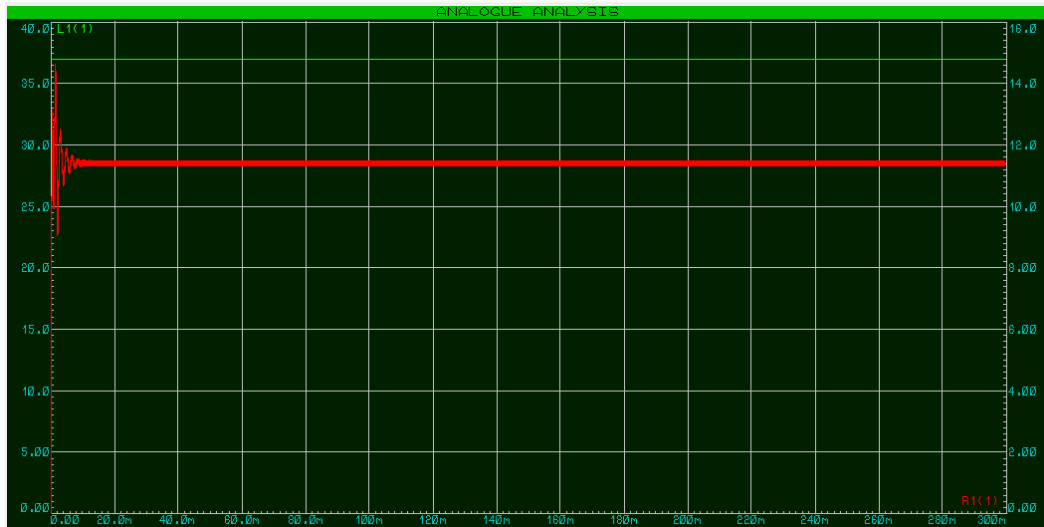
Figura 30: Resultado da simulação do conversor SEPIC com $D = 0,5647$ e frequência 62.5kHz.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Após realizado esse teste, se simulou o comportamento do conversor com a razão cíclica definida em 0,25.

Figura 31: Resultado da simulação do conversor com $D = 0,25$ e frequência 62.5kHz.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Então com esse teste se refez o cálculo de tensão de saída considerando agora a entrada fixa em 37V e razão em 0,25:

$$V_0 = 37 * \left(\frac{0,25}{1 - 0,25} \right)$$

$$V_0 = 12,33V$$

Se observar os resultados da simulação obtida no Proteus e o cálculo realizado, se percebe que o comportamento é bem satisfatório, onde se teve uma tensão próxima de 48V quando a razão cíclica é igual 0,5647 e tensão próxima de 12V com a razão cíclica igual a 0,25. Dessa forma, pode-se concluir que o projeto do conversor irá atender o projeto com satisfação.

Contudo a fim de cobrir os testes e evitar margem para erro, se variou a razão cíclica de 0 até 0,5647, ao passo de 0,05 cada iteração e foram anotados os níveis de tensão obtido em cada teste na saída do circuito e os dados obtidos construiu-se a seguinte tabela.

Tabela 5: Valores de tensão registrados de acordo com a variação da razão cíclica.

Nº	Razão Cíclica	Tensão de saída (V)
1	0	0
2	0,05	1,30
3	0,10	2,60
4	0,15	5,75
5	0,20	8,20
6	0,25	11,60
7	0,30	15
8	0,35	19
9	0,40	23,75
10	0,45	29,5
11	0,50	36,3
12	0,5647	47,1

Fonte: Autoria própria, 2024

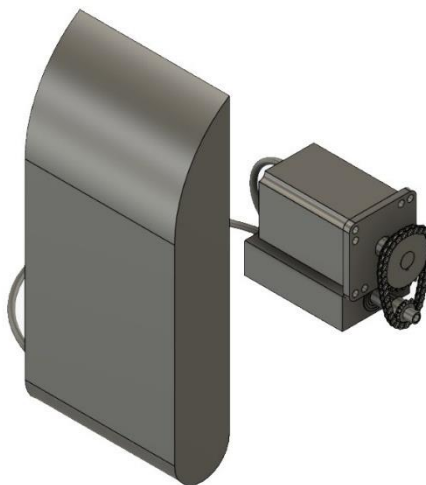
Com esse comportamento anotado, conclui-se que o conversor está funcionando da forma prevista, mostrando que o cálculo e a simulação estão condizentes e que esse resultado pode ser encontrado em um projeto prático. A diferença dos valores se dá pelo método utilizado na simulação que favorece a convergência dos resultados ao invés da precisão, no qual foi adotado devido à alta frequência não permitir a convergência do circuito dentro do software.

Para a melhor comprovação dos resultados obtidos em cálculo, se deveria ter um software que globalizava todas as partes desse projeto, tanto na definição de baterias, conversor, controlador e motor, que até o momento não foi desenvolvido ou até mesmo não encontrado para a simulação do projeto. Tal software, se houvesse a simulação elétrica de todas as partes em um único ambiente seria a melhor opção para aferição do funcionamento do motor e desempenho do banco de baterias. Mas de toda forma, por esses dois softwares, se conseguiu ter uma noção do funcionamento do banco de baterias (mesmo que de forma não real), conversor e controlador, mostrando a eficácia dos métodos adotados no projeto.

E a fim, de se ter uma melhor noção de como será o arranjo desse projeto, unindo todos os componentes, se construiu um modelo 3D que representa como esse equipamento seria

implementado na prática. Dessa forma, a seguir se tem uma idealização do resultado final do produto.

Figura 32: Projeto final unindo todas as partes dimensionadas.



Fonte: Autoria própria, 2024

Figura 33: Representação do protótipo com capa de proteção dos componentes, guidão e cano de acoplamento dos acessórios.



Fonte: Autoria própria, 2024

Por essa modelagem, pode-se notar que o pinhão do sistema de transmissão possui um eixo e que na sua ponta há um rolamento e na frente do pinhão, um cilindro. Esse rolamento, não foi considerado nos cálculos por se tratar de um rolamento selado, onde sua lubrificação

é feita em fábrica e tem uma estrutura para armazenar esse lubrificante por longos períodos, dessa forma a perda de eficiência ocasionado por esse elemento pode ser desconsiderada. E o cilindro na frente do pinhão é uma representação de uma ponteira para engatar o cardam que vem junto com os canos das roçadeiras, no entanto, esse cilindro liso foi colocado somente como uma representação de como seria esse encaixe, uma vez que existem variantes de cardam que podem ser distintas entre marcas de equipamentos.

3.4. Melhorias comerciais

Apesar de se ter um desenvolvimento concreto de uma roçadeira elétrica, esse produto não pode ser ofertado para fins comerciais, pois ainda está faltando alguns recursos como:

- Controle fino de rotação por meio de um sistema realimentado operando como sensorless;
- Trava de segurança do eixo por acionamento;
- Controle do nível de carga e descarga da bateria;
- Sistema para carregar as baterias;
- Sistemas de proteção para o uso do operador;
- Proteções contra surtos elétricos que podem ser ocasionados aos componentes;
- Sistema capaz de fornecer planos de energia para economia de bateria ou alto desempenho do motor;
- Aumento de eficiência do conjunto;
- Escolha dos componentes e de novas topologia de conversor mais eficientes;
- Dentre outros.

E por conta dessas funções que serão implementadas futuramente que o projeto não é comercialmente atrativo. No entanto, se utilizou componentes que possibilitam a fácil implementação desses recursos, como é o caso do microcontrolador, que por meio de código se consegue definir novas funções para controle e operação.

Mas para esse projeto se tornar realmente utilitário, se deve otimizar ainda mais o banco de baterias para ser seguro e armazenar uma grande quantidade de carga. Existem vários estudos de ligas poliméricas para aprimorar ainda mais as baterias e num futuro próximo será realidade sua implementação nesse produto.

Contudo, existe uma linha de pesquisa sobre as células de hidrogênio, que prometem ser a fonte de energia segura e viável para a substituição dos métodos a combustão, onde se tem a recarga do tanque de hidrogênio e por meio de uma reação química nas células eletrolíticas, se tem a produção de energia. Com essa tecnologia, é possível ter um consumo elevado de energia sem a necessidade de esperar várias horas para atingir uma carga completa, onde o tempo de recarga é somente para completar o tanque com o gás hidrogênio em segundos.

Apesar de ser uma tecnologia inovadora, que pode mudar o futuro de veículos e máquinas portáteis, essa tecnologia ainda está em desenvolvimento e não é totalmente segura para o uso, se tornando ainda mais perigosa quanto menor for seu tamanho, como é o caso do projeto desenvolvido nesse trabalho. Mas os avanços dos estudos estão possibilitando a implementação dessa tecnologia em veículos elétricos, como é o caso do Toyota Mirai. Com a continuidade de inovação em cima dessa tecnologia pode popularizar seu uso.

4. Conclusão

Como foi demonstrado nos cálculos realizados e pela simulação apresentada, o desenvolvimento de uma roçadeira elétrica consegue atender as necessidades dos produtores rurais em sua vida profissional. Conseguindo obter um alto nível de rendimento e uma alta potência no eixo da carga. Apesar de não se ter uma simulação dos trabalhos mecânicos entre o motor e a carga, pode-se perceber que as engrenagens e correntes de transmissão escolhidos são excelentes para o projeto, uma vez que apresenta eficiência muito próxima do acoplamento direto e consegue apresentar aspectos de maior robustez, mostrando resistência quando se tem um alto contra torque repentino.

Mesmo com um conversor CC-CC não tão eficiente, se conseguiu alcançar uma potência satisfatória para trabalhar com diversos acessórios acoplados a roçadeira, como derriçadores e esqueletadores por exemplo. As desvantagens apresentadas nesse projeto é primeiramente seu custo inicial para produção que é altíssimo, pois se trata de peças muito específicas, mas que terão seu preço diminuído com a produção em massa. Também esse projeto apresenta um banco de baterias ainda pouco eficiente para aplicação, com um peso considerável, fazendo com que não se tenha um conjunto unificado, mas dividido em partes motrizes e energética, onde esse problema pode ser facilmente resolvido com novas tecnologias.

Com isso se tem o desenvolvimento completo de um produto de grande utilidade e que com alguns ajustes pode ser incorporado ao mercado.

5. Referências

- [1] CHAPMAN, Stephen J., Fundamentos de Máquinas Elétricas, McGraw-Hill, 5ª Edição, Porto Alegre, 2013.
- [2] FITZGERALD, A. E; JR., CHARLES KINSLEY; UMANS, STEPHEN D., Máquinas Elétricas, McGraw-Hill, 7ª Edição, Porto Alegre, 2014.
- [3] HART, Daniel W., Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos, AMGH, Porto Alegre, 2012.
- [4] BUDYNAS; Richard G.; NISBETT; J. Keith; Shigley's Mechanical Engineering Design; McGraw-Hill; Tenth Edition; New York; 2015.
- [5] E. Scolaro, M. Beligoj, M. P. Estevez, L. Alberti, M. Renzi and M. Mattetti, "Electrification of Agricultural Machinery: A Review," in IEEE Access, vol. 9, pp. 164520-164541, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3135037.
- [6] Zhang, S.-P.; Tak, T.-O. Efficiency Estimation of Roller Chain Power Transmission System. Appl. Sci. 2020, 10, 7729. <https://doi.org/10.3390/app10217729>
- [7] X. Yang, H. Jiang and Z. Deng, "Design of a Battery Management System based on matrix switching network," 2015 IEEE International Conference on Information and Automation, Lijiang, China, 2015, pp. 138-141, doi: 10.1109/ICInfA.2015.7279273.
- [8] S. N. Soheli, G. Sarowar, M. A. Hoque and M. S. Hasan, "Design and Analysis of a DC -DC Buck Boost Converter to Achieve High Efficiency and Low Voltage Gain by using Buck Boost Topology into Buck Topology," 2018 International Conference on Advancement in Electrical and Electronic Engineering (ICAEEE), Gazipur, Bangladesh, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICAEEE.2018.8643001.
- [9] H. Wu, T. Mu, H. Ge and Y. Xing, "Full-Range Soft-Switching-Isolated Buck-Boost Converters With Integrated Interleaved Boost Converter and Phase-Shifted Control," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 2, pp. 987-999, Feb. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2425956.
- [10] B. B. Tuvar and M. H. Ayalani, "Analysis of a Modified Interleaved Non-Isolated Cuk Converter with wide range of load Variation and reduced Ripple content," 2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), Tirunelveli, India, 2019, pp. 406-411, doi: 10.1109/ICOEI.2019.8862665.
- [11] S. Sivapriya, N. Manimaran and J. Baskaran, "Design of high voltage gain sepic converter for three phase load," 2017 International Conference on Computation of

Power, Energy Information and Commuincation (ICCPEIC), Melmaruvathur, India, 2017, pp. 713-717, doi: 10.1109/ICCPEIC.2017.8290455.

[12] C. H. T. Lee, W. Hua, T. Long, C. Jiang and L. V. Iyer, "A Critical Review of Emerging Technologies for Electric and Hybrid Vehicles," in *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol. 2, pp. 471-485, 2021, doi: 10.1109/OJVT.2021.3138894.

[13] L. Varshney, C. Gupta and D. Debnath, "Performance improvement of Squirrel cage rotor by design aspects," 2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE), Jaipur, India, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICRAIE.2016.7939498.

[14] I. Boldea, "Electric generators and motors: An overview," in *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 3-14, March 2017, doi: 10.23919/TEMS.2017.7911104.

[15] Z. Q. Zhu and D. Howe, "Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 746-765, April 2007, doi: 10.1109/JPROC.2006.892482.

[16] WEG MOTORES, Cartilha Uso Eficiente de Energia Elétrica, disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h7c/h92/WEG-gestao-eficiente-da-energia-eletrica-50030292-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 03/2024

[17] BRUSHLESS, Satisfy the customer demands and create Brushless brand, Disponível em: <https://www.brushless.com/images/uploaded/Document/Brushless-dc-motors-catalog.pdf>. Acesso em: 03/2024

[18] WEG MOTORES, W22 Motor Trifásico: Catálogo Comercial, disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hb7/h10/WEG-w22-motor-trifasico-50025536-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 03/2024

[19] SIEMENS AG, SINAMICS S120 and SIMOTICS: Catalog D21.4, disponível em: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/019/109747019/att_918077/v1/motion-control-drives-D21-4-complete--English-2017.pdf. Acesso em: 03/2024.

[20] B. B. McKeon, J. Furukawa and S. Fenstermacher, "Advanced Lead–Acid Batteries and the Development of Grid-Scale Energy Storage Systems," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 6, pp. 951-963, June 2014, doi: 10.1109/JPROC.2014.2316823.

[21] M. Rouholamini et al., "A Review of Modeling, Management, and Applications of Grid-Connected Li-Ion Battery Storage Systems," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 13, no. 6, pp. 4505-4524, Nov. 2022, doi: 10.1109/TSG.2022.3188598.

[22] Proteus, Versão 8 Demo, 2024. [S.l]: Labcenter Electronics, 2024. Disponível em: <<https://www.labcenter.com/free-trial/>>.

[23] SimulIDE, Versão 1.1.0, 2024. [S.l]: SimulIDE, 2024. Disponível em: <<https://www.simulide.com/p/downloads.html>>.

[24] ELECTRICAL ACADEMY, Battery Sizing Calculation | Solved Example; Disponível em: <<https://electricalacademia.com/batteries/battery-sizing-calculation-solved-example/>>. Acesso em: 03/2024

[25] Fusion 360, Versão de estudante, 2024. [S.l]: Autodesk, Inc, 2024. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=F360>>.

[26] Texas Instruments, TMS320F2837xS Real-Time Microcontrollers Datasheet. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28378s.pdf?ts=1712619525871&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTMS320F28378S%253FkeyMatch%253DTMS320F28378S%2526tsearch%253Dsearch-everything%2526usecase%253DGPN>.

[27] Texas Instruments, MSPM0G310x Mixed-Signal Microcontrollers With CAN-FD Interface Datasheet. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/mspm0g3107.pdf?ts=1712559336594>>.

6. Apêndice

Apêndice A – Código Arduino

```
#define PWM_PIN 3
#define START_PIN 15
#define START_DELAY 1
#define START_STEP 0.0001

int startState = 0;
bool started = false;
float dutyCycle = 0;

void setup() {

    pinMode(PWM_PIN, OUTPUT);

    pinMode(START_PIN, INPUT_PULLUP);

    TCCR2A = 0x23;
    TCCR2B = 0x09;

    OCR2A = 0xFF;
    OCR2B = 0;
    TCNT2 = 0;
}

void loop() {

    startState = digitalRead(START_PIN);

    if (startState == LOW && !started) {
```

```
    started = true;
    delay(START_DELAY);
}

else if (startState == HIGH && started) {
    started = false;
    delay(START_DELAY);
}

if (started && dutyCycle < 0.5647) {
    dutyCycle += START_STEP;
    analogWrite(PWM_PIN, dutyCycle * 255);
    delay(START_DELAY);
}

else if (started && dutyCycle >= 0.5647) {
    dutyCycle = 0.5647;
    analogWrite(PWM_PIN, dutyCycle * 255);
    delay(START_DELAY);
}

else if (!started && dutyCycle > 0.05) {
    dutyCycle -= START_STEP;
    analogWrite(PWM_PIN, dutyCycle * 255);
    delay(START_DELAY);
}

else if (!started && dutyCycle <= 0.05) {
    dutyCycle = 0;
    analogWrite(PWM_PIN, dutyCycle);
    delay(START_DELAY);
}
}
```