



REVISTA BRASILEIRA DE MECATRÔNICA
FACULDADE SENAI DE TECNOLOGIA MECATRÔNICA

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA ELETRIFICAÇÃO DE UM TRATOR AGRÍCOLA

TECHNICAL FEASIBILITY ANALYSIS FOR THE ELECTRIFICATION OF AN AGRICULTURAL TRACTOR

Luíza Moreira Cardoso dos Santos^{1, i}

Maurício Gayubas^{2, ii}

Antônio Luiz Barbosa dos Santos^{3, iii}

Francinildo de Sousa Barbosa^{4, iv}

Data de submissão: (26/09/2024) Data de aprovação: (28/03/2025)

RESUMO

Este artigo tem como objetivo principal investigar a viabilidade técnica de converter um trator agrícola convencional, com motor a combustão interna, em um modelo elétrico. Este estudo reside na busca por soluções mais sustentáveis e economicamente viáveis para o setor agrícola, considerando a escassez de combustíveis fósseis e a crescente preocupação com os impactos ambientais. A metodologia adotada envolveu a análise detalhada de um trator com motor a combustão interna existente, no intuito de extrair dados técnicos essenciais para o dimensionamento dos componentes do sistema elétrico. Dentre os componentes chave, destaca-se o motor de indução trifásico, escolhido por suas características de robustez e eficiência. O dimensionamento deste motor, bem como do inversor e do banco de baterias, foi realizado com base nos requisitos de torque e potência do trator original. Ao final do processo de dimensionamento e análise, concluiu-se que a conversão de um trator agrícola, com motor a combustão interna, em um modelo elétrico é tecnicamente viável. Os resultados obtidos demonstram que a alteração proposta apresenta um potencial significativo para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e contribuir para a construção de um agronegócio mais sustentável.

Palavras-chave: trator agrícola; veículos elétricos; motor de indução.

ABSTRACT

¹ Pós-graduanda em Veículos Elétricos e Híbridos na Faculdade SENAI de Tecnologia Automotiva. E-mail: lu_moreira3@hotmail.com

² Docente e Mestre em Administração em Gestão Ambiental e Sustentabilidade da Faculdade SENAI de Tecnologia Automotiva. E-mail: mauricio.gayubas@sp.senai.br

³ Docente e Mestre em Engenharia Automotiva da Faculdade SENAI de Tecnologia Automotiva. E-mail: antonio.barbosa@sp.senai.br

⁴ Docente e Mestre em Educação Matemática da Faculdade SENAI de Tecnologia Automotiva. E-mail: francinildo.barbosa@sp.senai.br

This scientific article primarily aims to investigate the technical feasibility of converting a conventional internal combustion engine agricultural tractor into an electric model. The motivation for this study lies in the pursuit of more sustainable and economically viable solutions for the agricultural sector, considering the scarcity of fossil fuels and growing concerns about environmental impacts. The methodology adopted involved a detailed analysis of an existing internal combustion engine tractor, with the goal of extracting the essential technical data for dimensioning the components of the electrical system. Among the key components, the three-phase induction engine stands out, chosen for its robustness and efficiency characteristics. The sizing of this engine, as well as the inverter and battery bank, was performed based on the torque and power requirements of the original tractor. At the end of the dimensioning and analysis process, it was concluded that the conversion of an internal combustion engine agricultural tractor into an electric model is technically feasible. The results obtained demonstrate that the proposed modification has significant potential to reduce the dependence on fossil fuels and contribute to the construction of a more sustainable agribusiness.

Keywords: agricultural tractor; electric vehicles; induction motor.

1 INTRODUÇÃO

O agronegócio brasileiro é fundamental para a economia, gerando cerca de um terço do PIB e mais de 40% das exportações. Sua importância vai além da produção de alimentos, fornecendo matéria-prima para diversos setores industriais. A necessidade de aprimoramento contínuo do setor é evidente para manter essa relevância (Jank, Nassar e Tachinardi, 2004).

De acordo com o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (Sebrae, 2016), entre 2015 e 2016, a soja e seus derivados foram os principais produtos de exportação brasileiros. Além da soja, produtos como açúcar de cana, café não torrado, milho em grão e carne bovina também figuraram entre os principais itens exportados. Essa análise reforça a necessidade de inovação no setor agrícola para garantir sua sustentabilidade e competitividade global.

Um dos impulsionadores para a busca de novas tecnologias no agronegócio é o impacto do aquecimento global. De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), a agricultura é responsável pela emissão dos principais gases do efeito estufa, como dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4), decorrentes de práticas como desmatamento, queima de combustíveis fósseis, uso de fertilizantes químicos e atividades pecuárias (Gondim, *et al.*, 2017).

As consequências do aquecimento global são alarmantes, com potenciais impactos na elevação das temperaturas globais e mudanças nos padrões climáticos, o que reforça a necessidade de adotar tecnologias mais sustentáveis no setor agrícola, visando mitigar esses efeitos negativos sobre o meio ambiente.

A demanda por inovação no agronegócio impulsiona a busca por tratores elétricos. Segundo a FENDT (2017), a substituição de motores a combustão por elétricos, aliada à geração de energia renovável nas propriedades, pode reduzir significativamente as emissões de gases do efeito estufa, contribuindo para um futuro mais sustentável no campo.

Os tratores elétricos apresentam diversas vantagens, como baixa emissão de poluentes, economia financeira ao dispensar combustíveis fósseis, disponibilidade de torque instantâneo, baixa manutenção e a possibilidade de utilizar microgeração de energia na propriedade, reduzindo custos (Goldemberg e Lucon, 2007).

1.1 Problema de pesquisa

Segundo a *startup* catarinense YAK tratores elétricos destacam-se pela sua autonomia, uma vez que operam principalmente dentro da propriedade, facilitando o processo de recarga (Yak Tractors, 2017). Estratégias como ter um banco de baterias reserva e adotar um sistema de rotação de baterias podem otimizar ainda mais o uso desses tratores.

Considerando também aspectos relacionados ao carregamento das baterias, a adoção de tarifas de energia diferenciadas, como a tarifa branca, pode resultar em economia financeira ao programar o carregamento em períodos de menor demanda e tarifas mais baixas (ANEEL, 2023).

Diante desse contexto, torna-se relevante um estudo de viabilidade técnica para o desenvolvimento de tratores agrícolas elétricos, que avalie aspectos como tipos de motores elétricos, baterias adequadas, método de controle e autonomia do veículo, visando à sua viabilidade técnica e contribuindo para a modernização e sustentabilidade do setor agrícola brasileiro.

1.2 Objetivos

Este estudo busca avaliar a possibilidade de transformar um trator a diesel em elétrico, mantendo as características principais do modelo original. Para isso, serão analisadas as especificações técnicas e dimensionadas os componentes elétricos, como motor, inversor e baterias.

- Revisar a bibliografia de máquinas elétricas;
- Revisar a bibliografia relacionada a unidades acumuladoras de energia;
- Realizar o dimensionamento dos principais componentes elétricos do trator;
- Comparar os dados teóricos do trator elétrico projetado com os tratores a combustão;
- Conclusão quanto à viabilidade técnica frente aos resultados obtidos.

1.3 Justificativa

A crescente preocupação com a saúde e o meio ambiente tem impulsionado a busca por soluções de propulsão elétrica em diversos setores, incluindo a agricultura. Este estudo propõe uma análise da viabilidade de eletrificar tratores agrícolas, visando reduzir as emissões de poluentes e o consumo de combustíveis fósseis. A pesquisa irá avaliar os aspectos técnicos, econômicos e ambientais dessa substituição, considerando fatores como eficiência energética, custo de implementação e impactos na operação agrícola. Os resultados deste estudo podem oferecer subsídios importantes para a transição para tecnologias mais limpas e sustentáveis no campo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

No geral, os veículos elétricos (VE) são aqueles cuja principal fonte de energia, ou até mesmo a única, é a eletricidade. Eles são equipados com conjuntos mecânicos impulsionados por pelo menos um motor elétrico. Alguns modelos combinam um motor a combustão com um ou mais motores elétricos, sendo conhecidos como veículos híbridos.

No início do século XX, havia três tipos de tecnologias de propulsão para automóveis: vapor, gasolina e eletricidade. Isso evidencia que os VE não são uma inovação recente, estando ligados ao desenvolvimento das baterias naquela época (Baran e Legey, 2011).

No entanto, apesar de uma grande quantidade de veículos elétricos estar em circulação no início do século XX, o surgimento e aprimoramento dos Motores de Combustão Interna (M.C.I.) levaram esses veículos a perderem espaço no mercado. A limitação de autonomia, o peso elevado e o longo tempo necessário para recarregar as baterias restringiram o uso dos VE a aplicações específicas (INEE, 2018).

2.1 Tratores Agrícolas Elétricos

Tratores agrícolas desempenham um papel fundamental na execução de diversas tarefas diárias em vários setores, incluindo o transporte de vagões, o reboque de carretas e carretões, e a realização de atividades agrícolas. A grande maioria desses tratores é equipada com motores a diesel, devido à sua robustez e confiabilidade.

No entanto, o setor está em constante evolução e uma das necessidades futuras é o desenvolvimento de tratores que utilizem fontes alternativas de energia. Conforme apontado por Thoreson (1986, citado por Rodrigues *et al.*, 2006):

[...] o Departamento de Energia dos Estados Unidos patrocinou estudos para determinar a viabilidade do uso de tratores à bateria elétrica, e os resultados das pesquisas, realizadas na Universidade Estadual Dakota do Sul, indicaram que o trator elétrico pode realizar tarefas nas fazendas com excelente eficiência (Thoreson, 1986 apud Rodrigues, *et al.*, 2006).

Com o avanço das tecnologias de bateria, agora é possível alcançar uma autonomia considerável para realizar tarefas de forma comparável aos tratores a combustão. Fabricantes líderes, como John Deere e AGCO, estão atualmente trabalhando no desenvolvimento de protótipos de tratores elétricos de médio porte.

A AGCO/FENDT está introduzindo no mercado o trator FENDT e100 Vario. Com uma potência de 50 kW e baterias de alta capacidade que fornecem cerca de 100 kWh. Este trator oferece uma autonomia de até 5 horas para realizar tarefas cotidianas em uma propriedade agrícola, além disso, sua versatilidade permite sua utilização em diversas aplicações (FENDT, 2017).

O trator movido a bateria pode reduzir significativamente as emissões de CO₂. Se a energia renovável gerada na fazenda é usada, a máquina pode ser operada com uma pegada de carbono zero e muito econômica. O trabalho de manutenção e os custos são reduzidos, pois o filtro e o óleo, assim como muitos componentes envolvidos na tecnologia convencional, não são mais necessários. Consumíveis como óleo de motor, AdBlue ou diesel são coisa do passado (FENDT, 2017).

2.2 Motores Elétricos

Máquinas elétricas são dispositivos que convertem energia elétrica em mecânica (motores) ou vice-versa (geradores). Elas podem operar em ambos os modos, alternando entre motor e gerador através do campo magnético (Chapman, 2013).

Motores elétricos estão presentes em diversos equipamentos, desde eletrodomésticos até complexas máquinas industriais, impulsionando nosso dia a dia por meio da rotação em seus eixos.

Kosow (1982), conceituando os motores e geradores como máquinas elétricas as divide em quatro grupos básicos:

A máquina de corrente contínua (CC) que tem armadura rotativa e um campo estacionário; A máquina síncrona (CA) com armadura rotativa e um campo estacionário; A máquina síncrona (CA) com um campo rotativo e uma armadura fixa; A máquina assíncrona (CA), que possui ambos, enrolamentos da armadura estacionários e rotativos. (Kosow, 1982, p. 39)

Os motores elétricos podem ser subdivididos em dois grupos pela forma de tensão ou corrente de operação: alternados e contínuos. Há também um terceiro tipo tratado como motores universais que são capazes de operar tanto com tensão alternada quanto com tensão contínua, mas eles são menos usuais (Memede Filho, 2017).

2.2.1 Motores de corrente alternada

Os motores de corrente alternada são alimentados por uma fonte de corrente alternada e funcionam através de um campo magnético girante induzido pela corrente nas bobinas do motor. Esses motores são amplamente utilizados na indústria devido à sua construção mais simples e diversas vantagens. Eles têm um custo de aquisição mais baixo em comparação com os motores de corrente contínua e exigem menos manutenção (Memede Filho, 2017).

Os motores CA comumente utilizados podem ser do tipo assíncrono ou motor de indução, e síncrono.

2.2.1.1 Motor de indução (Assíncrono)

O motor de indução, uma máquina elétrica robusta e simples, funciona por indução eletromagnética. Seu rotor, geralmente do tipo "gaiola de esquilo", é similar ao secundário de um transformador. (Chapman, 2013).

O estator, conectado à fonte de alimentação, cria um campo magnético girante que induz correntes no rotor. O escorregamento entre o rotor e esse campo magnético gera o torque necessário para o movimento, mas também aumenta a corrente. A velocidade desses motores pode ser controlada por meio do número de polos ou por inversores. Inversores são fundamentais em veículos elétricos, pois permitem ajustar a velocidade e o torque do motor de indução, adaptando-o às diferentes demandas da aplicação.

2.2.2 *Parâmetros a serem observados no dimensionamento do motor*

Para escolher o motor elétrico ideal para um trator, é preciso considerar as diferentes condições de trabalho: partida com e sem carga, operação contínua e variações de torque. O motor deve ser dimensionado para atender as demandas específicas das atividades agrícolas, como a força necessária para arar o solo ou operar implementos. É fundamental analisar características como potência, torque e velocidade para garantir o melhor desempenho e eficiência do trator elétrico.

2.2.2.1 *Potência*

A potência de placa de um motor elétrico é a potência máxima na qual ele pode operar em regime permanente, sem causar danos. O sobreaquecimento ocorre quando aplicado cargas excessivas, o que pode levar a curto-circuito e queima do motor. A potência elétrica é a energia necessária para o funcionamento da máquina, absorvida da rede ou fonte de alimentação. A potência mecânica é a potência final entregue no eixo do motor, expressa em Cavalos-Vapor (CV) ou kilowatt (kW), e representa o trabalho realizado em relação ao tempo. (Memede Filho, 2017)

2.2.2.2 *Fator de serviço*

Segundo a empresa WEG, líder mundial na fabricação de motores elétricos (2016):

Chama-se fator de serviço (FS) o fator que, aplicado à potência nominal, indica a carga permissível que pode ser aplicada continuamente ao motor, sob condições especificadas. Note que se trata de uma capacidade de sobrecarga contínua, ou seja, uma reserva de potência que dá ao motor uma capacidade de suportar melhor o funcionamento em condições desfavoráveis. O fator de serviço não deve ser confundido com a capacidade de sobrecarga momentânea, durante alguns minutos. O fator de serviço $FS = 1,0$ significa que o motor não foi projetado para funcionar continuamente acima de sua potência nominal. Isto, entretanto, não muda a sua capacidade para sobrecargas momentâneas. A IEC 60034-1 especifica os fatores de serviço usuais por potência (WEG, 2016, p. 44).

2.2.2.3 *Conjugado mecânico*

O conjugado mecânico do motor elétrico é a quantidade de esforço necessária para movimentar o eixo. Isso é denominado como torque, sendo ele dividido como conjugado de partida, conjugado nominal, conjugado máximo, conjugado mínimo e conjugado de aceleração (Memede Filho, 2017).

2.3 **Integração: Consumo e produção de energia dentro da propriedade rural**

A geração de energia em propriedades rurais está se tornando mais acessível. Micro hidrelétricas, rodas d'água, biodigestores, energia eólica e fotovoltaica são algumas opções. A queda no custo dos sistemas fotovoltaicos e os incentivos governamentais impulsionam essa tendência, tornando a produção de energia própria economicamente viável para pequenos produtores.

O site da ANEEL (2018) traz algumas informações sobre a geração distribuída:

Desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Trata-se da micro e da minigeração distribuídas de energia elétrica, inovações que podem aliar economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade.

Os estímulos à geração distribuída se justificam pelos potenciais benefícios que tal modalidade pode proporcionar ao sistema elétrico. Entre eles, estão o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética. (ANEEL, 2018).

A geração própria de energia em propriedades rurais reduz drasticamente os custos de operação de tratores elétricos. Após a instalação, os gastos se limitam à manutenção, tornando a produção mais barata e sustentável. A autossuficiência energética aumenta os lucros e diminui a dependência de fontes externas de energia.

3 METODOLOGIA

O presente estudo fundamenta-se em uma abordagem metodológica mista, que integra a pesquisa bibliográfica e o estudo de caso. A pesquisa bibliográfica foi conduzida com o objetivo de estabelecer um panorama teórico abrangente, contextualizando o desenvolvimento de tratores elétricos no âmbito da agricultura familiar. O estudo de caso, por sua vez, concentra-se na análise do trator Valtra BM135, um modelo de porte médio amplamente utilizado na agricultura familiar, selecionado como objeto de estudo primordial para a investigação empírica.

Para desenvolver o trator elétrico, é ideal partir de um modelo já existente com motor a combustão. Isso facilita a adaptação às necessidades agrícolas do dia a dia. Segundo Folle e Bento Franz (1990), tratores fornecem potência para diversas tarefas (tração, tomada de potência (TDP), levante hidráulico). Assim, é crucial avaliar suas características para classificá-los e garantir o desempenho ideal para cada necessidade.

O trator Valtra BM 135, equipado com o motor diesel AGCO POWER 49DTC3 de 135 CV de potência nominal, é um modelo de médio porte para pequenas propriedades, foi escolhido como base para o desenvolvimento do trator elétrico devido à sua adequação para as necessidades da agricultura familiar. Sua autonomia é suficiente para as atividades típicas nessas propriedades, e suas características detalhadas podem ser encontradas nos catálogos da Valtra (Valtra, 2022).

Segundo a *startup* catarinense YAK Tractors, existem mais de 500 milhões de famílias em todo o mundo envolvidas na agricultura familiar, portanto, é fundamental desenvolver tecnologias sustentáveis que permitam aumentar a produção de alimentos de forma ambientalmente responsável (YAK Tractors, 2017). Um trator elétrico de pequeno porte pode representar uma nova abordagem para a sustentabilidade nas áreas rurais.

O Quadro 1 indica as especificações básicas do trator VALTRA BM135.

Quadro 1- Especificações básicas Trator VALTRA BM135

Motor	
Marca / Modelo	AGCO VALTRA BM135
Cilindros	4
Potência	132 CV (97,08 kW) a 2.000 rpm (NBR ISO 1585)
Potência Máxima TDP	135 CV (99,29 kW) a 2.240 rpm
Torque	500 Nm - 51 kgf.m a 1.850 rpm (NBR ISO 1585)
Transmissão	
Tipo	Mecânica
Número de Marchas	16 Frente / 8 Ré
Tomada de Potência - Tdp	
Acionamento	Mecânico / Manual
Rotação Nominal	850 a 2.480 rpm no Motor
Informações Adicionais	
Massa do Trator	15000 kg / 16300 kg
Tanque Combustível	39 L

Fonte: Adaptado de AGCO (2023)

Para o desenvolvimento do trator elétrico, as características mais relevantes são a potência e o torque do motor. Os motores diesel de 4 tempos, amplamente utilizados em tratores, oferecem uma ampla faixa de potência e são conhecidos por sua confiabilidade. Nesses motores, a combustão ocorre pela ignição espontânea do combustível injetado em ar comprimido quente, impulsionando o êmbolo (Brunetti, 2012).

3.1 Modelagem do Trator elétrico

Para este trabalho acadêmico optou-se pela escolha do trator Valtra BM135 como modelo de base para a extração de parâmetros como torque, potência e consumo, a partir dos quais será parametrizado o motor ideal para o veículo elétrico em questão, bem como para o dimensionamento do banco de baterias.

Partindo dos dados de catálogo tem-se que o trator possui 132 CV de potência, considerando-se as unidades de medidas internacionais onde 1 CV equivale a 735,489 Watts pode-se obter a potência do trator em Watts:

$$1 \text{ CV} = 735,489 \text{ W}$$

$$132 \text{ CV} = 97084,548 \text{ W}$$

Essa é a potência efetiva do motor (N_e), que equivale à potência disponibilizada no eixo do motor a certo nível de rotações por minuto. Já o torque é a força motriz produzida por um corpo em rotação, são obtidas em geral com um auxílio de torquímetro (Brunetti, 2012). O modelo da AGCO possui um torque de 500 N.m a uma rotação de cerca de 1850 RPM, seguindo a fórmula para o cálculo da potência tem-se (Brunetti, 2012):

$$N_e = \frac{2 * \pi * n * T}{60 * 1000} \quad (1)$$

Sendo:

Ne – Potência no eixo (W);
 T – Torque medido no eixo da máquina (N.m);
 n – Número de rotações no eixo da máquina (RPM).

A Equação 1 descreve a potência em W no eixo da máquina, e é oriunda da relação entre o trabalho pelo intervalo de tempo descrito na equação 2 (MEMEDE FILHO, 2017).

$$Ne = \frac{w}{\Delta t} \quad (2)$$

Onde:

Ne – Potência no eixo (W); w – Trabalho (J);
 Δt - Tempo (s).

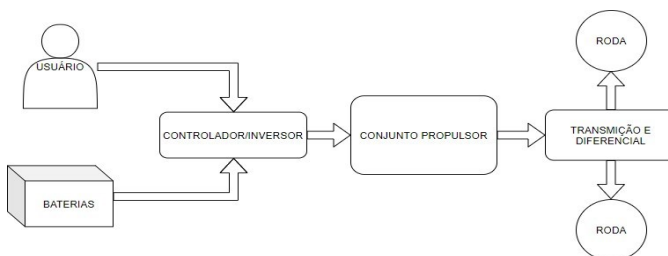
Para identificar o valor real da potência do trator efetua-se o cálculo partindo do valor de torque máximo do trator utilizando-se a Equação (1).

$$Ne = \frac{2 * \pi * 1850 \text{ RPM} * 500 \text{ N.m}}{60 * 1000} = 96,82 \text{ kW}$$

$$96,82 \text{ kW} = 131,64 \text{ CV}$$

Assim, tem-se que o motor do trator elétrico necessitará de um conjunto com potência superior ou igual 96,82 kW entregue no eixo da máquina. A topologia empregando um motor central é a mais utilizada em veículos elétricos, principalmente em se tratando dos híbridos, os quais empregam um MCI em conjunto de um motor elétrico para apoio (DENTON, 2018). No caso do trator elétrico esta topologia é bem favorável pois permite manter o sistema de caixa de câmbio, mesmo que os motores elétricos operem em uma ampla faixa de torque, pois a caixa de câmbio facilita operações que possam exigir torques muito elevados como, por exemplo, tracionar uma carga pesada em inércia.

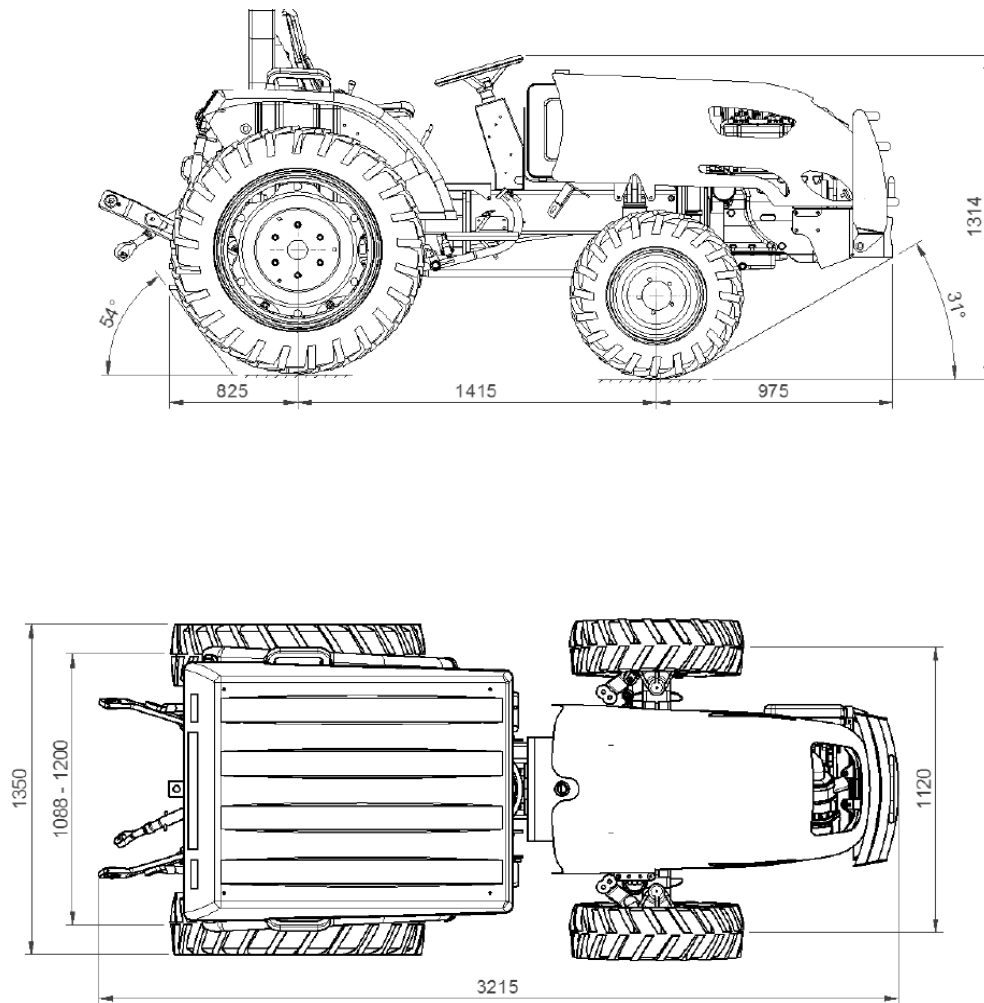
Figura 1 - Diagrama com único motor central



Fonte: Elaborada pela autora (2023)

Na Figura 1 tem-se o diagrama de um veículo elétrico com um único motor central. A imagem da Figura 2 representa as dimensões do trator Valtra BM135.

Figura 2 - Dimensões do trator Valtra BM135



Fonte: Valtra (2023)

As dimensões expostas na Figura 2 estão dispostas em milímetros, o veículo possui 3,215 metros de comprimento e cerca de 1,12 metros de largura, segundo a fabricante AGCO (Valtra, 2023), este modelo de trator possui dimensões que se adaptam a vários cenários na agricultura.

Na parte dianteira do trator irão concentrar-se as principais propostas de alteração, sendo a substituição do atual motor e do tanque de combustível ali localizados, pelo motor elétrico e banco de baterias.

3.2 Determinação da motorização elétrica

O estudo compara o motor a diesel do trator Valtra BM135 com opções de motores de indução trifásicos. O motor a diesel oferece 96,82 kW a 2.240 RPM. Optou-se por motores de indução pela simplicidade, robustez e baixo custo.

Foram analisados motores WEG de 90, 110 e 132 kW, todos com 2 polos para alcançar rotação similar ao motor a diesel. A escolha da WEG se justifica pela linha completa de produtos, incluindo inversores específicos para tração, que garantem um sistema integrado e eficiente.

O Quadro 3 detalha as características técnicas desses motores, permitindo uma comparação precisa para a seleção do modelo mais adequado para a aplicação em tratores elétricos.

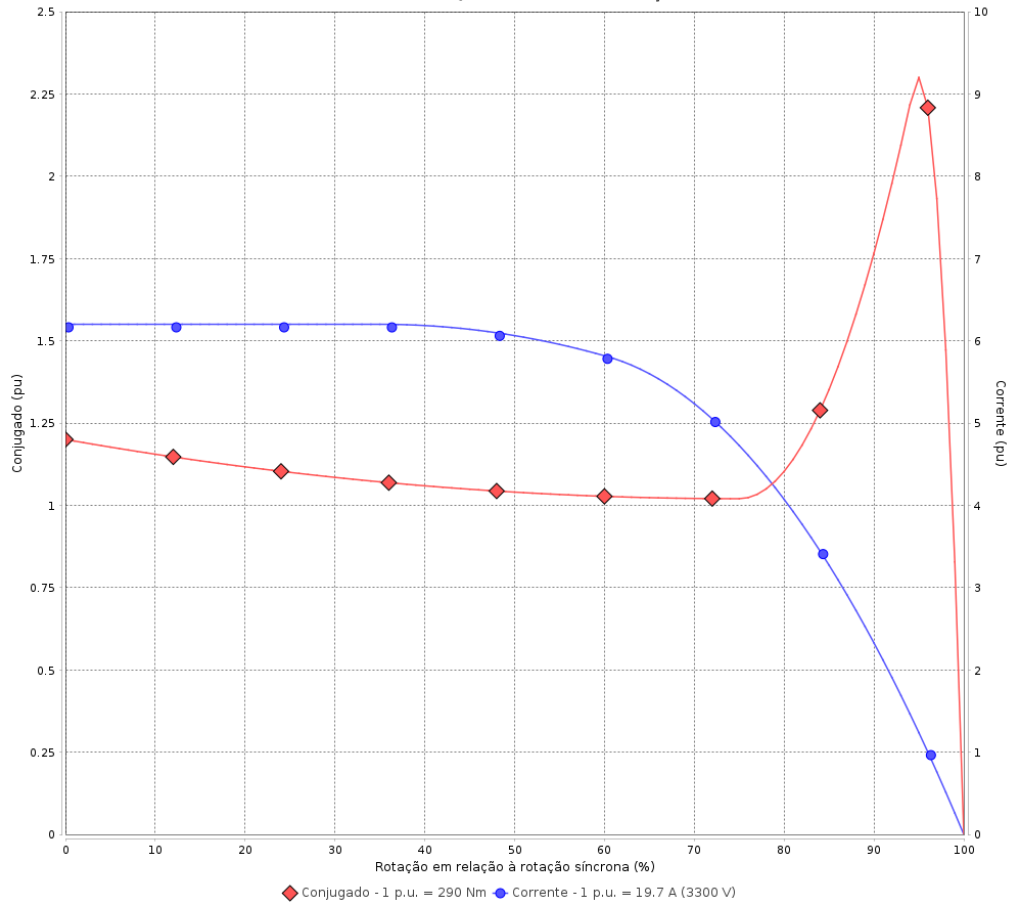
Quadro 3 - Especificações técnicas dos motores

Especificações Técnicas Motores WEG			
Características	Modelos		
	W22 IR3 Premium 90 kW	W22 IR3 Premium 110 kW	W22 IR3 Premium 132 kW
Potência	90 kW	110 kW	132 kW
Frequência	60 Hz		
Rotação Nominal	3000	3000	3000
Tensão Nominal	220/380 V		
Número de Polos	2 Polos		
Corrente de Partida	349/202 A	505/292 A	516/298 A
Corrente Nominal	292 A	366 A	71,6/41,5 A
Fator de Serviço	1,15		
Conjugado Nominal	480 Nm	882 Nm	704 Nm
Conjugado de Partida	250%	280%	250%
Conjugado Máximo	320%	290%	
Escorregamento	1,81%	1,67%	1,53%
Tempo de Rotor Bloqueado (Quente)	12 s	9 s	12 s
Peso	636 kg	946 kg	903 kg

Fonte: Adaptado de WEG (2019)

Ambos os modelos apresentam características aptas para o protótipo de trator elétrico, o modelo de 90 kW possui um torque inferior quando comparado aos outros modelos, mas ressalta-se que todos estes modelos podem trabalhar com um conjugado bem acima do nominal, de tal forma elevando o torque em até 320% como no caso do motor de 90 kW, suprimindo a necessidade de torque quando comparado com o modelo a diesel. Todos os modelos no quadro 3 são classe de isolamento F e com grau de proteção IP55, o que lhes permitem trabalhar em ambientes com poeiras e água, como é o caso de lavouras (Memede Filho, 2017).

Figura 3 - Curvas de torque e corrente em função da rotação do Motor WEG 90 kW
CURVA DE TORQUE E CORRENTE X ROTAÇÃO

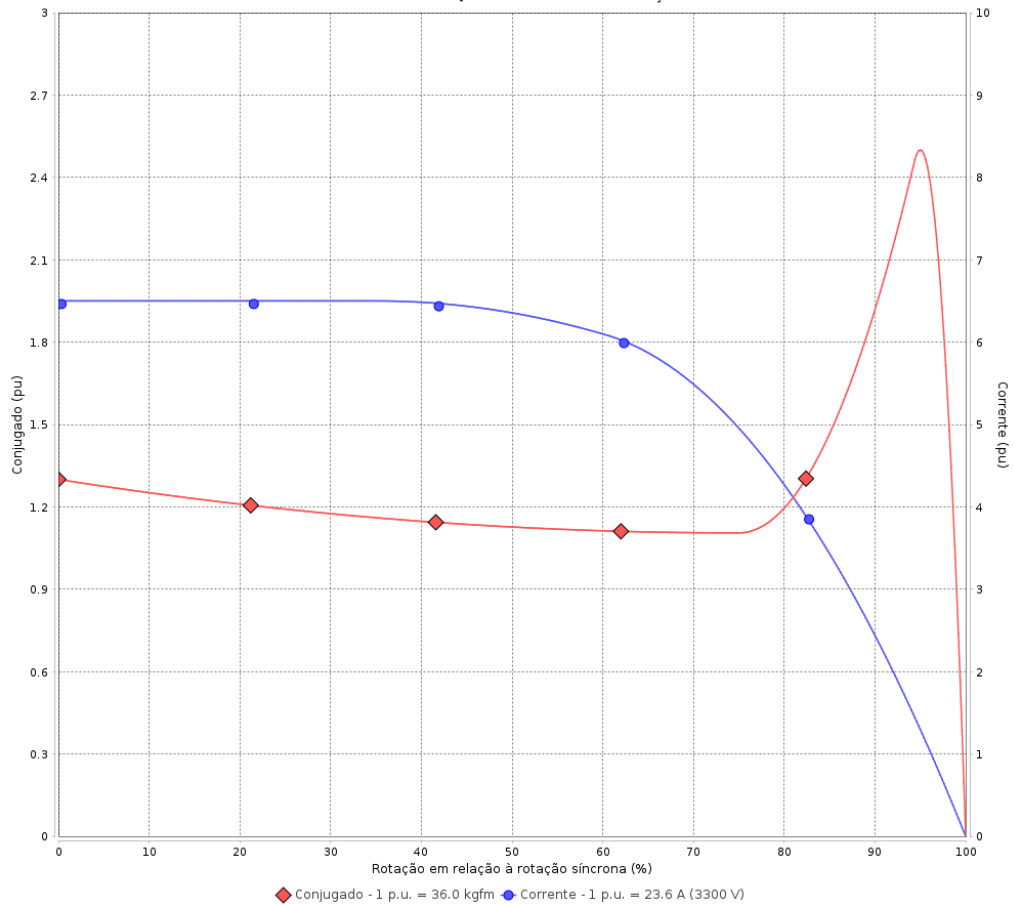


Fonte: WEG (2019)

A Figura 3 revela o excelente desempenho do motor WEG de 90 kW, especialmente em relação ao torque. Uma das principais vantagens dos motores elétricos, e evidenciada pelas curvas, é o alto torque disponível desde a partida, mesmo a zero RPM. Essa característica é crucial para aplicações agrícolas, onde são exigidos grandes esforços iniciais para vencer a inércia de cargas como reboques.

Após superar a resistência inicial, o torque necessário diminui, resultando em um funcionamento mais suave do trator. As curvas de torque e corrente em função da velocidade, apresentadas na Figura 3, permitem uma análise detalhada do comportamento do motor e auxiliam na compreensão de sua eficiência em diferentes condições de operação.

Figura 4 - Curvas de torque e corrente em função da rotação do Motor WEG 110 Kw
CURVA DE TORQUE E CORRENTE X ROTAÇÃO



Fonte: WEG (2019)

O motor elétrico de 110 kW apresenta baixo rendimento em baixas cargas, com consumo elevado e fator de potência reduzido. Para otimizar o consumo de energia, é crucial evitar o superdimensionamento do motor, pois isso gera perdas elétricas desnecessárias. O motor em marcha lenta consome cerca de 25% da potência nominal. Para economizar energia, o motor será desligado quando o trator estiver parado e não houver equipamentos conectados à tomada de potência ou à bomba hidráulica.

3.3 Determinação do controlador/inversor

Inversores são equipamentos responsáveis pela conversão da energia e modulação dela sob um nível de tensão e de frequência desejado. Alguns modelos de inversores oferecem um grande e amplo número de variáveis passíveis de alteração, como o controle da corrente, controles em malha fechada e aberta, controle das amplitudes, controle da forma de onda de saída etc. (Memede Filho, 2017). Tais inversores têm a função nativa de efetuar o controle de motores de corrente alternada. Por exemplo, nos motores de indução onde a velocidade do eixo é proporcional à frequência imposta e ao número de polos (Silveira, 2016).

Para este trabalho optou-se por um modelo de inversor da fabricante WEG, voltado para mobilidade elétrica; segundo a fabricante esta nova linha de inversores para tração elétrica possui vários aspectos como um controle de torque e velocidade adaptável às dimensões do veículo elétrico, pode-se controlar motores de indução trifásicos e motores de ímãs permanentes (WEG S.A., 2019).

Foram analisados dois modelos de inversores desta linha da WEG: os modelos CVW 300 e CVW 500. Foi levado em conta como critério de seleção os parâmetros de tensão e corrente, onde o modelo CVW oferece controle para motores de baixa tensão somente, não se adaptando ao propósito do projeto. O modelo CVW 500 se adapta bem ao propósito do trabalho, no Quadro 4, as especificações do inversor.

Quadro 4 - Parâmetros do inversor CVW 500

Parâmetros Elétricos do Inversor	
Marca / Modelo	WEG / CVW 500
Tensão Nominal	130 - 400 Vcc
Corrente Nominal	275 Arms
Corrente de Sobrecarga (1min)	550 Arms
Refrigeração e Características Ambientais	
Fluido de refrigeração	20% glicol + 80% água
Faixa de temperatura	- 25 a 65 °C
Grau de proteção	IP00 e IP66

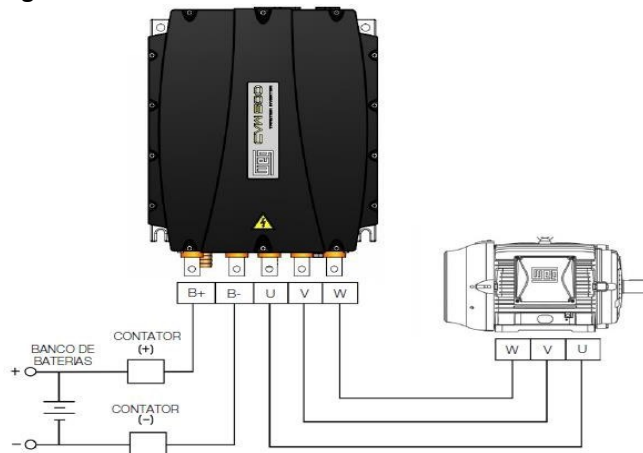
Fonte: Adaptado de WEG (2023)

Como se pode ver no Quadro 4 o equipamento pode operar em condição de sobrecarga por até 1 min, com o dobro de carga.

O inversor de tração WEG possuiu entradas analógicas e digitais para efetuar o controle e configurar o equipamento, bem como para realizar e receber o envio das informações durante a operação. Tais pontos o tornam flexível para inserção de um Controlador/IHM em conjunto do mesmo, outro ponto importante é o fato de que o inversor CVW 500 opera também pelo protocolo *Controller Area Network* (CAN) de comunicação veicular (WEG S.A., 2019).

A Figura 5 demonstra que a conexão entre a bateria e o inversor é realizada por meio de contatores, acionados por relés de proteção. Esses relés interrompem a alimentação em caso de falhas e auxiliam no carregamento e descarregamento dos capacitores internos do inversor. O inversor exige duas fontes de alimentação: uma de baixa tensão (12/24 V CC) para a eletrônica interna e outra de alta tensão (130 a 400 V CC) para a parte de potência. Qualquer tipo de bateria pode ser utilizado, desde que o ripple seja inferior a 2 Vrms, conforme recomendação da WEG (WEG S.A., 2019).

Figura 5 – Conexão do inversor com a bateria e motor



Fonte: Guia de instalação Inversor CVW500 WEG (2019)

3.4 Bateria e dispositivo de carregamento

Segundo Denton (2018), a autonomia de veículos elétricos depende diretamente das baterias, que alimentam todos os sistemas do veículo. A indústria busca constantemente novas tecnologias para aumentar a autonomia e a vida útil das baterias, definida como o período em que perdem 20% de sua capacidade.

Com longa vida útil e alta segurança, as baterias LiFePO₄ são a tecnologia mais avançada para veículos elétricos. Sua estrutura química estável as torna praticamente incombustíveis. Mesmo com menor tensão (3,2V/Célula), a durabilidade é um diferencial (Sistemas e Tecnologia Aplicada - STA, 2019).

Para este projeto de trator agrícola será colocado como base uma autonomia de 2 horas, considerando a aplicação de subsolagem média para essa categoria de trator, sendo assim dimensiona-se o banco de baterias de Lítio Ferro Fosfato (*LiFePO₄*).

O modelo de bateria de Lítio Ferro Fosfato empregado para o dimensionamento deste estudo é da fabricante BYD, do tipo modular, com potência de 2,56 kW.

No Quadro 5 encontram-se principais especificações da bateria *LiFePO₄* da BYD.

Quadro 5 - Especificações das baterias

Parâmetros da Bateria	
Marca / Modelo	BYD/ B-Box Compacta 2.5
Tipo	LiFePO ₄
Tensão Nominal	51,2 Vcc
Tensão Operacional	43,2 - 56,4 Vcc
Potência Máxima de Saída	2,56 kW
Capacidade de carga	2,56 kWh
Peso	38 kg

Fonte: Adaptado de BYD Brasil (2023)

No dimensionamento deste caso, considera-se o uso do trator a 50% da potência nominal, devido às constantes variações de torque requeridas nas aplicações práticas. De acordo com Serrano (2007), o torque na barra de tração varia de acordo com a tarefa realizada pelo trator e os implementos utilizados.

A equação de consumo de energia considera o uso constante do motor elétrico a metade da potência nominal, levando em conta o rendimento de 91% do motor WEG de 90 kW aplicado a este trabalho (WEG, 2016).

$$P_{in\ motor} (50\%) = \frac{P_{out\ motor} * 0,5}{\eta_{motor}} \quad (3)$$

Onde:

$P_{in} (50\%)$ – Potência requerida pelo motor com faixa de trabalho à 50 % da potência nominal (kW)

$P_{out\ motor}$ – Potência no eixo do motor (kW)

η_{motor} – Rendimento do motor por meio da Equação 3, obtém-se:

$$P_{in\ motor}(50\%) = \frac{1747 * 25}{0,91}$$

$$P_{in\ motor} (50\%) = 47.994,50\ W$$

O motor elétrico consome cerca de 47,99 kW quando operando em 50% de sua potência nominal. A esse valor, devem ser adicionadas as perdas nos componentes elétricos do trator e no inversor de frequência. O inversor WEG CVW 500 opera em uma ampla faixa de tensão contínua (100-430V), oferecendo flexibilidade na escolha do banco de baterias. O motor, por sua vez, opera em tensão alternada (220/380V). A tensão máxima de saída do inversor é determinada pela divisão da tensão contínua pela raiz quadrada de 2 (WEG S.A., 2019). Abaixo a equação da tensão eficaz de saída de um inversor por fase (Memede Filho, 2017).

$$V_{out\ inversor} = \frac{V_{in}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

Onde:

$V_{out\ inversor}$ – Tensão de saída do inversor (Vca)

V_{in} – Valor de tensão contínua na entrada do inversor (Vcc)

Através da Equação 4 obtém-se:

$$220 = \frac{V_{in}}{\sqrt{2}}$$

$$V_{in} = 311,12\ V$$

Conclui-se que o valor de tensão de entrada não pode ser inferior a 311,12 V e para isto é necessário conectar o inversor a um banco de baterias ligado a um elevador de tensão, o qual também deve manter o nível de tensão de modo equilibrado. Segundo a WEG (WEG S.A., 2019) o valor nominal mais adequado de tensão das baterias é 350 V. Aplicando o valor de 350 V na Equação 4 obtém-se:

$$V_{out\ inversor} = \frac{V_{in}}{\sqrt{2}}$$

$$V_{out\ inversor} = \frac{350}{\sqrt{2}}$$

$$V_{in} = 247,49\ V$$

Resulta-se em um nível de tensão máximo de 247,49 V por fase na saída do inversor, a corrente nominal de saída do inversor é de 275 A, por meio da equação da potência para circuitos trifásicos descrita na equação 5 encontra-se a potência nominal de operação do inversor em condições normais de operação com o uso de um motor de indução trifásico 220/380 V (Memede Filho, 2017).

$$P = I_n * V * 3 \quad (5)$$

Onde:

P – Potência do inversor (W)

I_n – Corrente Nominal de saída (A)

V- Tensão aplicada ao motor por fase (V) Levando em consideração a equação 5 obtém-se:

$$P = 275 * 247,49 * 3$$

$$P = 204,179\ kW$$

O inversor pode fornecer até 204,179 kW, com perdas de cerca de 1750 W na potência nominal. A potência de entrada é estimada em 204,179 kW. Como o fabricante não informa o rendimento, assume-se que ele seja linear entre a potência mínima e a nominal. A equação apresentada permite calcular o rendimento percentual do inversor, considerando as perdas de potência (Alves, 2008).

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} * 100\% \quad (6)$$

Onde:

η – Rendimento percentual (%);

P_u – Potência útil na saída (W);

P_a – Potência absorvida na entrada (W); aplicando a Equação 6 encontra-se:

$$n = \frac{204,179\ kW}{205,929\ kW} * 100\%$$

$$n = 99,150\ \%$$

Observa-se que o rendimento percentual encontrado para o inversor é cerca de 99,15%. Para este rendimento pode-se encontrar a potência demandada pelo inversor ao alimentar o motor de 90 kW com 50% da potência nominal. Reorganizando a equação 6 obtém-se a potência absorvida pelo inversor (Alves, 2008).

$$P_a = \frac{P_u}{\eta} \quad (7)$$

Onde:

P_a – Potência absorvida na entrada (W);

η – Rendimento percentual (%);

P_u – Potência útil na saída (W);

Aplicando 50% da potência nominal absorvida pelo motor por meio da Equação 7 encontra-se:

$$P_a = \frac{47.994,50}{0,9915}$$

$$P_a = 48.405,95 \text{ W}$$

Portanto a potência absorvida pelo conjunto motor e inversor de tração é de 10335,09 W, sendo essa a responsável pela maior parte do consumo energético do veículo em movimento. Para os demais componentes elétricos do trator serão estimados um consumo de 500 W, sendo estes para iluminação, itens de sinalização e acessórios. A Equação 8 irá descrever a potência do trator, que se caracteriza pelo somatório da potência absorvida pelo inversor mais o consumo adicional estimado.

$$P_{Trator} = P_a + P_{com}. \quad (8)$$

Onde:

P_{trator} – Potência total demandada pelo trator com 50 % de uso da potência do motor (W);

P_a – Potência absorvida na entrada (W);

$P_{com.}$ – Potência elétrica demandada pelos demais componentes do trator (W); aplicando a Equação 8 obtém-se:

$$P_{Trator} = 48.405,95 + 500$$

$$P_{Trator} = 48.905,95 \text{ W}$$

Pode-se observar que a potência média consumida pelo trator quando o mesmo está em operação é de 10.835,09 W, em uma aplicação real essa potência irá sofrer constantes variações, mas para fins didáticos considerou-se que o mesmo opera de maneira constante utilizando 50% da potência nominal do motor. A próxima equação descreve a energia consumida durante uma operação de 2 horas contínuas como trator. Segundo Chapman (2013) a energia é o resultado da multiplicação da potência em relação a um período.

$$\Delta E = P_{Trator} * \Delta t \quad (9)$$

Onde:

ΔE – Energia consumida em Joules (J);

P_{Trator} - Potência total demandada pelo trator com 50 % de uso da potência do motor (W);

Δt – Período (s);

Aplicando-se a Equação 9 encontra-se:

$$\Delta E = 48.905,95 * 7200$$

$$\Delta E = 35,21 * 10^6 J$$

Para a operação do trator nas condições anteriormente elencadas é necessária uma bateria com capacidade igual ou superior a $35,21 * 10^6$ Joules, o que equivale a 97,80 kWh de energia.

As baterias BYD/B-Box Compacta 2.5 possuem 2,56 kWh de capacidade nominal de carga, e um nível de tensão nominal de 51,2 V (BYD DO BRASIL, 2018). Sendo assim é necessário utilizar um mínimo de 40 baterias em paralelo, obtendo-se uma capacidade total de 102,4 kWh, equivalente a $368,64 * 10^6$ Joules, suprimindo as 2 horas de autonomia elencadas no trabalho. Aplicando-se a equação 9 obtém-se a autonomia por meio do cálculo da energia (Chapman, 2013).

$$368,64 * 10^6 = 48.905,95 * \Delta t$$

$$\Delta t = 7537,73$$

Com 40 baterias BYD/B-Box Compacta 2.5 em paralelo, o trator elétrico terá autonomia estimada de 2 horas e 10 minutos. A massa total das baterias é de 1520 kg, o que representa um aumento de 7,11% na massa total do trator após a eletrificação. Apesar do peso adicional, a remoção do motor a diesel e do tanque de combustível compensa essa diferença, não afetando significativamente a massa total do veículo. O Quadro 6 apresenta um comparativo detalhado da massa do trator antes e após as modificações.

Quadro 6 - Massa do trator

Trator Valtra com Motor BM135	
Massa do trator (Com o motor)	15.000 kg
Massa do motor BM135 (Standard)	218 kg
Massa dos contrapesos opcionais	500 kg
Massa do combustível (Tanque cheio)	110 kg
Massa total do Trator com contrapesos e combustível	15.828 kg
Trator Valtra BM135 Após Alterações Propostas	
Massa do Trator (Sem Motor)	14.782 kg
Massa do Motor WEG WEG W22 IR3 90 kW	636 kg
Massa do Banco de Bateria	1.520 kg
Massa do Inversor CVW 500	15 kg
Massa Total do trator com as alterações previstas p/ eletrificação	16.953 kg

Fonte: A autora (2024)

A distribuição de peso das baterias é crucial. Concentrar o peso na dianteira do trator permite ajustar o equilíbrio para diferentes tarefas. Lastros metálicos são usados para aumentar a tração, que é diretamente proporcional ao peso nas rodas. A remoção de peso pode ser usada como estratégia para equilibrar o trator ao utilizar implementos (Furlani, 2014).

Para esta proposta de trator elétrico também se necessita da utilização de um conversor CC/CC Buck a fim de alimentar uma bateria de 12 V, tal tipo de conversor também denomina-se regulador Chooper (Alves, 2008). A rede alimenta circuitos de iluminação e

controle no trator elétrico, como é o caso do inversor CVW 500, que possui a alimentação de controle em 12/24 V.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi proposto uma alteração no meio propulsor do trator Valtra BM135, substituindo o motor a diesel pelo motor elétrico WEG W22 IR3 Premium de 90 kW. Além disso, foram realizadas modificações adicionais para controlar e alimentar o novo motor, demonstrando a viabilidade técnica do desenvolvimento de um trator agrícola elétrico.

Para avaliar a viabilidade econômica, um comparativo de custo de operação foi realizado. Foi comparado o custo do diesel consumido em 1 hora de operação com o consumo de energia em 1 hora de operação para a versão elétrica do trator proposta.

A Equação 10 descreve o custo de operação do trator Valtra BM135 com o motor a diesel. Essa equação calcula o consumo específico do trator em litros, multiplicado pelo valor do diesel em Reais por litro. O cálculo considera o uso de 50% da potência nominal de forma constante.

$$Custo = Consumo * R\$/l \quad (10)$$

Onde:

Custo – Custo financeiro para 1 hora de operação (R\$/h);

Consumo – Consumo em litros / hora considerando uso constante de 50% da potência do motor (l/h);

R\$/l – Valor por litro (R\$).

Segundo dados da Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o custo médio do litro de Diesel S10 no município de São Paulo em 2024 é de R\$ 6,26 (Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis, ANP, 2023).

Aplicando-se a Equação 10 encontra-se:

$$\begin{aligned} Custo &= 2,84 * 6,26 \\ Custo &= R\$ 17,78 \end{aligned}$$

Como pode-se observar o custo médio encontrado de operação do trator Valtra BM 135 com o motor diesel é de cerca de R\$ 17,78 por hora. Já a Equação 11 descreve o custo de operação do trator Valtra BM135 após as alterações propostas, se baseia no cálculo do valor resultante da energia consumida para a operação do trator pelo período de uma hora, considerando-se os dados elencados no decorrer do trabalho.

$$Custo = Consumo kWh * R\$/kWh \quad (11)$$

Onde:

Custo – Custo financeiro para 1 hora de operação (R\$/h);

Consumo kWh – Consumo em kWh considerando uso constante de 50% da potência do motor (l/h) = 10,83 kWh (Valor informado pela fabricante AGCO);

R\$/kWh – Valor por kWh (R\$).

Segundo a ANEEL o valor da tarifa média em área rural em São Paulo na área de atuação da concessionária CPFL é cerca de 0,73 R\$/kWh (ANEEL, 2023), levando em consideração esse valor pode-se obter o custo médio de operação da proposta de trator elétrico deste trabalho.

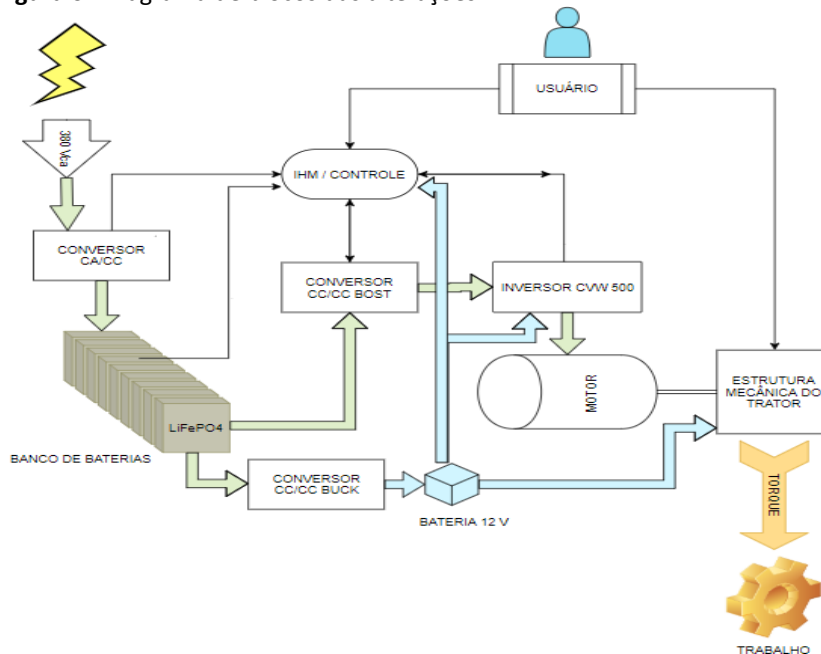
Aplicando a Equação 11 encontra-se:

$$\text{Custo} = 10,83 * 0,73$$

$$\text{Custo} = \text{R\$ } 6,06$$

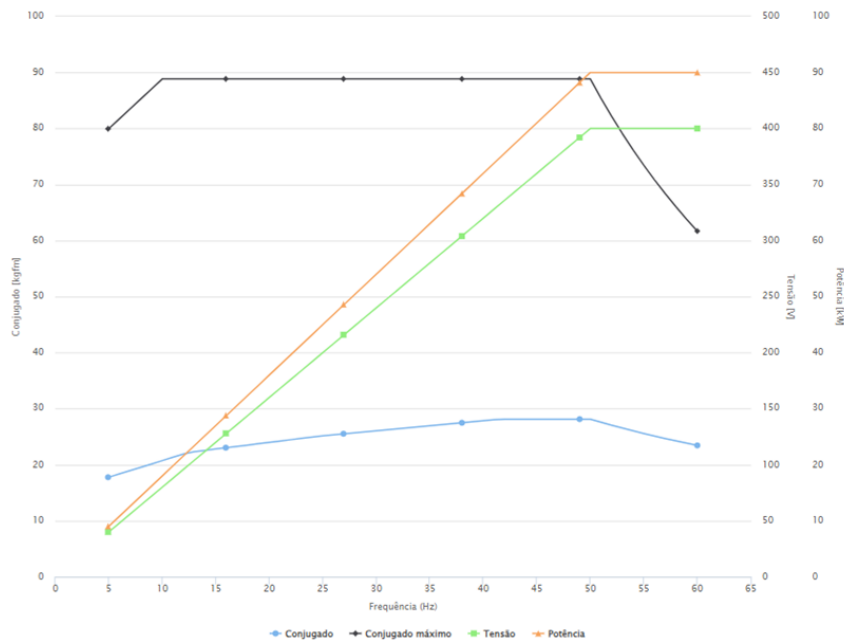
Desta forma, o custo médio de operação do modelo de trator elétrico proposto de 6,06 reais por hora, levando em conta somente a matriz energética dele, sem englobar custos adicionais com eventuais manutenções. A partir dos dados elencados obtém-se um custo operacional cerca de 42 % mais barato utilizando o motor elétrico em comparação ao modelo de trator original.

Figura 6 - Diagrama de blocos das alterações



Fonte: A Autora (2023)

Figura 6 ilustra as modificações realizadas para transformar um trator convencional em elétrico. Além da substituição do motor a diesel por um motor de indução trifásico e da inclusão de um inversor e baterias, um controlador central com interface homem-máquina (IHM) gerencia todo o sistema. O inversor, controlado pela IHM, ajusta a velocidade e o torque do motor. As baterias, monitoradas por CAN, alimentam o sistema através de um conversor DC/DC. O motor WEG de 90 kW e o inversor CVW500, escolhidos por sua compatibilidade, garantem o desempenho desejado. A comunicação entre todos os componentes é feita via rede CAN, permitindo um controle preciso e monitoramento em tempo real do trator elétrico.

Figura 7 - Curva de operação com inversor

Fonte: WEG (2019)

As curvas de conjugado e conjugado máximo, ilustradas na Figura 7, mostram o nível de torque possível de obter-se com o motor de 90 kW operando por meio de um inversor de frequência. Neste trabalho, denomina-se inversor de tração, o qual possui o princípio de funcionamento baseado na operação de tiristores/transistores (Alves, 2008), como acontece na grande maioria de inversores de frequência. A curva de operação do motor empregado inicia em cerca de 5 Hz, o que equivale a uma rotação de cerca de 360 RPM, sem considerar o escorregamento. Observa-se que o torque desenvolvido neste ponto a 360 RPM é cerca de 166 N.m, mas pode operar com uma sobrecarga de até 480 N.m, sendo que o máximo desenvolvido pelo motor a diesel é de 500 N.m, e o mesmo precisa chegar a 1850 RPM para atingir tal torque (Valtra, 2023).

Sendo assim, o trator elétrico projetado está devidamente atendido em suas funções com o motor de 90kW de 2 polos. Além disso, ainda será usada uma relação de redução, presente no trator, de forma que o torque no eixo da máquina torna-se mais elevado em consideração à redução de rotação (Folle e Bento Franz, 1990).

O trator elétrico utiliza um banco de 40 baterias LiFePO4 em paralelo, garantindo autonomia superior a 2 horas. A recarga será feita em estações trifásicas, como a da Figura 8, seguindo os critérios de dimensionamento.

Figura 8 - Estação de recarga ABB EVLUNIC B PLUS 11KW

Fonte: Site Oficial ABB (2019)

A estação exposta na Figura 8 opera com uma potência máxima de 11 kW e possui conector tipo T2 trifásico (ABB, 2019). Para carregar as baterias com o carregador ABB, será utilizado um conversor CA/CC de 11 kW, evitando sobrecarga

O Quadro 7 demonstra as especificações oriundas das alterações sobre o modelo de trator elétrico baseado no trator Valtra BM135

Quadro 7 - Especificações das alterações propostas

Motor	
Marca / Modelo	WEG W22 IR3 Premium 90 kW
Tipo	Indução Trifásico
Tensão	220/380 V
Potência	90 kW
Torque	480 N.m
Inversor	
Marca / Modelo	WEG CVW 500
Potência	204,179 kW (Obtida para a topologia desde trabalho)
Parâmetros da Bateria	
Marca/modelo	BYD/ B-Box Compacta 2.5
Tipo	LiFePO4
Capacidade de carga unitária	2,56 kW
Capacidade total	102,4 kW
Massa do banco de baterias	1.520 kg
Autonomia	2 horas

Fonte: A Autora (2024)

5 CONCLUSÃO

Este trabalho busca contribuir para a transição para a mobilidade elétrica no setor agrícola, visando reduzir a dependência de combustíveis fósseis e seus impactos ambientais. A pesquisa se baseia no estudo de viabilidade técnica de converter um trator a diesel em elétrico, considerando as características de veículos elétricos e as tecnologias disponíveis.

Foram analisadas propostas de eletrificação de tratores de grandes fabricantes e estudadas as características técnicas de motores elétricos, optando-se por motores de indução trifásicos por sua eficiência e controle preciso. O inversor CVW 500 foi escolhido por sua aplicação em tração veicular e compatibilidade com o motor WEG. Quanto ao armazenamento de energia, as baterias de LiFePO4 foram selecionadas por suas vantagens em termos de autonomia e vida útil, apesar do custo ainda elevado.

O objetivo central foi adquirir conhecimentos sobre veículos elétricos e aplicar esses conhecimentos na análise da viabilidade de eletrificar um trator, identificando os principais componentes e tecnologias envolvidas nesse processo.

O Quadro 8 apresenta uma comparação entre as principais características do modelo de trator Valtra BM135, que serviu de base para o trabalho, e os resultados obtidos com o modelo de trator elétrico proposto ao longo do estudo.

Quadro 8 - Comparativo versão Diesel x Modelo Proposto

Especificações Técnicas		
Modelo	Valtra BM135	Versão Proposta Com Motor Elétrico
Motor	BM135	WEG W22 IR3 90 kW
Alimentação	Diesel	Elétrico
Potência Nominal	132 CV	90 kW (122 cv)
Torque Nominal	500 N.m	480 N.m
Autonomia *Uso constante de 50% da potência	13 horas e 45 minutos	2 horas e 7 minutos
Custo de operação *Somente a matriz energética	17,78 R\$/h	6,06 R\$/h

Fonte: A Autora (2024)

O estudo demonstra a viabilidade técnica de transformar tratores agrícolas em modelos elétricos. O protótipo desenvolvido apresenta desempenho similar ao modelo a diesel, com a autonomia como principal limitação. A integração de um trator elétrico com sistemas de microgeração em propriedades rurais pode reduzir custos de produção, tornando as propriedades autossuficientes e ecologicamente corretas. Essa solução contribui para a redução de custos dos alimentos e incentiva uma produção mais sustentável. Conclui-se que o desenvolvimento de tecnologias para mobilidade elétrica é fundamental para reduzir a poluição, otimizar custos e promover uma globalização mais sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABB. ABB Smarter Mobility. **ABB**, 2019. Disponível em: <https://global.abb/group/en/>. Acesso em: 30 nov. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIODIESEL – ANP. Preços. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos> . Acesso em: 08 dez. 2023.
- ALVES, M. F. **ABC das máquinas elétricas**. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2008.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Tarifa branca**. 2023. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>. Acesso em: 04 set. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração distribuída**. 2018. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>. Acesso em: 31 set. 2023.
- BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n.33, p. 207-224, mar. 2011. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1489> . Acesso em: 31 set. 2023.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, v. 1, 2012.

BYD DO BRASIL. BYD BRASIL. **BYD BRASIL**, 2018. Disponível em: <http://www.byd.ind.br/produtos/solar/>. Acesso em: 24 de maio de 2024.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

DENTON, T. Veículos elétricos e híbridos. São Paulo: Edgard Blücher, 2018.

FENDT. **Fendt e100 Vario**: the battery-powered compact tractor, 2017. Disponível em: <https://www.fendt.com/int/fendt-e100-vario.html>. Acesso em: 04 abr. 2024.

MAMEDE FILHO, J. M. **Instalações elétricas industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

FOLLE, M.; BENTO FRANZ, C. A. **Trator Agrícola**: características e fundamentos para sua seleção. Planaltina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA: 1990.

FURLANI, C. E. A. **Equilíbrio operacional em tratores**. Jaboticabal: UNESP: 2014.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, Brasil, v. 21, n. 59, p. 7–20, 2007. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10203> . Acesso em: 23 mai. 2024.

GONDIM, R. S. *et al.* Mudanças climáticas e agricultura. *In: Produção de melão e mudanças climáticas*: sistemas conservacionistas de cultivo para redução das pegadas de carbono e hídrica. Brasília: Embrapa, 2017. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1076096> . Acesso em: 04 abr. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – INEE. **Veículos Elétricos**, 2018. Disponível em: http://www.inee.org.br/veh_sobre.asp?Cat=veh. Acesso em: 23 mai. 2024.

JANK, M. S.; NASSAR, M.; TACHINARDI, M. H. Agronegócio e comércio exterior brasileiro. **Revista USP**, São Paulo, Brasil, n. 64, p. 14–27, 2005. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i64p14-27. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/13387>. Dossiê Brasil rural. **Revista USP**, São Paulo, v. 1, n. 64, p. 14/27, janeiro/fevereiro 2004. Acesso em: 23 mai. 2024.

KOSOW, I. L. **Máquinas elétricas e transformadores**. 4. ed. Porto Alegre: Globo, 1982.

PETROBRAS. Assistência técnica Petrobras. **Petrobras**. 2023. Disponível em: <http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/public/downloads/diesel-manual.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2023.

RODRIGUES, D. E. *et al.* Desempenho de um microtrator utilizando- desempenho de um microtrator utilizando-se motores com se motores com. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 28, núm.1, pp.55-63. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303226515013>. Acesso em: 04 jan. 2024.

SISTEMAS E TECNOLOGIA APLICADA. - STA. Sistemas e tecnologia aplicada baterias recarregáveis. 2019. <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-litio/vantagens-e-desvantagens-da-bateria-de-titanato-de-litio-lto>. Acesso em: 26 out. 2023.

SERRANO, J. M. P. R. Desempenho de tratores agrícolas em tração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 1021 - 1027, julho 2007.

SERVIÇO DE APOIO AS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS - SEBRAE. **Boletim de Comércio Exterior**: período de 2012 a 2016. 2016. Disponível em: http://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/RN/Anexos/Boletim_rev_Anual_d_e_Comercio_Exterior_2016_.pdf. Acesso em: 27 de maio de 2024.

SILVEIRA, C. B. O que faz o inversor de frequência e como especificar? **Citisystems**, 16 novembro 2016. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/inversor-de-frequencia/>. Acesso em: 13 mai. 2024.

VALTRA. **Linha BM**: a nova geração de um clássico. 2022. Disponível em: <https://www.valtra.com.br/produtos/tratores/linha-bm.html> . Acesso em: 04 jan. 2024.

VALTRA. **Linha BM Folheto Técnico**. 2023. Disponível em: https://www.valtra.com.br/content/dam/public/valtra/pt-br/produtos/tratores/serie-bm/folheto_BM_A4_WEBv2.pdf. Acesso em: 04 jan. 2024

WEG. Motores elétricos. **WEG**, 2016. Disponível em: <http://www.weg.net/files/products/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>. Acesso em: 30 mai. 2024.

WEG. Mobilidade elétrica. **WEG**, 2019. Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Mobilidade-EI%C3%A9trica/c/BR_WDC_IA_DRV_ET. Acesso em: 13 out. 2023.

YAK TRACTORS. **YAK tratores elétricos**. 2017. Disponível em: <https://www.yaktractors.com/filosofia>. Acesso em: 29 de set. 2023.

Sobre os(as) Autores(as)

ⁱ Luíza Moreira Cardoso dos Santos



Engenheira Mecânica pela Universidade de Mogi das Cruzes (2022) e pós-graduada em Veículos Elétricos e Híbridos no SENAI (2024). Possui experiência em Desenvolvimento de Produtos na área de máquinas pesadas agrícolas e de construção civil. Atualmente, trabalha como engenheira de produto na Caterpillar Inc., no departamento de Desenvolvimento de Drivetrain. <https://orcid.org/0009-0000-3058-1852>

ⁱⁱ Mauricio Gayubas



Graduado em Engenharia Elétrica (1998) com especialização em Marketing (2008) e Mestrado em Gestão Ambiental e Sustentabilidade (2015). Atualmente, é professor de ensino tecnológico em Sistemas Automotivos no SENAI-SP, ministrando disciplinas como Infraestrutura de Serviços e Gestão de Recursos Financeiros. Também leciona Eletromobilidade e outras áreas correlatas na pós-graduação da Faculdade SENAI. <https://orcid.org/0000-0002-7655-4670>

ⁱⁱⁱ Antônio Luiz Barbosa dos Santos



Possui mestrado profissional em Engenharia Automotiva pela USP (2008) e vasta experiência em Engenharia de Produção e Automobilística, com foco em gerenciamento de projetos e produtos. Atualmente, é professor de ensino tecnológico em Sistemas Automotivos no SENAI-SP, ministrando disciplinas como Desenvolvimento de Projetos Automotivos e Materiais Automotivos. Também leciona Metodologia da Pesquisa Científica e Projeto Integrador na pós-graduação da Faculdade SENAI. <https://orcid.org/0000-0001-8016-6841>

^{iv} Francinildo de Sousa Barbosa



Possui mestrado em Educação Matemática pela Universidade Guarulhos (2003). Atualmente, atua como Professor Assistente II no Centro Universitário SENAI-SP, lecionando diversas disciplinas para o curso de Tecnologia em Sistemas Automotivos, e como Diretor de Escola concursado em São Bernardo do Campo. Anteriormente, foi professor em outras instituições de ensino superior e na rede estadual de São Paulo. Também atuou como professor orientador do PIC/OBMEP, sendo bolsista da CAPES. <https://orcid.org/0009-0003-9102-9908>