

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA

FERNANDA TAIS KOHLS

**ANÁLISE COMPARATIVA DA SUBSTITUIÇÃO DE UM MOTOR DE
COMBUSTÃO INTERNA POR ELÉTRICO EM UM TRATOR INDUSTRIAL**

CAXIAS DO SUL
2023

FERNANDA TAIS KOHLS

**ANÁLISE COMPARATIVA DA SUBSTITUIÇÃO DE UM MOTOR DE
COMBUSTÃO INTERNA POR ELÉTRICO EM UM TRATOR INDUSTRIAL**

Trabalho de conclusão apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheira Automotiva na área de motorização de veículos industriais.

Orientador: Prof. Me. Eng. Mec. Adelair Lino Colombo

**CAXIAS DO SUL
2023**

FERNANDA TAIS KOHLS

**ANÁLISE COMPARATIVA DA SUBSTITUIÇÃO DE UM MOTOR DE
COMBUSTÃO INTERNA POR ELÉTRICO EM UM TRATOR INDUSTRIAL**

Trabalho de conclusão da disciplina apresentado à
Universidade de Caxias do Sul como requisito
parcial à obtenção do grau de Engenheira
Automotiva na área de motorização de veículos
industriais.

Orientador: Prof. Me. Eng. Mec. Adelair Lino
Colombo

Aprovado em 11/07/2023

Banca Examinadora:

Prof. Me. Adelair Lino Colombo
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Giovani Dambros Telli
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a meus pais Elenira e Orlando que me deram o dom da vida e sempre incentivaram meus estudos. Também, deixo meu agradecimento ao meu marido Hígor, que foi leitor, validador de dados, questionador e ouvinte para a apresentação. Foi quem aguentou minhas frustrações e buscou sempre ajudar mesmo quando não parecia uma ajuda e sim um “vamos, precisa terminar isso”.

A minha irmã Maria Eduarda e a minha tia Elisangela que aguentaram minhas expressões emocionais a cada nota baixa ou quanto parecia que não havia saída, obrigada a paciência de vocês.

Ao meu orientador Adelair, pelas chamadas de atenção e por ter acreditado em meu potencial, por todas as revisões e formas de deixar o trabalho ainda mais rico, obrigada.

Aos meus amigos, que em muitos compromissos não pude me fazer presente, ainda mais neste último ano e mesmo assim continuaram me apoiando.

RESUMO

O uso de tratores industriais movidos a motores de combustão interna, no transporte interno de empresas, gera ruído e poluição. Com o objetivo de atenuar ruído na fábrica e poluição ambiental, gerada através dos gases de escape de motores, foram analisadas alternativas de melhorias de substituição da motorização a combustão por elétrica. A proposta do projeto foi reduzir o ruído e melhorar o desempenho em aplicação industrial. Neste contexto, foi analisada substituição de um motor à combustão por um elétrico de indução. Conduziu-se testes experimentais para avaliar os valores de consumo, mostrando uma redução de 25% no custo de operação e também, testes de ruído de passagem, onde houve uma melhora de 23%, não sendo mais necessário o uso de EPI durante a operação do trator. Além disso, a análise de desempenho faz um comparativo entre as duas motorizações, mostrando que para o motor elétrico pode-se utilizar apenas uma marcha operacional para os requisitos de aplicação do trator na área industrial.

Palavras-chave: Conversão; trator; motor elétrico; poluição; veículo elétrico; projeto; testado.

ABSTRACT

The use of industrial tractors powered by internal combustion engines, in the internal transport of companies, generates noise and pollution. In order to attenuate noise in the factory and environmental pollution, generated through the exhaust gases of engines, alternatives were analyzed for improvements in replacing the combustion engine with an electric one. The project proposal was to reduce noise and improve performance in industrial application. In this context, the replacement of a combustion engine by an induction electric engine was analyzed. Experimental tests were carried out to evaluate the consumption values, showing a 25% reduction in the cost of operation and also, passing noise tests, where there was an improvement of 23%, with the use of Personal Protective Equipment no longer being necessary. during tractor operation. In addition, the performance analysis makes a comparison between the two engines, showing that for the electric motor only one operational gear can be used for the tractor application requirements in the industrial area.

Keywords: Conversion; tractor; electric motor; pollution; electric vehicle; project; tested.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
MCI	Motor a combustão interna
MCE	Motor a combustão externa
ME	Motor elétrico
MIE	Motor de ignição espontânea
MIF	Motor de ignição por faísca
PEC	Posição externa crítica
PL	Projeto de lei
PMC	Percurso de movimento crítico
PMI	Ponto morto inferior
PMS	Ponto morto superior
TAI	Temperatura de autoignição
VE	Veículo elétrico

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo do Pistão 4T	15
Figura 2 - Esquema funcionamento do cilindro-pistão	16
Figura 3 - Diagrama p-V de um motor Ciclo Diesel	18
Figura 4 - Partes do ME	20
Figura 5 - Representação de campo magnético girando.....	22
Figura 6 - Forças atuantes em um trator	24
Figura 7 - Forma de medição de ruído de passagem	28
Figura 8 - Curva de torque MCI X ME	29
Figura 9 - Fluxograma de trabalho	30
Figura 10 - Trator Agrale 4100	31
Figura 11 - Conjunto de Eletrificação em Bancada.....	34
Figura 12 - Trator com ME	35
Figura 13 – Trajeto do teste de autonomia	36
Figura 14 - Área de medição de ruído de passagem.....	40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1– Classificação dos ME	21
--------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de Solo.....	26
Tabela 2 - Coeficiente de Tração.....	27
Tabela 3 - Nível de Ruído Admissível em dB.....	28
Tabela 4 - Dados Técnicos do trator.....	31
Tabela 5 - Relação da Transmissão	32
Tabela 6 - Dados Técnicos do ME	33
Tabela 7 - Abastecidas durante trajeto	37
Tabela 8 - Medições durante o trajeto	37
Tabela 9 - Tempo e Consumo de Energia ME	38
Tabela 10 - Consumo para recarga do banco de baterias	38
Tabela 11 - Resultados de consumo	39
Tabela 12 - Ruído de passagem.....	40
Tabela 13 - Ruído operador exposto	40

LISTA DE SÍMBOLOS

P_e	Potência efetiva	[W]
Ω	Velocidade Angular	[rad/s]
T	Torque	[N.m]
N	Velocidade de rotação do motor	[rpm]
W_i	Trabalho indicado	[J]
D	Diâmetro	[m]
P_{mi}	Pressão média indicada	[Pa]
S	Deslocamento	[m]
Z	Número de cilindros	[-]
P_i	Potência indicada	[W]
P_p	Potência absorvida pelas resistências internas	[W]
η_m	Rendimento mecânico	[-]
I	Relação de Transmissão	[-]
N_{movida}	Número de dentes engrenagem movida	[-]
N_{motora}	Número de dentes engrenagem motora	[-]
V_o	Velocidade	[m/s]
F_{arr}	Força de arrasto	[N]
C_a	Coefficiente aerodinâmico	[-]
ρ_{ar}	Densidade específica do ar	[kg/m ³]
V	Velocidade média	[m/s]
A_{fr}	Área frontal	[m ²]
F_{rol}	Força de resistência ao rolamento	[N]
F	Coefficiente de rolamento	[-]
G_f	Força peso rodas dianteiras	[N]
G_t	Força peso rodas traseiras	[N]
G	Força peso trator	[N]
F_{rampa}	Força resistência na rampa	[N]
F_{res}	Força resultante	[N]
F_{tr}	Força de tração na barra	[kgf]
C_{tr}	Coefficiente de tração	[-]
W_{rt}	Carga dinâmica no eixo traseiro	[kgf]

$E_{consumida}$ Energia consumida

[Wh]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA	12
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo geral.....	13
1.2.2	Objetivos específicos.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA.....	14
2.1.1	Funcionamento geral.....	14
2.1.2	Ciclo Diesel	16
2.1.3	Ciclo Otto	16
2.1.4	Propriedades do Motor a combustão interna	17
2.1.4.2	Potência indicada.....	17
2.1.4.3	Potência absorvida pelas resistências passivas.....	18
2.1.5	Rendimento mecânico	19
2.1.6	Combustíveis	19
2.2	MOTORES ELÉTRICOS	19
2.2.1	Baterias	22
2.3	TRANSMISSÃO	22
2.3.1	Transmissão agrícola.....	23
2.3.2	Relação de transmissão	23
2.4	ANÁLISE DE DESEMPENHO	24
2.4.1	Força de arrasto.....	24
2.4.2	Força de resistência ao rolamento.....	25
2.4.3	Força de rampa.....	26
2.4.4	Força total resistente ao avanço	26
2.4.5	Tração na barra.....	26
2.5	RUIDO	27
2.6	DESEMPENHO DE UM MCI COMPARADO AO ME.....	28

3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1	DADOS DO TRATOR.....	30
3.2	DADOS DO MOTOR ELETRICO.....	33
3.3	DESCRIÇÃO DOS TESTES EXPERIMENTAIS	35
3.4	CÁLCULOS COMPARATIVOS	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1	MEDIÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL-ENERGIA	37
4.2	MEDIÇÃO DE RUÍDOS	39
4.3	CÁLCULOS COMPARATIVOS DE PERFORMANCE.....	41
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Atualmente o motor elétrico como força motriz para veículos vem ganhando espaço no cenário automotivo, tendo como principal fator a política de diminuição da poluição por combustíveis fósseis, uma das causas do aquecimento global. Em continentes como a Europa, já estão sendo criadas leis que incentivam a produção e a comercialização de veículos elétricos (INFOMONEY, 2021). No Brasil, o custo para compra de tal produto ainda não o torna tão popular, porém, no mês de maio de 2022 foi aprovada no senado dois projetos de lei que incentivam a pesquisa e desenvolvimento para projetos nacionais, visando a diminuição do valor de venda dos veículos elétricos.

Tanto nas indústrias como no cenário agrícola, tratores são utilizados para realização de tração de cargas. No âmbito rural, estão presentes em torno de 1,25 milhões de tratores e implementos (IBGE, 2017), munidos de motor de combustão interna (MCI) emitindo gases de efeito estufa para atmosfera. Além da emissão de gases, os tratores aplicados no ambiente industrial, somam-se aos demais ruídos existentes, deixando o ambiente com maior ruído.

Avaliando presença de eletrificação tanto para veículos utilitários leves, veículos de carga e como para a utilização agrícola, percebe-se a oportunidade de dimensionar e fazer a substituição da motorização, utilizada em um trator de transporte interno industrial. Essa mudança irá auxiliar na diminuição do ruído fabril e na eliminação de gases do efeito estufa durante a operação do equipamento.

1.1 JUSTIFICATIVA

Pode-se observar na atualidade a importância de conservar a saúde dos habitantes e reduzir a emissão de gases tóxicos e ruídos existentes no ambiente, ocasionados em maioria, pelos meios de transportes em geral. Com isso, tem aumentado cada vez mais o interesse em estudos e soluções em propulsão elétrica.

Considerando a aplicação de um trator do tipo industrial em empresa é de fundamental importância a preocupação com ruído e emissões gasosas no ambiente fabril. Neste contexto, este estudo analisa a viabilidade de substituição da motorização a combustão interna de um trator industrial para uma elétrica visando a redução de emissões e ruídos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a substituição de motor a combustão interna por um motor elétrico em um veículo agrícola para aplicação industrial.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) analisar a fundamentação de motores elétricos e de combustão interna;
- b) elaborar uma planilha de desempenho veicular, considerando o trator configurado com MCI e ME;
- c) testar o desempenho experimental do trator através da medição de ruído e consumo;
- d) comparar os resultados obtidos nos testes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

2.1.1 Funcionamento geral

O MCI, é uma máquina térmica que possibilita transformar calor em trabalho (BRUNETTI, 2018), através da queima de um combustível (TILLMANN, 2013), possuindo a vantagem da ausência de trocadores de calor (CASTRO; RAHDE, 2014). O primeiro motor desenvolvido utilizando esse princípio é datado de 1680, idealizado por Chistian Huygens, sendo o combustível usado a pólvora (WIMPERIS, 1922). Atualmente os MCI utilizam combustíveis de origem fósseis e também biodegradáveis, variando conforme sua aplicação.

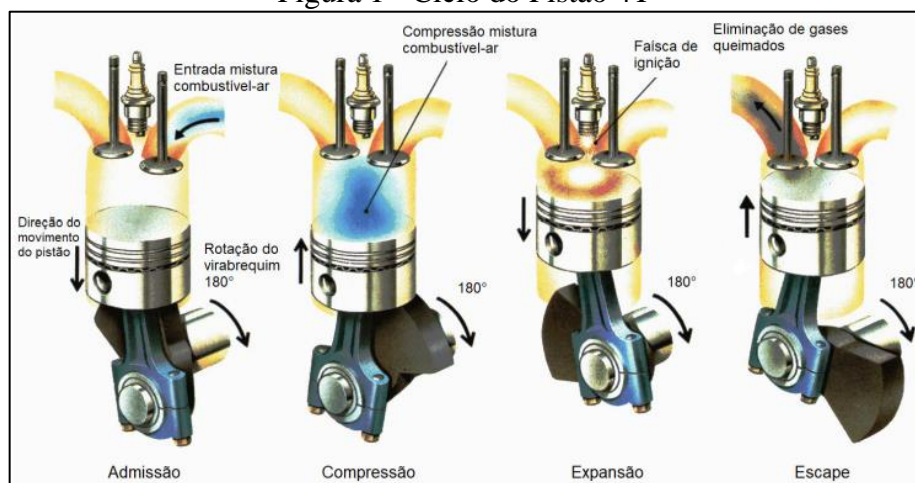
Segundo Brunetti (2018), os MCI podem ser classificados como:

- a) alternativos que obtêm energia do deslocamento do pistão, rotativos com trabalho sendo extraído diretamente do movimento de rotação e de impulso com o trabalho sendo obtido pela força de expansão dos gases;
- b) rotativos, que não necessitam da transformação de movimento, sendo o trabalho gerado pelo próprio movimento de rotação. Um exemplo dessa aplicabilidade são os motores Wankel, conforme a figura abaixo, e também nas turbinas de gases;
- c) motores de impulso, utilizados principalmente na indústria aeronáutica, usando da expansão dos gases na combustão para gerar trabalho.

Posteriormente, conforme a forma de ignição, os MCI são divididos como ignição por centelha, operando em Ciclo Otto e ignição por compressão, operando no Ciclo Diesel (COSTA; RAHDE, 2014). O ciclo Otto é formado pela mistura ar-combustível seguido por centelha (TILLMANN, 2013). O ciclo Diesel, segundo Tillmann (2013) e Brunetti (2018), é aquele que após a aspiração do ar, o combustível é injetado na câmara de combustão, onde a queima é realizada devido à alta pressão e calor.

Outra classificação atrelada aos MCI refere-se ao número de tempos por ciclo, sendo 2T ou 4T. O termo T significa “tempo”, relacionando a movimentação do fluido ativo durante a movimentação do pistão entre o ponto morto superior e inferior (PMS e PMI respectivamente) (COSTA E RAHDE, 2014). Os motores a quatro tempos realizam um ciclo completo a cada duas voltas da manivela do motor (BRUNETTI, 2018). Na Figura 1 a seguir, está representado um ciclo, sendo seus tempos conhecidos como, admissão, compressão, expansão e escape, necessitando minimamente de duas válvulas para cumprimento do ciclo.

Figura 1 - Ciclo do Pistão 4T



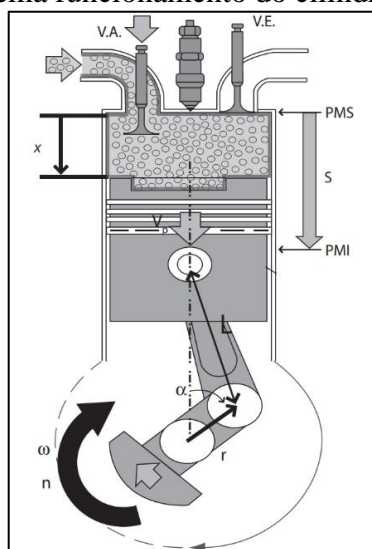
Fonte: Simêncio (2019).

Os MCI são empregados em diversas aplicações como geradores de energia elétrica, máquinas industriais como retroscavadeira, navios, veículos, tratores. Para cada aplicação um MCI específico pode ser desenvolvido. O uso marítimo para transporte de cargas, por exemplo, requer peças de grandes dimensões. Outros usos como o agrícola, requerem motores com alto torque e baixa velocidade, como os tratores. Esses, podem ser utilizados também no meio industrial utilizando motores monocilíndricos, por exemplo.

Outra divisão que está relacionada aos MCI é quanto à disposição e número de cilindros que podem ser empregados. Os cilindros ficam localizados no bloco do motor e são responsáveis por acomodar o pistão. Tillmann (2013) traz que a disposição dos cilindros pode ser em linha, V, opostos ou radiais.

O número de cilindros presente em um motor pode variar, classificando os MCI em monocilíndricos e policilíndricos. O motor monocilíndrico como a própria nomenclatura explica, refere-se a um MCI com apenas um cilindro para funcionamento (RODEL; TAVARES, 2018). A movimentação do cilindro acontece da mesma forma que motores com mais cilindros, na Figura 2, está descrito a funcionalidade do pistão dentro do cilindro. Normalmente, esse tipo de motorização é empregue em motocicletas, também é utilizado para tratores e algumas máquinas industriais. A movimentação dentro do cilindro pistão-biela-manivela é o que gera o momento torsor no eixo das manivelas, obtendo os vetores de força e sendo a força resultante que irá variar conforme o ângulo ω , fazendo com que o pistão vá do PMI ao PMS. Com o motor em funcionamento obtém-se o momento torsor médio, que é conhecido como torque (BRUNETTI, 2018).

Figura 2 - Esquema funcionamento do cilindro-pistão



Fonte: Brunetti (2018).

2.1.2 Ciclo Diesel

Também conhecidos pela sigla MIE, motores de ignição espontânea, os motores ciclo diesel não necessitam de faísca para que ocorra a combustão. Quando o pistão fica próximo ao PMS, é injetado combustível que reage de forma espontânea com o oxigênio presente no ar quente (BRUNETTI, 2018).

Para MIE a taxa de compressão é elevada, podendo ficar entre 15,0:1 até 24,0:1, para que a temperatura de ignição fique superior a temperatura de autoignição do combustível. Esses motores, podem ser fabricados tanto na classificação 2T quanto 4T, dependendo de sua aplicação.

2.1.3 Ciclo Otto

O ciclo Otto, conhecido também por ignição por faísca, MIF, possui como diferença do ciclo Diesel uma vela que gera faísca para que a mistura combustível e ar entre em explosão, a vela se torna responsável para que ocorra a combustão do combustível empregado (BRUNETTI, 2018), principalmente gasolina e etanol.

O funcionamento se dará tanto no ciclo 2T e 4T. Sua taxa de compressão varia conforme o combustível empregado, etanol e gasolina são os mais utilizados, com taxas variando de 8,5:1 até 14:1.

2.1.4 Propriedades do Motor a combustão interna

Conforme Giacosa (2000) pode-se definir num processo de combustão: a potência efetiva, a potência indicada e a potência absorvida pelas resistências passivas.

2.1.4.1 Potência efetiva

É a potência disponível para uso, sendo medida com o auxílio do dinamômetro, pelo processo de dinamometria ou pela bancada dinamométrica (TILLMANN, 2013). Também é considerada a potência de freio, já que é usada para tração de cargas (BRUNETTI, 2018). A Equação (1) define a potência efetiva.

$$P_e = \omega \cdot T = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot T \quad (1)$$

onde P_e [W] é a potência efetiva, ω é a velocidade angular do motor [rad/s], T é o torque do motor [N.m] e n a rotação do motor [rpm].

2.1.4.2 Potência indicada

Segundo Brunetti (2018), a potência indicada é desenvolvida pelo ciclo termodinâmico do fluido ativo. Sendo medida pelo indicador de pressões resultando em um diagrama p-V, cuja área dará o trabalho realizado no ciclo. Este trabalho está representado na Figura 3.

O trabalho, W_i [J], pode ser expresso conforme a Equação (2).

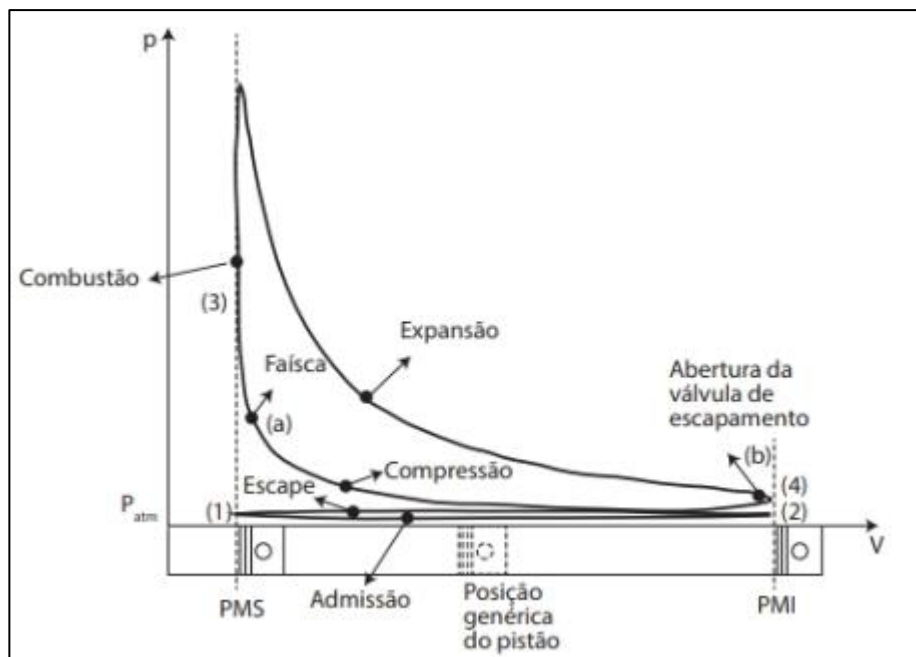
$$W_i = \oint p \, dV \quad (2)$$

O trabalho pode ser simplificado na Equação (3).

$$W_i = \frac{\pi \cdot A^2}{4} \cdot P_{mi} \cdot S \quad (3)$$

onde, A^2 [m] representa a área do pistão, S [m] o deslocamento realizado durante o ciclo e P_{mi} [Pa] a pressão indicada.

Figura 3 - Diagrama p-V de um motor Ciclo Diesel



Fonte: Brunetti (2018).

Potência é a taxa de trabalho realizado em um determinado período, sendo assim, utilizando a Equação (3) multiplicando pelo período em que acontece o movimento temos a Equação (4), que representa a potência indicada.

$$P_i = W_i \cdot \frac{\omega}{x} \cdot z \quad (4)$$

onde P_i [W] é a potência indicada, ω é a velocidade angular do motor [rad/s], x é a constante referente ao tipo do motor ($x = 1$ para 2 tempos e $x = 2$ para motores 4 tempos) e z é a quantidade de cilindros.

2.1.4.3 Potência absorvida pelas resistências passivas

Apenas parte da potência absorvida na combustão do MCI vai para a árvore de manivelas (GIACOSA, 2000). A outra parte pode ser dissipada para o próprio MCI e também para o atrito entre os componentes. A potência absorvida pelas resistências passivas é a pressão absorvida P_p [W] e a subtração entre a potência indicada e a potência efetiva, como descrito na Equação (5)

$$P_p = P_i - P_e \quad (5)$$

2.1.5 Rendimento mecânico

Os valores da potência efetiva e indicada podem ser relacionados resultando na eficiência do motor. A Equação (6) representa o rendimento mecânico.

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} \quad (6)$$

2.1.6 Combustíveis

Combustíveis são substâncias que produzem calor, o qual gera movimento (EPE, 2022). Nos MCI, os combustíveis são responsáveis pela combustão, que nada mais é que a liberação de energia contida nas ligações químicas em energia térmica durante o processo de detonação na câmara de combustão (TURNS, 2013).

Para MCI aplicados em larga escala principalmente em veículos automotores no Brasil, três tipos de combustíveis são mais utilizados, gasolina, etanol e diesel. Tanto a gasolina quanto o diesel são derivados do petróleo, sendo inflamáveis e contribuindo para o lançamento de gases do efeito estufa na atmosfera. O diesel é o principal emissor de enxofre, causador da chuva ácida. O etanol é uma fonte de energia renovável, podendo ser produzido a partir de cana de açúcar contribuindo com a diminuição do êxodo rural (CASTRO E RAHDE, 2014).

Uma alternativa empregando hidrogênio vem sendo desenvolvida para que os combustíveis fósseis possam ser substituídos e os MCI garantam sua continuidade. Como o petróleo, também trata-se de uma fonte esgotável. O hidrogênio em contrapartida está presente na atmosfera, sendo a única dificuldade mantê-lo enclausurado e evitar o perigo de explosão.

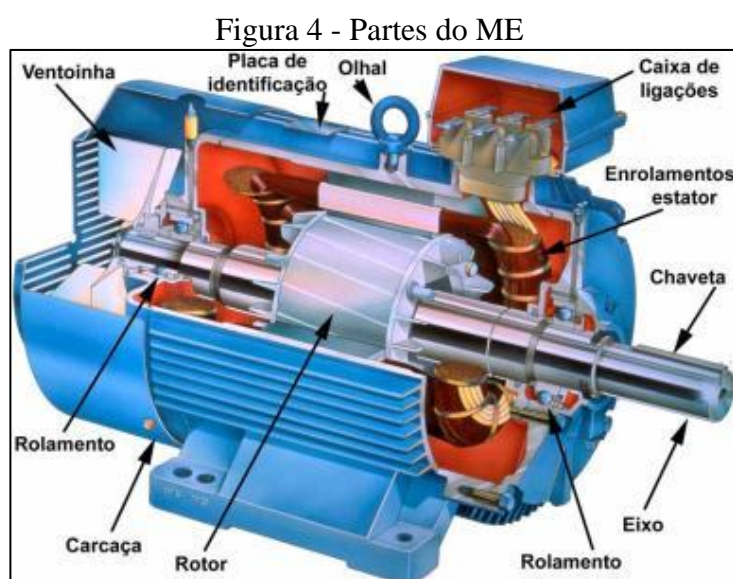
2.2 MOTORES ELÉTRICOS

2.2.1 Fundamentos gerais

Os motores elétricos (ME) produzem energia mecânica através de campos magnéticos que interagem entre si (PETRUZELLA, 2013). Seu desenvolvimento começou com a descoberta do princípio de funcionamento do campo magnético, por meio de um experimento realizado por Hans Christian Oersted em 1820, no qual ele passou uma corrente elétrica gerada por uma pilha por um fio condutor, e aproximou o fio a uma bússola, a agulha da bússola

alinhou-se perpendicularmente ao fio, fazendo com que Oersted concluísse que em volta do fio existia um campo magnético (HEYMANN, 1988).

Com o passar do tempo, outros cientistas e matemáticos foram aperfeiçoando o conhecimento obtido, destacando André-Marie Ampere que começou a formular a lei do eletromagnetismo, Michael Faraday que em 1822 pode demonstrar o campo magnético circular e mais tarde conseguiu demonstrar que uma bobina energizada também poderia fazer a função do ímã. Sendo assim, o ME passou a ser constituído por rotor, parte móvel e um estator, parte fixa e utilizar comutador, para inversão dos pólos. Em 1873, foi apresentado em Viena o dínamo de Gramme, chamado também de máquina inversa, ou seja, quando ligada a uma corrente elétrica, produzia energia motora e quando movida por uma força motora, produzia energia elétrica (HEYMANN, 1988). Essa invenção impulsionou Nikola Tesla a desenvolver o ME de corrente alternada, como a energia que chega nas tomadas hoje em dia, esse tipo de motor eliminou o uso de comutadores. Na Figura 4, é possível ver a construção do ME industrial comercializado atualmente.



Fonte: <https://www.sabereletrica.com.br/inverter-rotacao-motores-eletricos/> (2022).

2.2.2 Classificação dos ME

Segundo Filippo Filho (2013), os ME dividem-se primeiramente em duas grandes famílias, motores de corrente contínua (CC) e motores de corrente alternada (CA). No Quadro abaixo é possível verificar quatro classificações de ME e sua alimentação.

Quadro 1– Classificação dos ME

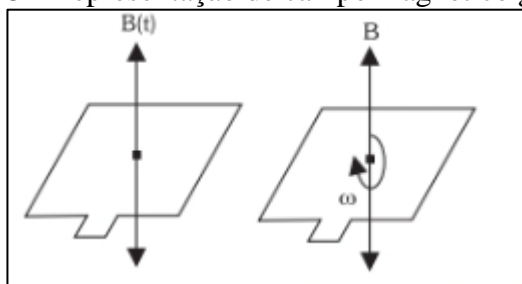
Tipo	Alimentação	Corrente	Composição	Funcionamento
Motor de corrente contínua com escovas	Fonte ou bateria	Contínua	Estator com ímãs Rotor com bobina elétrica	Energização do rotor gerando força magnética com os polos inversos ao estator
Motor assíncrono ou de indução	Fonte ou bateria	Alternada	Estator bobinado e rotor gaiola de esquilo	Energização do estator produzindo campo magnético, induzindo o rotor a girar
Motor síncrono ou de ímã permanente	Fonte ou bateria	Alternada	Estator bobinado e rotor com ímãs	Energização do estator gerando campo magnético rotativo, rotação do rotor produzindo interação com o estator, fazendo movimentação de forma síncrona
Motor de relutância ou de passo	Fonte ou bateria	Alternada	Estator bobinado e rotor	Idem motor síncrono

Fonte: Adaptado de Cavalcante Júnior (2021).

Os ME são utilizados em diversas aplicações, como nos ramos alimentícios, meios rurais e até mesmo em meio rodoviário. Para cada aplicação um número de quilowatts é requerido e entregue pelo motor durante seu funcionamento, ou seja, a potência entregue irá variar conforme a aplicação do motor. Acredita-se que cerca de 40 % da energia gerada no Brasil é direcionada para os ME existentes (FILIPPO FILHO, 2013). Para o meio rodoviário, baterias são necessárias para fornecer energia ao ME, sendo a mesma recarregada utilizando da rede elétrica convencional, usando indiretamente a energia elétrica gerada no país.

Os ME de indução, podem ser usados em todas as aplicações citadas acima, e funcionam sofrendo uma variação no fluxo magnético produzindo a tensão induzida em seus terminais. O campo passa a ser girante e é produzido pelas bobinas de enrolamento contidas no estator, atravessando o fluxo magnético do rotor (FILIPPO FILHO, 2013). A Figura 5, demonstra como o campo magnético é alterado para induzir a corrente para que o movimento de giro do eixo ocorra.

Figura 5 - Representação de campo magnético girando



Fonte: Filippo Filho, 2013.

2.2.1 Baterias

As baterias são dispositivos eletroquímicos que armazenam energia elétrica através de ligações químicas (BOSCH, 2005), sendo um dos principais motivos da descontinuidade dos veículos elétricos no século XX, devido as baterias até então terem baixa autonomia. Com o passar dos anos novas tecnologias foram desenvolvidas podendo dividir as baterias em duas classificações de tração e de bordo.

- a) as baterias de bordo são geralmente compostas de chumbo-ácido, utilizadas para alimentação inicial dos sistemas de injeção e para gerar pulsos elétricos para motores de arranque, usada principalmente em veículos com combustão interna. São as mais utilizadas mundialmente. Possuem geralmente tensão de 12 volts e podem variar sua corrente, conforme a necessidade da aplicação.
- b) as baterias de tração são usadas principalmente em veículos híbridos e elétricos, possuindo a capacidade de movimentar o motor de tração. São de alta tensão, compostas por número de células ligadas tanto em série quanto paralelo, fechando o chamado pack de bateria. São comercializadas em chumbo-acido, íons de lítio, hidreto de níquel e outras composições químicas.

Para utilização de ME, as baterias acabam por ser a principal fonte de energia e podem ser recarregadas para garantia do desempenho do motor.

2.3 TRANSMISSÃO

A transmissão, também conhecida como caixa de câmbio tem a função de fornecer as forças de tração e impulsão necessárias para gerar o movimento do veículo (BOSCH, 2005).

2.3.1 Transmissão agrícola

Os tratores são usados para movimentar e tracionar implementos agrícolas, automatizando tarefas que antes eram realizadas manualmente ou por meio de tração animal. No ambiente industrial os tratores são utilizados para tração de cargas, como comboio para abastecimento de peças, ou até mesmo deslocamento de chassis. Nos tratores, geralmente a transmissão é do tipo mecânica, mas existem também transmissões hidrostáticas e hidrocinéticas (MACMILLAN, 2002). A rotação do motor é alta, é necessário que haja a redução da rotação, fazendo com que a velocidade que chega até as rodas seja menor. Para tratores a velocidade pode variar de 1 km/h até velocidades de maiores a 20 km/h, isso irá depender da relação de marchas que será adotada.

A transmissão é acionada com um sistema de embreagem de fricção, quando acionado o pedal, o disco com molas localizando entre a caixa de câmbio e o motor, movimentando permitindo a troca de marchas e alteração na velocidade transmitida às rodas, ocorrendo a troca das marchas.

2.3.2 Relação de transmissão

A relação de transmissão é calculada utilizando o número de dentes da engrenagem movida e da engrenagem motora, também conhecidos como pinhão e coroa (SHIGLEY, 2005). Geralmente, a Equação (7) é utilizada para demonstrar a relação total da transmissão.

$$i = \frac{N_{movida}}{N_{motora}} \quad (7)$$

Sendo i a relação total da transmissão, N_{movida} o número de dentes da engrenagem movida e N_{motora} o número de dentes da engrenagem motora.

Para Macmillan (2002), em tratores a velocidade está diretamente ligada a relação de marchas que está sendo utilizada, pela Equação (8).

$$V_o = \frac{\pi \cdot D \cdot N_e}{q} \quad (8)$$

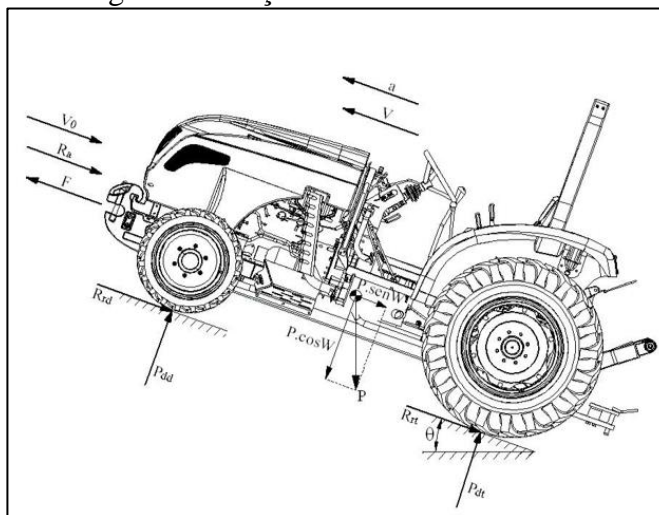
Em que, D [m] é o diâmetro da roda motriz, q é a taxa ou relação da transmissão, que na Equação (7) é denotada com i , N_e é velocidade de rotação do motor [rpm]. Dessa maneira,

é possível dizer a velocidade em que o trator está se locomovendo, considerando parâmetros de motor e transmissão.

2.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO

Para que um veículo se locomova seu conjunto de trem de força precisa vencer forças de resistência ao movimento. Segundo Gillespie (1992), as forças atuantes no veículo tendem a mudar sua trajetória, sendo elas composta pelo atrito dos pneus com o solo, atrito do ar com a superfície do veículo, inclinação de pista e a inércia. Macmillann (2002), o trator apresenta as mesmas forças, resistência ao rolamento, resistência aerodinâmica, atrito devido à inclinação da pista e resistência à inércia. Além disso, também é considerada a força tração na barra. Na Figura 6 é possível visualizar as forças presentes.

Figura 6 - Forças atuantes em um trator



Fonte: Adaptado de Macmillan (2022).

2.4.1 Força de arrasto

A força de arrasto também é conhecida como resistência aerodinâmica e está relacionada diretamente a forma do veículo, à sustentação, ao atrito na superfície, as interferências e ao fluxo interno de ar (BRUNETTI, 2018). A forma como o veículo é constituído irá influenciar nas linhas de resistência aerodinâmicas, tornando o carro mais resistente ao ar em altas velocidades ou menor resistência. Em tratores esse quesito não é tão importante, pois são veículos que andam em baixas velocidades.

A força de arrasto, F_{arr} [N], é determinada pela Equação (9).

$$F_{arr} = C_a \cdot \frac{\rho_{ar} \cdot v^2 \cdot A_{fr}}{2} \quad (9)$$

Onde C_a é coeficiente aerodinâmico, geralmente tabelado para cada tipo de veículo, para trator é considerado o valor de 1,30; ρ_{ar} [kg/m³] densidade específica do ar, v [m/s] a velocidade constante do veículo e A_{fr} [m²] a área frontal do veículo.

2.4.2 Força de resistência ao rolamento

Os pneus sofrem um deslocamento durante sua movimentação, como uma espécie de deformação (BRUNETTI, 2018). Para que a movimentação ocorra uma parte da potência entregue pelo motor é destinada as rodas. A força de resistência ao rolamento é dada pela Equação (10):

$$F_{rol} = (f \cdot G_f + f \cdot G_t) \cdot \cos \alpha \quad (10)$$

sendo: f o coeficiente de rolamento;

G_f o peso nas rodas dianteiras [N];

G_t o peso nas rodas traseiras [N];

α o ângulo de inclinação da pista.

O coeficiente de rolamento está relacionado com o tipo de piso, o diâmetro do pneu e parâmetros tabelados. A Equação (11) descreve a forma para cálculo do coeficiente de rolamento.

$$C = k \cdot d^m \quad (11)$$

Onde: k e m são tabelados conforme abaixo;

d o diâmetro do pneu utilizado [pol];

A Tabela 1 apresenta os Parâmetros do solo para usar na fórmula acima.

Tabela 1 - Parâmetros de Solo

Tipo de solo	K (adimensional)	m (adimensional)	C (adimensional)
Areia solta	6,3	-0,9	0,425
Argila cultivada	4,2	-0,8	0,382
Terreno semeado	1,6	-0,7	0,196
Gramma	1,5	-0,3	0,610
Concreto	0,96	-1,0	0,048

Fonte: Santos Filho e Santos (2001).

2.4.3 Força de rampa

A força de rampa, F_{rampa} [N], é a força necessária para que o veículo vença uma rampa com inclinação α , considerando seu peso G [N].

$$F_{rampa} = G \cdot \cos \alpha \quad (12)$$

A inclinação geralmente é representada em forma de porcentual e pode ser convertida para graus usando a equação abaixo.

$$inclinação [\%] = \tan \alpha \cdot 100 \quad (13)$$

2.4.4 Força total resistente ao avanço

É a soma das resistências de arrasto, rolamento e rampa em N.

$$F_{res} = F_{arr} + F_{rol} + F_{rampa} \quad (14)$$

2.4.5 Tração na barra

A força de tração na barra é utilizada principalmente para máquinas agrícolas e representa quanto o equipamento é capaz de tracionar uma determinada carga. A Equação (15) traz como o cálculo é realizado:

$$F_{tr} = C_{tr} \cdot W_{rt} \quad (15)$$

Sendo: F_{tr} a força de tração [kgf];

C_{tr} o coeficiente de tração, variando conforme a Tabela 2;

W_{rt} a carga dinâmica no eixo traseiro [kgf].

Tabela 2 - Coeficiente de Tração

Condições do solo	Deslizamento (%)	Coeficiente de tração (%)		
		Mínimo	Máximo	Médio
Estrada de concreto	5	0,57	0,75	0,66
Argila seca	16	0,52	0,66	0,55
Argila arenosa	16	0,45	0,58	0,50
Argila fina seca	16	0,29	0,42	0,36
Estrada batida	5	0,32	0,41	0,36
Solo coberto por grama	8	0,31	0,41	0,36

Fonte: Santos Filho e Santos (2001).

2.5 RUÍDO

Atualmente um dos requisitos para homologação de um veículo automotor é a medição de ruído. Todo veículo, carro, trator, caminhão, emite um som resultante da propagação das vibrações mecânicas com frequência dentro da detecção humana (BOSCH, 2005). O sistema auditivo humano é capaz de discriminar sons de 16 até 20.000 Hz. A acústica é o ramo da física que estuda o efeito dos ruídos para garantir a audibilidade humana. O CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), é o órgão que regula os níveis de emissão sonora permitida. Na Tabela 3, estão presentes os níveis de intensidade sonora permitidos conforme a classificação dos veículos.

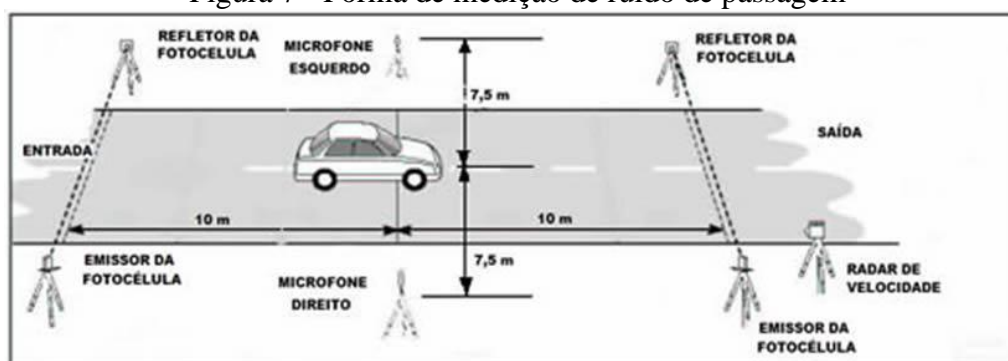
Tabela 3 - Nível de Ruído Admissível em dB

Categoria	Descrição	Nível de ruído			
		Motor Ciclo Otto	Motor Ciclo Diesel		
			Injeção direta	Injeção indireta	
a	Veículo passageiro até 9 lugares	74	75	74	
b	Veículo de passageiro com mais de 9 lugares; de carga; de tração ou de uso misto	PBT até 2000 kg	76	77	76
		PBT entre 2000 kg e 3500 kg	77	78	77
c	Veículo de passageiro ou de uso misto com PBT maior que 3500 kg	Potência máxima menor que 150 kW	78	78	78
		Potência máxima igual ou superior a 150 kW	80	80	80
d	Veículo de carga ou de tração com PBT maior que 3500 kg	Potência máxima menor que 75 kW	77	77	77
		Potência máxima entre 75 kW e 150 kW	78	78	78
		Potência máxima igual ou superior a 150 kW	80	80	80

Fonte: Adaptado de <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/ruído/>, acessado em 24.11.2022.

O ruído pode ser medido de forma experimental utilizando um decibelímetro, equipamento que mede o nível de pressão sonora existente no ambiente. Para veículos automotores utiliza-se a norma NBR 15145 para medição de ruído de passagem. Na Figura 7 apresenta-se a disposição dos equipamentos para realização da medição conforme a norma.

Figura 7 - Forma de medição de ruído de passagem



Fonte: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/ruído/>, acessado em 24.11.2022.

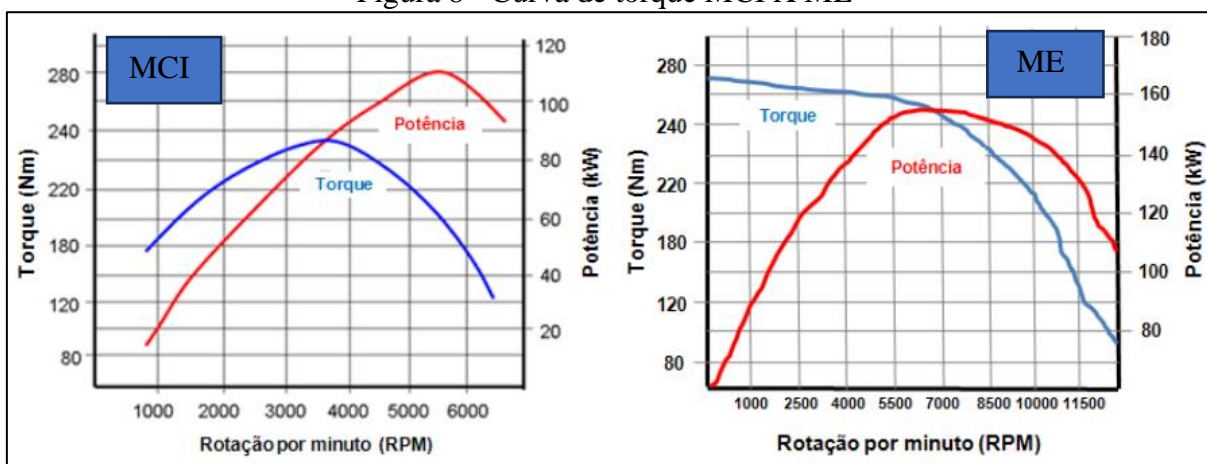
2.6 DESEMPENHO DE UM MCI COMPARADO AO ME

Ao contrário do MCI que necessita de uma transmissão acoplada para maior aproveitamento do torque do motor, o ME consegue entregar uma potência instantânea e possuindo um rendimento de 90%, enquanto o MCI consegue chegar em torno de 35%. Isso

ocorre pois, o ME não depende de vários fatores que o MCI depende, um exemplo é o sistema de escape para redução de ruído.

As curvas de torque demonstradas na Figura na 8, fazem um comparativo em MCI e ME. Isso aponta as diferenças entre esses tipos de motores, a potência máxima registrada pelo ME é obtida em um grau de torque menor que o MCI, já o torque é uma curva de crescimento e decaimento e para os ME é apenas uma curva de decaimento.

Figura 8 - Curva de torque MCI X ME

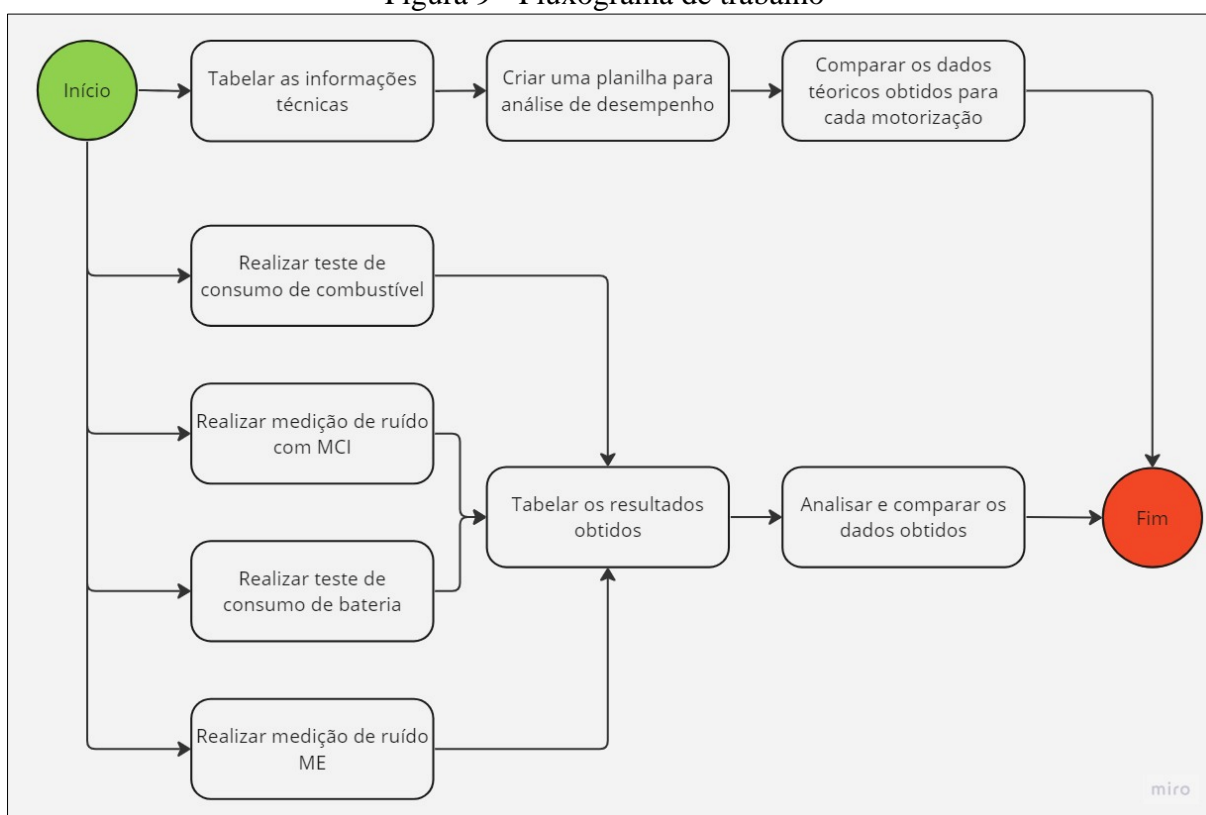


Fonte: Cavalcante Júnior (2021).

3 MATERIAIS E METÓDOS

Este trabalho tem como objetivo analisar a substituição de um motor a combustão para um motor elétrico em um veículo agrícola para aplicação industrial. Para isso, um trator modelo 4100, ano 1972, fabricante Agrale S.A, teve sua motorização substituída para elétrica. A Figura 9 representa a forma como foram realizadas as análises para apresentação da comparação dos resultados.

Figura 9 - Fluxograma de trabalho



Fonte: A autora (2023).

3.1 DADOS DO TRATOR

O trator utilizado nesse estudo é de versão industrial e realiza atividades dentro de uma planta fabril localizada em Caxias do Sul. As atividades englobam a movimentação de cargas entre dois pavilhões, para isso, o trator transita entre o ambiente externo (de um pavilhão a outro) e interno para disponibilizar as cargas em pontos nas linhas de produção, além de facilitar a movimentação de cargas durante a manutenção predial. Na Tabela 4 estão descritos

os dados técnicos do trator em sua versão de fábrica. Na Figura 10 está representado o trator com a motorização a combustão.

Tabela 4 - Dados Técnicos do trator

Especificações	
Fabricante	Agrale S.A
Motor de Combustão	Agrale M-90
Número de cilindros	1
Sistema e ciclo	Diesel a 4 tempos
Rotação máxima	2750 rpm
Razão de compressão	19:01
Potência	14,7 CV a 2750 rpm
Torque máximo	3,9 daN.m a 2250 rpm
Refrigeração	a ar por turbina
Pneu dianteiro	5,60X15
Pneu traseiro	8,00X18"
Peso total	920 kg
Peso no rodado dianteiro	460 kg
Peso no rodado traseiro	460 kg
Tanque de combustível	23 l
Número de marchas à frente	7
Número de marchas ré	3

Fonte: Adaptado do Manual do Proprietário (1984).

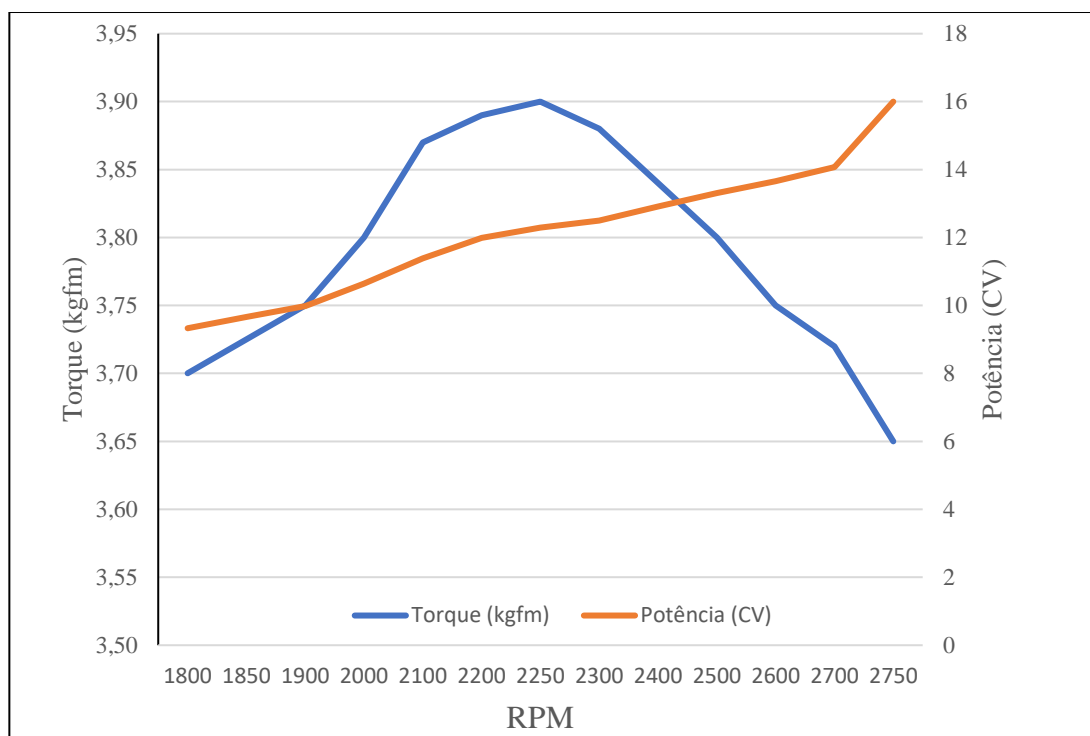
Figura 10 - Trator Agrale 4100



Fonte: A autora (2022).

Na Figura 11, estão descritas as curvas de torque e potência do motor à combustão empregado no trator.

Figura 11 – Curvas de Torque e Potência Motor M-90



Fonte: Adaptado de Agrale S/A (2023).

Na Tabela 5, são descritos os dados de relação da transmissão e a velocidade obtida dentro da rotação de 2750 rpm do MCI.

Tabela 5 - Relação da Transmissão

Relação da Transmissão	Velocidade Km/h
1 ^a	1,60
2 ^a	3,60
3 ^a	6,93
4 ^a	13,60
1 ^a ré	1,76
2 ^a ré	3,95
3 ^a ré	7,62

Fonte: Adaptado do Manual do Proprietário (1984).

3.2 DADOS DO MOTOR ELÉTRICO

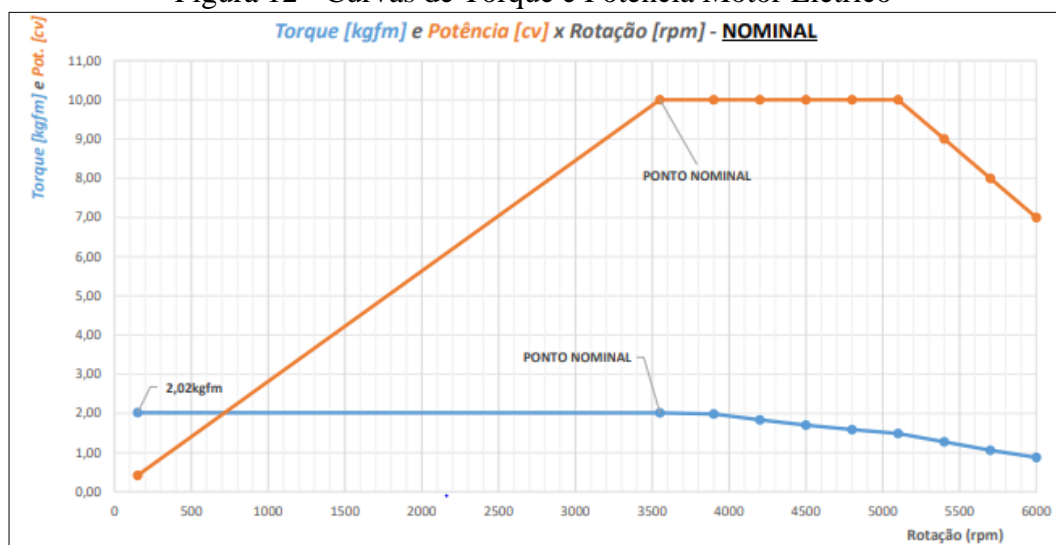
Para substituição do MCI, um ME foi projetado pela equipe de engenharia da Mercosul Motores Elétricos. Na Tabela 6 estão descritos os dados do motor fabricado e destinado para o projeto de eletrificação e na Figura 12, estão descritas as curvas de torque e potência dele.

Tabela 6 - Dados Técnicos do ME

Especificações Teóricas	
Fabricante	Mercosul IND de Motores S/A
Potência	10 CV à 3550 rpm
Nº polos	4
Carcça	L112M
Forma construtiva	D35D
Tensão	48 V
Frequência	120 Hz
Rotação nominal	3350 rpm
Blindagem	TFVE (IC411)
Grau de proteção	IPW55
Fator de serviço	1
Tipo de Gaiola	Esquilo
Método de partida	Inversor
Elevação de temperatura	80 °C
Classe de isolamento	H
Corrente a vazio	37,60 A
Corrente Nominal	120,00 A
Corrente Bloqueado	1080,00 A
Conjugado Nominal	2,02 daN.m à 3550 rpm
Nível de ruído	67 dB
Rendimento	90%
Fator de potência (cos ϕ)	0,82
Peso total	48 kg

Fonte: Adaptado da ficha do motor (2022).

Figura 12 - Curvas de Torque e Potência Motor Elétrico



Fonte: Mercosul Motores Elétricos (2023).

Para o conjunto de eletrificação também foram utilizados mais componentes entre eles: controlador A/C da marca Curtis, um contator simples com suporte, uma chave de emergência, um marcador e horímetro para bateria, um pedal de acelerador, um encoder modelo B58N100DFBAS7 da Dynapar e um conjunto de quatro baterias chumbo-ácidas de 12 V e 240 Ah, ligadas em série. Para acoplamento do ME com a caixa de transmissão foi projetada um flange considerando o eixo do ME e a saída da transmissão. Para recarga das baterias, também chamada de banco de baterias, utiliza-se um carregador modelo BAT1000 de 48 V, potência de 1000 W, corrente de saída máxima de 20 A e rendimento de 92%.

Na Figura 13, pode-se verificar a montagem em bancada do conjunto, já na Figura 14 pode-se ver o conjunto montado no trator.

Figura 13 - Conjunto de Eletrificação em Bancada



Fonte: A autora (2022).

Figura 14 - Trator com ME



Fonte: A autora (2023).

3.3 DESCRIÇÃO DOS TESTES EXPERIMENTAIS

Para comparação dos dados da motorização original e a nova motorização, foram realizados testes experimentais. Para análise da autonomia foi realizado um teste de consumo e um teste de ruído embasado na norma NBR 15145.

3.3.1 Medição do consumo de combustível-energia

O teste de autonomia compreende um trajeto de cerca de um quilometro de extensão (Figura 15). Esse trajeto teve três momentos de reabastecimento do tanque de combustível, utilizando como parâmetro o número de cinco voltas realizadas. Para início do teste o tanque de combustível foi abastecido totalmente e a cada parada, a quantidade de combustível consumido foi reabastecido com o auxílio de uma proveta graduada, para mensurar o consumo de combustível pelo total de quilômetros percorridos.

O trator equipado com a motorização elétrica teve a repetição do mesmo percurso, onde foram realizadas a medição da tensão e corrente no banco de baterias. Porém, foi necessário adicionar o teste de autonomia total, para poder estimar o consumo de energia elétrica. Nesse teste, o trator fez o percurso apresentado até a carga de seu banco de baterias esgotar, sendo medidos o tempo e distância percorrida em uma velocidade média constante.

Figura 15 – Trajeto do teste de autonomia



Fonte: Google Earth (2023).

3.3.2 Medição de ruído

O teste de ruído de passagem foi realizado dentro do ambiente fabril em que o trator está alocado, em uma área aberta contemplando os pré-requisitos da norma NBR 15145 para os dois tipos de motores. Foram realizadas quatro medições, com o trator em segunda marcha e velocidade constante. A média obtida será comparada para os dois casos. Além disso, uma medição nas proximidades do ouvido do operador foi realizada para os dois motores.

3.4 CÁLCULOS COMPARATIVOS

Quando se fala de conversão de veículos, alguns dados precisam ser considerados. Em uma conversão veicular o combustível pode ser alterado sem alterações na motorização, como é o caso de utilização de gás natural, em outros casos, como o trazido neste trabalho, é necessária a troca de motorização. Para análise do motor empregado pela empresa na conversão do trator, um gráfico é apresentado para comparação de desempenho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são descritos e detalhados os resultados obtidos pelos testes e cálculos realizados conforme proposta do capítulo anterior.

4.1 MEDIÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL-ENERGIA

O primeiro teste de consumo foi referente ao consumo de combustível diesel do trator com MCI. O trator percorreu um total de 15,6 quilômetros com 3 abastecimentos. Na Tabela 7, estão descritos os dados obtidos.

Tabela 7 - Abastecidas durante trajeto

Sequência	Distância percorrida	Consumo
1	5,2 km	0,409 l
2	5,1 km	0,435 l
3	5,3 km	0,398 l

Fonte: A autora (2023).

Na Tabela 8, estão descritas as distâncias percorridas no trajeto e os resultados. Para o trator com ME, não foi necessário realizar reabastecimentos, apenas foram medidas as tensões nas baterias e a corrente no sistema.

Tabela 8 - Medições durante o trajeto

Sequência	Distância percorrida	Consumo de tensão do banco de bateria
1	5 km	0,121 V
2	5,3 km	0,106 V
3	5,2 km	0,140 V

Fonte: A autora (2023).

Para que a comparação entre os tipos de motorização possa ser feita, é necessário que ambos os motores tenham seu consumo aferido. No caso no ME, e por tratar de um motor de indução industrial adaptado e sem consumo de periféricos, pode-se utilizar a Equação 16 para cálculo.

$$C = \frac{P \cdot 0,736}{Rend} \cdot 100\% \quad (16)$$

Sendo: C o consumo de motor em uma hora de operação [kWh/h];

P a potência fornecida pelo motor [cv];

$Rend$ o rendimento ou eficiência do motor em percentual.

Aplicando a Equação 16 com os dados fornecidos no item 3.2, obtém-se o valor de consumo por hora do motor de 8,18 kWh/h. Dessa maneira, multiplica-se o valor de consumo por hora do motor pelo tempo para realização do trajeto. Na tabela 9, estão apresentados o tempo de cada percurso e o consumo em quilowatt-hora.

Tabela 9 - Tempo e Consumo de Energia ME

Distância percorrida (km)	Tempo utilizado (h)	Consumo de energia (kWh)
5	0,61	4,965
5,3	0,58	4,750
5,2	0,57	4,646

Fonte: A autora (2023).

Contudo, o consumo de energia do ME não pode ser valorizado monetariamente, como o consumo do MCI. O parâmetro que deve ser considerado para valorização é o tempo de recarga do banco de baterias pois, é a energia que será reposta. Com isso, é necessário gerar o teste de autonomia total do banco de baterias, ou seja, é necessário realizar a carga total e controlar os parâmetros de distância total percorrida e tempo de trajeto em velocidade média constante. Posterior a este teste, é necessário medir o tempo de recarga do banco de baterias e utilizar a Equação 17, para calcular o consumo do carregador em kWh. Na Tabela 10, estão apresentados os dados obtidos.

$$E_{consumida} = P \cdot t \quad (17)$$

Onde: $E_{consumida}$ é a energia consumida em Wh;

P é a potência do carregador considerando sua eficiência em W;

t é o tempo de recarga, medido experimentalmente, em horas.

Tabela 10 - Consumo para recarga do banco de baterias

Distância total percorrida (km)	Tempo de percurso (h)	Tempo de recarga (h)	Consumo em kWh
52,8	5,68	12	11,04

Fonte: A autora (2023).

Com os dados apresentados é possível estimar o consumo de kWh/km, sendo este de 0,209. Enfim, após a apresentação dos dados é possível estipular o consumo para cada uma das motorizações nos percursos, podendo se comparar os valores monetários. Os valores monetários considerados foram o valor pago pelo litro de diesel comum em dezembro de 2022, R\$ 6,28, quando teste foi realizado e para a energia elétrica foi a taxa cobrada no caso de bandeira vigente em maio de 2023, R\$ 0,56, que também corresponde aos períodos de teste do ME. A Tabela 11 consolida esses resultados.

Tabela 11 - Resultados de consumo

	Diesel	Elétrico
Distância percorrida	15,6 km	15,5 km
Consumo total realizado	1,24 l	3,24 kWh
Consumo por km	0,079 l	0,209 kWh
Custo R\$/km	0,48	0,12
Valor R\$ total	7,78	1,78

Fonte: A autora (2023).

Com os resultados obtidos podemos verificar uma economia de 25% no custo de abastecimento do trator para a operação. Araújo (2013), também realizou em sua dissertação de mestrado um estudo de conversão de veículos, MCI diesel para ME, considerando todos os fatores de consumo periféricos, chegando a uma economia de 14% quanto ao custo em abastecimentos.

4.2 MEDIÇÃO DE RUÍDOS

Foi medido o ruído de passagem com requisitos próximos a NBR 15145, garantindo a distância de 7,5 m entre o decibelímetro e o trator, além de acompanhamento e orientação do engenheiro de segurança. Importante salientar que para todas as medidas tomadas foi levado em conta o conjunto trator e reboque (sem carga). Na Figura 16, podemos ver a área de passagem do trator, onde o aparelho foi posicionado.

Figura 16 - Área de medição de ruído de passagem



Fonte: A autora (2022).

Na Tabela 12, estão descritos os resultados obtidos em cada medida e as médias obtidas para cada motorização.

Tabela 12 - Ruído de passagem

Medição	Diesel	Elétrico	Unid med
1º	81,5	73,3	dB
2º	83,4	72,3	dB
3º	82,6	74,6	dB
4º	83,6	72,4	dB
Média	82,8	73,2	dB

Fonte: A autora (2023).

Além do ruído de passagem, também foi medido ruído gerado em marcha lenta, no caso do MCI próximo ao ouvido do operador. Já no caso do ME, os ruídos foram medidos em baixa velocidade, 2 km/h, pois ele não tem rotações sem acionamento do pedal de aceleração. Na Tabela 13, os resultados estão apresentados.

Tabela 13 - Ruído operador exposto

Motorização	Diesel	Elétrico	Unid med
Medição	95,1	73,2	dB

Fonte: A autora (2023).

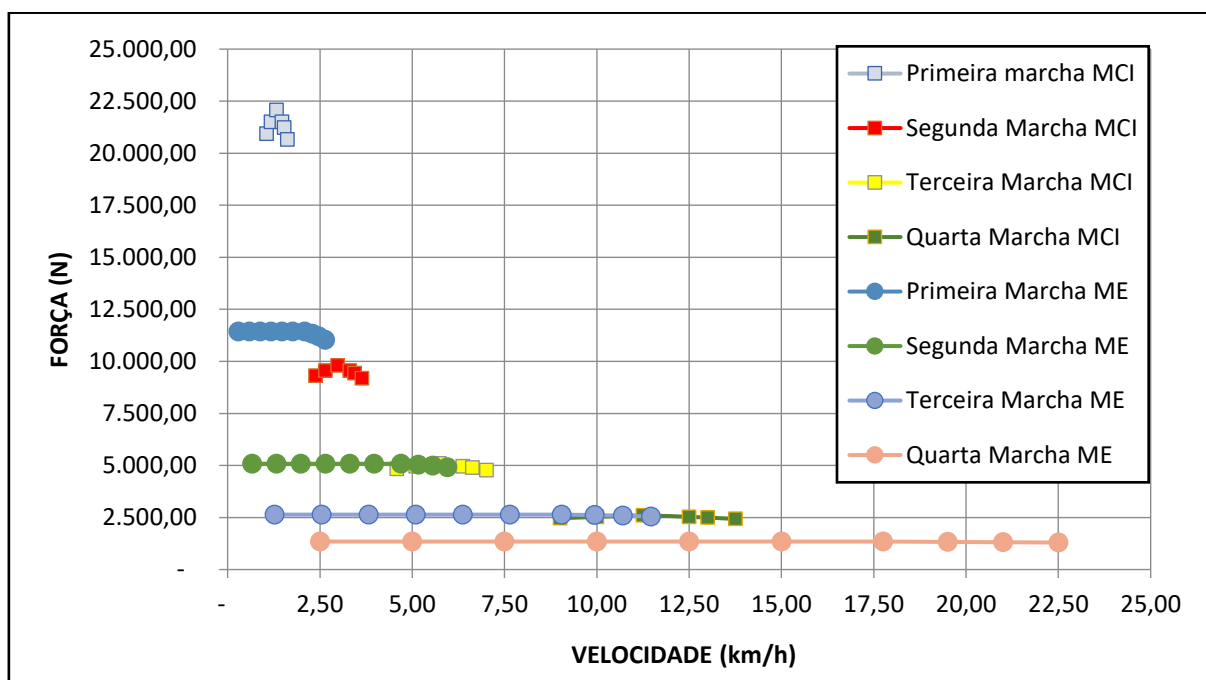
Com a apresentação dos dados pode-se notar uma redução nos ruídos de passagem de aproximadamente 12% e chegando a 23% no ouvido do operador. Esse resultado contribui para

eliminação do EPI (Equipamento de Proteção Individual) utilizado pelo operador. Conforme NR15, o colaborador pode ficar exposto ao máximo de 8 horas, a um ruído de 85 dB, como o trator possuía picos de 95,1 dB, era recomendado o uso de protetores auriculares que reduzem cerca de 17 dB. Com a nova motorização o trator não emite mais ruídos superiores ao proposto na NR15, garantindo a integridade do operador e reduzindo o custo da operação.

4.3 CÁLCULOS COMPARATIVOS DE PERFORMANCE

Com as equações descritas no tópico 2.4 desse trabalho e os dados apresentados no capítulo 3, foi possível desenvolver no Excel® o gráfico de desempenho do trator, considerando a velocidade e a força para cada uma das marchas aplicadas ao MCI e ao ME. A caixa de transmissão se manteve a mesma para ambas as motorizações, possibilitando uma comparação entre as curvas geradas em cada marcha. Na Figura 17, estão apresentados os resultados obtidos para as marchas à frente, não foram consideradas as marchas ré.

Figura 17 - Análise de Desempenho no Trator



Fonte: A autora (2023).

Pode-se verificar que as marchas mostram comportamentos diferentes para as motorizações, mas que também se equivalem nas situações de força de 2.500 a 5.000 N. Como o ME trabalha com um método de conversor com controlador de velocidade, o trocar das

marchas não se faz mais essencial, como no é caso do MCI, é possível adotar apenas uma marcha para que ocorra a locomoção do veículo.

Para adoção de uma marcha, são levados em consideração fatores como a velocidade máxima e a velocidade mínima durante a operação, gerando melhor aproveitamento do motor. Como o trator é utilizado para operações internas e externas podemos controlar sua velocidade utilizando duas marchas, no caso de operações internas, locomoção dentro do pavilhão fabril adota-se a terceira marcha, já em casos de uso externo ao pavilhão, onde a velocidade máxima é 20 km/h, usa-se da quarta marcha. A troca entre as marchas é feita com o veículo parado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil vindo sendo um dos pioneiros em apresentar métodos de energia alternativos, como o caso do etanol e do biodiesel para MCI, além de utilizar outras fontes de energia renovável no âmbito geral. No entanto, outro segmento de eletrificação para veículos vem ganhando espaço no mercado mundial. Os VE possuem um banco de baterias, que geram a energia para locomoção. E esses bancos de baterias são um dos principais motivos, que anteriormente os VE foram produzidos e descontinuados, pela sua baixa autonomia.

Este trabalho teve como objetivo realizar testes experimentais a fim de comparar os resultados obtidos nos casos de motores MCI e ME, além de avaliar o desempenho em cada um dos casos.

Com os resultados obtidos nos testes de ruído e consumo, pode-se observar resultados importantes para o ME. O ME proporcionou uma redução no custo de operacional do trator de 25% por km rodado em relação a versão com MCI. Além disso, foi constatado uma redução de 23% na do nível de ruído no ouvido do operador e com isso dispensando a necessidade de utilização de EPI durante a operação do trator. Porém, durante tempo de recarga o trator fica inutilizável, o que não gera impactos nas atividades produtivas desempenhadas pelo equipamento na empresa, mas, reduz sua ocupação.

Outro ponto que também pode ser melhorado é sua autonomia, que hoje corresponde a cerca de 50 km, ou 6 horas com velocidade máxima de 15 km/h, que não preenche um turno completo de operação.

A análise de desempenho do sistema de transmissão permitiu comparar a performance do trator com o ME e MCI. Observou-se que a marcha 3 ou 4 na versão do trator com ME são suficientes para a necessidade de uso operacional. Além disso houve um maior ganho na velocidade do trator o que diminui o tempo de deslocamentos diários na empresa.

Com intuito de melhorar o aproveitamento e uso do trator, sugere-se fazer uma nova análise de novas baterias, para gerar maior autonomia e métodos de frenagem regenerativa, para aumento da autonomia e redução do tempo de recarga.

REFERÊNCIAS

- ANP. **Levantamento de Preços de Combustíveis (últimas semanas pesquisadas)**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/levantamento-de-precos-de-combustiveis-ultimas-semanas-pesquisadas>. Acesso em: 08 maio 2023.
- ARAÚJO, Filipe Alexandre Simões de. **Conversão de Veículos Diesel para Tração Elétrica**. 2013. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/3902?locale=en>. Acesso em: 19 jun. 2023.
- BERTONI JUNIOR, Ivan Luiz. **Análise de desempenho e emissões de um motor ciclo diesel operando com fumigação de água e etanol super-hidratado**. 2020. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2020.
- BOSCH, Robert. **Manual de tecnologia automotiva**. São Paulo: Blucher, 2005. 1232 p.
- BRASIL, Governo Federal (org.). **NR 15 - Atividades e operações insalubres: anexo n.º 1**. Anexo N.º 1. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/ctpp/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-15-anexo-01.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2023.
- BRASIL, Zeus do. **Protetor auricular tipo fone 20db - 3M Pomp Muffler**. Disponível em: https://lojazeusdobrasil.com.br/produtos/detalhes/protetor-auricular-tipo-fone-20db-3m-pomp-muffler/?gclid=CjwKCAjw3POhBhBQEiwAqTCuBih2mkdUKBVd2UJ8eNNpn-PnYGDdrR7HJ-Tlxt0TRwdZ4_JFhvkVQiBoCO4gQAvD_BwE. Acesso em: 17 abr. 2023.
- BRASIL, Zeus do. **Protetor auricular em silicone farmacêutico**. Disponível em: https://lojazeusdobrasil.com.br/produtos/detalhes/protetor-auricular-em-silicone-farmacutico/?gclid=CjwKCAjw3POhBhBQEiwAqTCuBrc0C5fBFgoO5aycxYeWT3JJ0Or5b5xHBqzhuUgUg6tYiW_w2437UxoCsHYQAvD_BwE. Acesso em: 17 abr. 2023.
- BRITO JUNIOR, Silvio Xavier de. **Metodologia para projeto de veículo elétrico**. 2017. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2017.
- BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2018. 554 p. Vol 1.
- BRUSQUE, Rafael. **Wärtsilä 14RT-flex96C – O maior motor a diesel do mundo tem quase 110 mil cavalos de potência**. Disponível em: <https://blogdocaminhoneiro.com/2021/06/wartsila-14rt-flex96c-o-maior-motor-a-diesel-do-mundo-tem-quase-110-mil-cavalos-de-potencia/>. Acesso em: 25 out. 2022.
- CASTRO, Fábio Daniel de; RAHDE, Sérgio Barbosa. **Motores automotivos: evolução, manutenção e tendência**. Porto Alegre: Edipucrs, 2014. 310 p. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/52892/epub/0?code=tWF/7DN55KK+BN+exp0+ZVh6g8wep4cXUW3biYhn9tlh4pFdr4HoVYCEBriLcxOypQ6SY+LPykJ0X1QL0tQRLg==>. Acesso em: 25 out. 2022.
- CAVALCANTE JÚNIOR, Luiz Claudio Paulino. **Análise comparativa da substituição de motores a combustão por motores elétricos no setor de transportes**. 2021. 14 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2021.

ENERGIA, Cpfl. **Taxas e Tarifas**. Disponível em: <https://servicosonline.cpfl.com.br/agencia-webapp/#/taxas-tarifas>. Acesso em: 6 jun. 2023.

ENERGÉTICA, Empresa de Pesquisa. **O que são combustíveis?** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/o-que-sao-combustiveis>. Acesso em: 05 nov. 2022.

FILIPPO FILHO, Guilherme. **Motor de Indução**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2013.

GIACOSA, D. **Motori Endotermici**. 15. ed. Milano: Hoelpi, 2000.

GALANTE, Raphael. **O futuro do carro é elétrico**: parte 3: na europa, ele já é o presente. Parte 3: na Europa, ele já é o presente. 2021. Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/colunistas/o-mundo-sobre-muitas-rodas/o-futuro-do-carro-e-eletrico-parte-3-na-europa-ele-ja-e-o-presente/>. Acesso em: 08 ago. 2022.

GILLESPIE, T.D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Ed. Society of Automotive Engineers, Inc. – Warrendale PA, 1992.

HEYMANN, Gisela. **O motor elétrico**. 1988. Disponível em: <https://super.abril.com.br/ciencia/o-motor-eletrico/>. Acesso em: 08 nov. 2022.

IBGE. **Censo Agro 2017**. 2017. Disponível em: <https://censoagro2017.ibge.gov.br/2012-agencia-de-noticias/noticias/25791-com-aumento-da-mecanizacao-agropecuaria-perde-1-5-milhao-de-trabalhadores.html>. Acesso em: 10 ago. 2022.

IBGE. **Censo Agropecuário**. 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/21814-2017-censo-agropecuario.html?=&t=destaques>. Acesso em: 20 ago. 2022.

IFSUL. **Consumo de energia de motor elétrico**. Disponível em: <http://static.sapucaia.ifsul.edu.br/professores/bsantini/Supervis%C3%A3o/Anexos/anexo%20xi%20>

LEIVAS, Alberto Puga. **Curso de Conversão de Veículos para Tração Elétrica (Eletrificação Veicular)**: desempenho e consumo. São Paulo: Tesla Brasil, 2022. 111 slides, color.

MACMILLAN, R. H.. **The Mechanics of Tractor - Implement Performance**. Melbourne: Senior Academic Associate, Agricultural Engineering International Development Technologies Centre University Of Melbourne, 2002.

PETRUZELLA, Frank D. **Motores Elétricos e Acionamentos**. São Paulo: Amgh Editora Ltda, 2013. 366 p.

QUEIROZ, Caio Dimitri Vieira; MELO, Elaine Cristina de; CALABREZ, Felipe Henrique. **Revisão dos Sistemas de Transmissão Automotiva**. 2015. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Eletrônica Automotiva, Fatec Santo André, Santo André, 2015. Disponível em: <http://fatecsantoandre.edu.br/arquivos/TCC326.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2022.

ROEDEL, Ricardo Lazera; TAVARES, Ronaldo da Silva. **Modelo dinâmico de um motor monocilindro de combustão interna**. 2018. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018. Disponível em: https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/7034/TCC_Ricardo_Ronaldo_Sem_Assinatura.pdf?sequenc e=1&isAllowed=y. Acesso em: 30 ago. 2022.

SANTOS FILHO, Abílio Garcia dos; SANTOS, João Eduardo Guarnetti Garcia dos. **Apostila de máquinas agrícolas**. 2001. Disponível em:

http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Literatura/maqagri_unesp.pdf. Acesso em: 22 nov. 2022.

SANTOS, Suelen Cristina dos; STÉFANI, Lucas Bottino Vizzotto; GOMES, Robson Jorge das Neves; BAZANI, Márcio Antônio. **Análise do movimento de um motor monocilíndrico**. 2007. Disponível em: <https://abcm.org.br/anais/creem/2007/PDF/0056.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2022.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (SENAI). **Automobilística**: sistemas de transmissão. Apostilado – Curso Técnico. São Paulo: SENAI-SP, 2003.

SHIGLEY, Joseph E., et.all., “Projeto de Engenharia Mecânica”. Editora Bookman. 7ª edição. 2005.

SILVA, Rodrigo Peixoto da; BARICELO, Luis Gustavo; VIAN, Carlos Eduardo de Freitas. Estoque brasileiro de tratores agrícolas: evolução e estimativas de 1960 a 2016. **Revista de Economia Agrícola**, São Paulo, v. 2, n. 62, p. 21-35, 04 abr. 2017. Semestral.

SIMÊNCIO, Éder Cícero Adão. **Motores de Combustão Interna**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional, 2019. Disponível em: http://cm-cls-content.s3.amazonaws.com/201901/INTERATIVAS_2_0/MOTORES_DE_COMBUSTAO_INTERNA/U1/LIVRO_UNICO.pdf. Acesso em: 24 ago. 2022.