

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**BRUNO PEDRA MARAVILHA SALES
GUSTAVO DE ARAUJO KOTELAK
LUCIANO CATTO NETO**

**EFICIÊNCIA EM MÁQUINAS ELÉTRICAS: UMA ANÁLISE
SOBRE A EFICIÊNCIA DOS MOTORES DE CORRENTE
CONTÍNUA**

CURITIBA

2022

**BRUNO PEDRA MARAVILHA SALES
GUSTAVO DE ARAUJO KOTELAK
LUCIANO CATTO NETO**

**EFICIÊNCIA EM MÁQUINAS ELÉTRICAS: UMA ANÁLISE
SOBRE A EFICIÊNCIA DOS MOTORES DE CORRENTE
CONTÍNUA**

**Efficiency in electrical machines: an analysis of the efficiency of
direct current motors**

Trabalho de conclusão de curso de graduação,
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de
Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Me Márcio Aparecido Batista

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

BRUNO PEDRA MARAVILHA SALES

GUSTAVO DE ARAUJO KOTELAK

LUCIANO CATTO NETO

**EFICIÊNCIA EM MÁQUINAS ELÉTRICAS: UMA ANÁLISE
SOBRE A EFICIÊNCIA DOS MOTORES DE CORRENTE
CONTÍNUA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação,
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de
Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 18 de novembro de 2022

Márcio Aparecido Batista
Mestre em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo Barcik
Mestre em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ubirajara Zoccoli
Mestre em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2022

Bruno: Dedico este trabalho a meus pais que compartilharam comigo este sonho e que, por sua formação, me ensinaram a valorizar a vida acadêmica e meus professores. Dedico a minha família e amigos por entenderem meus momentos de ausência e me apoiarem em momentos difíceis. Por último à Deus por ter me capacitado e sem Ele não seria possível.

Gustavo: Dedico aos meus pais, João e Silvy, que batalharam e possibilitaram que eu tivesse um amplo acesso à educação. Dedico também a todos os professores que serviram de seu tempo para aprimorar meu conhecimento. Por fim, dedico a todos amigos e colegas que estiveram presentes nesta caminhada e prestaram o apoio necessário nos momentos mais difíceis.

Luciano: Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais, Tânia e Roberto, à minha namorada, Tayane. Dedico também a todos os professores que desde minha alfabetização até hoje contribuíram para minha formação. Por fim, dedico a todos amigos e colegas que estiveram presentes nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos todos os professores que fizeram parte dessa nossa jornada, compartilhando parte de seu conhecimento conosco.

Agradecemos em especial o Professor Me. Márcio, que aceitou fazer parte deste trabalho como nosso orientador e nos auxiliou em todos os momentos e dificuldades, resultando no sucesso do nosso trabalho final.

Por fim, agradecemos à empresa Doga do Brasil, que nos propôs o problema a ser resolvido neste trabalho e nos auxiliaram cedendo materiais e informações para que fosse possível a execução deste estudo.

RESUMO

A melhoria da eficiência e confiabilidade de seus produtos é algo buscado de maneira contínua por todas as empresas que querem crescer e ampliar seus mercados, a fim de obter uma redução de custos e melhor posição de mercado perante os seus concorrentes. Partindo dessa iniciativa e alguns problemas observados em seus produtos, a empresa Doga do Brasil cedeu dois de seus motores de corrente contínua utilizados principalmente em máquinas agrícolas para estudos e sugestões de aumento na eficiência e confiabilidade, uma vez que foi observada uma taxa de falhas maior no Brasil, do que na Europa, onde o motor é produzido e testado. Neste estudo, foi escolhido testar o motor em diferentes situações, alterando seus componentes elétricos, situações de ventilação e proteção contra objetos estranhos ao motor, e confrontar os resultados. O objetivo é buscar a redução da temperatura de operação do motor, uma vez que foi citado pela Doga do Brasil como a principal causa dos problemas apresentados pelo motor no Brasil. Por meio dos testes realizados, foram encontradas algumas soluções das quais podem ser consideradas satisfatórias para este estudo, como por exemplo a inserção de ventilação forçada. O motor em condições sem ventilação ultrapassou os 69 °C, enquanto com ventilação forçada foi capaz de ficar abaixo de 40 °C. Também foi realizada a substituição de componentes internos, mas não resultou em diminuição da temperatura.

Palavras-chave: motor; confiabilidade; temperatura; ventilação

ABSTRACT

Improving the efficiency and reliability of their products is something continuously sought by all companies that want to grow and expand their markets, in order to obtain cost reductions and a better market position vis-à-vis their competitors. Based on this initiative and some problems observed in its products, the company Doga do Brasil ceded two of its direct current motors used mainly in agricultural machines for studies and suggestions for increasing efficiency and reliability, since a higher failure rate was observed in Brazil than in Europe, where the engine is produced and tested. In this study, it was chosen to test the engine in different situations, changing its electrical components, ventilation situations and protection against foreign objects to the engine, and compare the results. The aim is to seek to reduce the engine's operating temperature, since it was mentioned by Doga do Brasil as the main cause of the problems presented by the engine in Brazil. Through the tests carried out, some solutions were found which can be considered satisfactory for this study, such as the insertion of forced ventilation. The engine in conditions without ventilation exceeded 69 °C, while with forced ventilation it was able to stay below 40 °C. Internal components were also replaced, but did not result in a decrease in temperature.

Keywords: motor; reliability; temperature; ventilation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do motor cc.....	15
Figura 2 - Partes de um motor de corrente contínua.....	19
Figura 3 - Modelo de motor de ímãs permanentes.....	20
Figura 4 - Representação esquemática de uma máquina de corrente contínua.....	21
Figura 5 - Diferença entra motor com escovas (esquerda) e sem escovas (direita) .	22
Figura 6 - Diagrama simplificado de um motor de corrente contínua.....	23
Figura 7 - Rotor do motor elétrico.....	24
Figura 8 - Perfil do motor elétrico.....	25
Figura 9 - Forma de onda da corrente em uma bobina linear com comutação linear	26
Figura 10 - Exemplificação da alteração do plano neutro.....	27
Figura 11 - Enrolamento da Máquina de corrente contínua com Interpolos.....	28
Figura 12 - O fluxo e as forças magnetomotrizes em uma máquina de corrente contínua com enrolamentos de compensação.....	29
Figura 13 - O estator de uma máquina de corrente contínua de seis polos com interpolos e enrolamentos de compensação. (Cortesia de Westinghouse Electric Company).....	30
Figura 14 - Laço de histerese traçado a partir do fluxo em um núcleo.....	32
Figura 15 - Diagrama de fluxo de potência de Motor de corrente contínua.....	35
Figura 16 - Informações que podem ser obtidas através do selo PROCEL.....	38
Figura 17 - Esquemática do Motor Type 319.....	41
Figura 18 - Diagrama ensaio a vazio.....	42
Figura 19 - Montagem para ensaio do motor de corrente contínua.....	42
Na imagem 20, pode-se então observar uma engrenagem plástica. Esta engrenagem, conectada ao eixo final de todo o sistema é onde é feita a redução de velocidade na proporção fornecida pelo fabricante através do manual, no qual é de 1:39.	
Figura 20 - Sistema redutor do conjunto eletromecânico.....	45
Figura 21 - Detalhe do redutor e do conector elétrico.....	46
Figura 22 - Rotor do motor de corrente contínua.....	46
Figura 23 - Detalhamento dos ímãs permanentes.....	47
Figura 24 - Termômetro Penta III Gauge.....	49
Figura 25 - Diagrama do ensaio de temperatura.....	49
Figura 26 - Gráfico de temperatura x tempo com o motor exposto.....	51

Figura 27 - Motor dentro do tubo com ventilação forçada.	52
Figura 28 - <i>Cooler</i> utilizado no ensaio.	53
Figura 29 - Gráfico de temperatura com o motor parcialmente confinado.	55
Figura 30 - Gráfico comparativo entre os ensaios.	55
Figura 31 - Imagem da cápsula de proteção do motor em campo.	56
Figura 32 - Ensaio realizado com o motor totalmente confinado.	57
Figura 33 - Gráfico de temperatura em ambiente totalmente confinado e sem ventilação.	58
Figura 34 - Ensaio com o motor totalmente confinado e ventilação forçada.	60
Figura 35 - Gráfico comparativo entre os ensaios.	61
Figura 36 - Jogo de escovas Bosch.	62
Figura 37 - Gráfico comparativo entre os ensaios.	64
Figura 38 - Gráfico comparativo de Tensão x Corrente entre o motor original e motor com escovas Bosch.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros medidos no motor.....	43
Tabela 2 - Parâmetros medidos no motor e parâmetros calculados do motor original.....	44
Tabela 3 - Medição de temperatura no motor original.....	50
Tabela 4 - Medição de temperatura no motor parcialmente confinado com ventilação forçada.....	54
Tabela 5 - Medição de temperatura no motor totalmente confinado sem ventilação forçada.....	57
Tabela 6 - Medição de temperatura no motor totalmente confinado com ventilação forçada.....	60
Tabela 7 - Medição de temperatura no motor com escovas Bosch.....	63
Tabela 8 - Ensaio a vazio com escovas Bosch.....	65

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FIRJAN	Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
CEPEA	Centro de Estudos Avanados em Economia Aplicada
FMM	Fora Magnetomotriz
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por largura de pulso)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Tema	13
1.1.1 Delimitação Do Tema	14
1.2 Problemas E Premissas	15
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivo Geral	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 Justificativa	16
1.5 Metodologia Da Pesquisa	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Motor Elétrico de Corrente Contínua	19
2.1.1 Princípio de funcionamento de um motor de corrente contínua	19
2.1.2 Aspectos construtivos	22
2.1.3 Comutação	25
<u>2.1.3.1 Problemas associados à comutação</u>	26
2.1.4 Perdas nas máquinas de corrente contínua	30
<u>2.1.4.1 Perdas no cobre</u>	31
<u>2.1.4.2 Perdas nas escovas</u>	31
<u>2.1.4.3 Perdas no núcleo</u>	32
<u>2.1.4.4 Perdas por correntes parasitas</u>	33
<u>2.1.4.5 Perdas mecânicas</u>	33
<u>2.1.4.6 Perdas suplementares</u>	33
<u>2.1.4.7 Fluxo De Potência</u>	34
2.1.5 Classificação dos motores de corrente contínua	35
2.2 Eficiência Energética	37
2.2.1 Eficiência Energética	37
3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	40
3.1 Ensaio a vazio	41
3.1.1 Metodologia	41
3.1.3 Análise dos resultados	44
3.2 Abertura do conjunto	45
3.3 Ensaios de temperatura em ambiente aberto	48
3.3.1 Metodologia dos ensaios de temperatura	48
3.3.2 Resultados do ensaio de temperatura	50

3.3.3 Análise dos resultados do ensaio de temperatura.....	51
3.4 Ensaio de temperatura em ambiente parcialmente confinado com ventilação forçada	52
3.4.1 Metodologia do ensaio de temperatura em ambiente parcialmente confinado com ventilação forçada	53
3.4.2 Resultados do ensaio de temperatura em ambiente parcialmente confinado ..	54
3.4.3 Análise dos resultados do ensaio de temperatura em ambiente parcialmente confinado.....	55
3.5 Ensaio de temperatura em ambiente totalmente confinado	56
3.5.1 Metodologia do ensaio de temperatura em ambiente totalmente confinado	56
3.5.2 Resultados do ensaio de temperatura em ambiente totalmente confinado	57
3.5.2 Resultados do ensaio de temperatura em ambiente totalmente confinado	58
3.6 Ensaio de temperatura em ambiente totalmente confinado com ventilação forçada	59
3.6.1 Metodologia do ensaio de temperatura em ambiente totalmente confinado com ventilação forçada	59
3.6.2 Resultados do ensaio de temperatura em ambiente totalmente confinado com ventilação forçada	60
3.6.3 Análise dos resultados do ensaio de temperatura em ambiente totalmente confinado com ventilação forçada	61
3.7 Ensaio de temperatura com substituição de escovas de contato.	62
3.7.1 Metodologia do ensaio de temperatura com substituição de escovas de contato.	62
3.7.2 Resultados do ensaio de temperatura com substituição de escovas de contato.	63
3.7.3 Análise dos resultados do ensaio de temperatura com substituição de escovas de contato.....	64
3.8 Ensaio a vazio com substituição de escovas de contato.	64
3.8.1 Metodologia do ensaio a vazio com substituição de escovas de contato.	64
3.8.2 Resultados do ensaio a vazio com substituição de escovas de contato.	65
3.8.3 Análise dos resultados do ensaio a vazio com substituição de escovas de contato.	65
4. CONCLUSÃO	67
REFERÊNCIAS.....	69

1. INTRODUÇÃO

1.1 Tema

Desde que a eletricidade começou a ser amplamente utilizada no cotidiano, os estudos relacionados à eficiência energética passaram a ser mais comuns e mais importantes. Uma das mais importantes áreas de estudos está relacionada às máquinas elétricas, grupo no qual estão inseridos os motores elétricos.

A humanidade sempre buscou uma maneira de facilitar seu trabalho, seja com sua força manual ou animal. No século XVII a força animal foi substituída por máquinas a vapor para que trabalhos dispendiosos fossem executados. Com o advento da eletricidade, no século XVIII, as máquinas à vapor puderam ser substituídas por motores elétricos.

No início do século XX as máquinas elétricas foram utilizadas principalmente na indústria e posteriormente inseridas no cotidiano da sociedade (MUSEU WEG,2018). Atualmente é muito difícil imaginar a rotina humana sem utilizar motores elétricos, pode-se encontrar facilmente em portões eletrônicos, carros, elevadores, eletrodomésticos dentre outras funções residenciais e nas indústrias.

Mas se hoje pode-se ter um motor elétrico até mesmo dentro de aparelhos celulares, isso só é possível graças à evolução tecnológica. Os primeiros motores elétricos possuíam baixíssima eficiência, o que resulta em baixa potência e muito consumo de energia. (MUSEU WEG,2017).

Apesar dos primeiros carros feitos pelo homem serem elétricos, eles possuíam baixa eficiência, fazendo com que essa tecnologia fosse abandonada e substituída por motores à combustão. Hoje os carros híbridos (combustão e eletricidade) e elétricos são realidade, presente e em constante crescimento nas vendas. Alguns poucos anos atrás, era inimaginável que um carro elétrico pudesse carregar sua bateria em poucos minutos e possuir uma autonomia de mais de 400 km. Isso é possível graças a alguns fatores, como a melhoria tecnológica das baterias e o aumento da eficiência dos motores.

Essas melhorias não buscam apenas diminuir custos, mas também diminuir os impactos ambientais, ocorridos na produção de tais componentes. Com uma maior conscientização sobre uso racional de energia, seria inviável à sociedade apenas

diminuir a utilização dos equipamentos sem alterar a eficiência deles.

Um desses exemplos está nos programas, que buscam incentivar financeiramente, por meio de descontos, a troca de eletrodomésticos, refrigeradores, ar-condicionado, lavadeiras, entre outros operados com motores elétricos antigos por equipamentos novos e mais eficientes, como por exemplo o RE+ da Samsung, ou o programa chamado “troca inteligente” das distribuidoras de energia elétrica da empresa Equatorial.

Os motores de corrente contínua, são amplamente utilizados em diversas aplicações e podem ser encontrados desde pequenas dimensões, potências fracionárias, como por exemplo um motor de disco de Hard Disk até centenas de potências, como por exemplo um motor de rodado de locomotiva.

Uma dessas aplicações, está no setor agrícola, um setor em constante expansão no Brasil. Com a crescente modernização dos equipamentos no campo, o uso de motores de corrente contínua também se faz necessário e muito presente na agricultura. Um exemplo são as máquinas semeadoras, responsáveis por controlar a deposição de sementes no solo, com base na densidade de sementes por área. Tais máquinas utilizam motores de corrente contínua para que seja dispensada a semente no momento e posição correta, caso o motor venha a falhar, um grande desperdício de matéria prima e dinheiro ocorrerá.

1.1.1 Delimitação Do Tema

As máquinas elétricas estão profundamente inseridas na rotina das pessoas, é praticamente impossível afirmar que qualquer objeto que o ser humano toca, faz uso, ou influencia o seu cotidiano não foi impactado pelo trabalho de uma máquina elétrica. Essas máquinas com o passar do tempo, acabam por realizar um trabalho menos eficiente do que quando eram novas, seja pela ação do tempo, desgaste de componentes, ou novas tecnologias, que fazem a eficiência que poderia ser considerada excelente anos atrás, o que está ultrapassado.

Esse trabalho visa esclarecer a importância de monitorar a eficiência de suas máquinas, trabalhando sempre na melhoria contínua de seus processos.

Em alguns processos, os motores de corrente contínua são amplamente utilizados na indústria, como em elevadores, prensas, extrusoras, movimento e elevação de cargas. Os motores de corrente contínua também estão presentes no

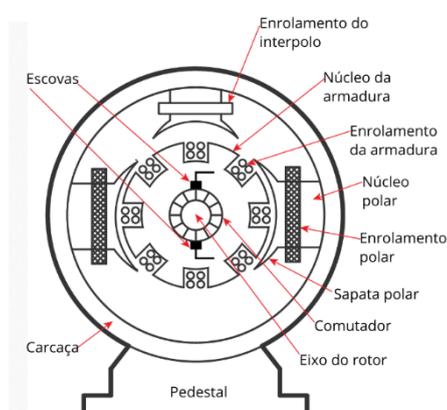
cotidiano do cidadão comum, como em impressoras, podem ser encontrados também em carros, principalmente em vidros elétricos, limpadores de para-brisa, bombas de combustível, retrovisores etc.

Apesar das desvantagens, sendo uma delas a menor eficiência energética que um motor de corrente contínua possui perante o motor ca, o motor de corrente contínua ainda possui muitas aplicações tecnológicas, portanto é importante a busca de soluções que visem o aumento de sua eficiência energética, objetivo desse estudo.

1.2 Problemas E Premissas

Os motores de corrente contínua, em geral, já possuem suas estruturas bem definidas como pode ser visto na Figura 1:

Figura 1 - Estrutura do motor cc



Fonte: Adaptado de AMAZON. Disponível em:

<http://s3.amazonaws.com/magoo/ABAAABdDAAL-2.jpg> Acesso em 12 de maio de 2021.

O rendimento geral dos motores elétricos pode ser definido pela energia mecânica útil exercida pelo eixo do motor. Nos motores de corrente contínua, as perdas estão concentradas nos processos de excitação, perdas por Efeito Joule no processo de indução nas sapatas polares, perdas no ferro, além de perdas mecânicas (em geral nas escovas) localizadas no eixo do rotor. (SANTANA, 2021)

Um grande problema no rendimento dos motores, está na troca de calor com o ambiente. Um exemplo disso está em um motor projetado para trabalhar em semeadoras. Quando projetado, era estimado que estes motores iriam operar em condições adversas, com a presença de terra, água e calor, porém, o clima tropical brasileiro é desafiador para a operação destes motores, potencializando tais

condições adversas, que muitas vezes não são projetadas em laboratórios, principalmente em motores importados. Em determinadas regiões de plantio, devido às altas temperaturas, os motores têm apresentado uma queda no rendimento. Esta queda de rendimento está atrelada a dificuldade na troca de calor com o ambiente. Um motor elétrico naturalmente esquenta e, quando somada a uma proteção contra água e terra, esta troca de calor possui uma menor eficiência, retendo o calor dentro do motor e conseqüentemente uma perda de eficiência.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho de conclusão de curso é analisar soluções de rendimento em motores de corrente contínua utilizados em aplicações agrícolas, fabricado pela empresa Doga do Brasil LTDA.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Levantar possibilidades de melhoria de eficiência energética e temperatura para o motor cedido pela empresa Doga.
- Analisar e comparar resultados obtidos.

1.4 Justificativa

A Eficiência Energética é algo muito discutido atualmente, pois o preço do R\$/MWh teve um crescimento nos últimos anos e o custo com energia elétrica é uma das principais despesas das empresas, independentemente de seu tamanho. Dessa forma, a busca por maneiras de mitigar esses custos pode ser extremamente benéfica não somente por questões econômicas, mas também pelo bem meio ambiente.

Segundo dados divulgados pela Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (Firjan), as despesas com energia elétrica podem representar mais de 40% dos gastos com a produção industrial no país (FIRJAN, 2017). Desta forma, estudos que buscam mitigar essa despesa é imprescindível para que a indústria possa aproveitar seus recursos para desenvolvimento de melhores produtos e tecnologia

mais competitiva no cenário mundial.

Neste mesmo sentido, o governo brasileiro também possui iniciativas que tem como foco o consumo de energia elétrica. O Procel, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, é um programa instituído em 1985 pelo governo federal para promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício. Desde então as ações do Procel foram responsáveis por aumentar a competitividade do país e reduzir as emissões de gases causadores do efeito estufa (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021).

Além dos custos inerentes ao maior consumo de energia elétrica, uma otimização dos recursos energéticos pode ser capaz de reduzir custos em manutenção de máquinas e impedir que a produção possa ser interrompida para ações corretivas, e também evitar investimentos desnecessários em novos equipamentos.

Na área agrícola, um setor com grande impacto no PIB brasileiro, representando 24,1% (CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada), os usos de motores de corrente contínua são largamente utilizados. Em visita à fabricante de motores Doga, foi apresentado um problema comum nos motores da empresa, em que os motores falham quando utilizados em regiões de alta temperatura, por exemplo a dos trópicos brasileiros, não operando corretamente e gerando um grande desperdício de insumos e dinheiro.

Tendo em vista todos estes pontos levantados, faz-se necessário estudos capazes de trazer melhorias para o setor industrial e agrícola, que tragam à discussão o conceito e importância da eficiência energética.

1.5 Metodologia Da Pesquisa

O primeiro passo para se iniciar o projeto é buscar referências bibliográficas capazes de auxiliar em toda a extensão do estudo. Seja para iniciar a pesquisa, compreender os resultados ou buscar melhorias.

Com base no conhecimento teórico, pode-se então iniciar o conhecimento prático, em que a observação experimental pode ser comprovada

A partir de todos os dados obtidos, é possível estudar as possíveis diferenças de resultados. Então pode-se analisar os pontos cruciais em que pode haver

melhorias.

Sabendo dos pontos que podem ser melhorados retoma-se às referências bibliográficas pesquisando soluções, aplicando os cálculos necessários.

Com base nos novos dados a serem obtidos, pode-se comparar antigos valores com os novos, se houve melhoria, o quanto melhorou, o que pode ser melhorado ainda mais e o que pode ser corrigido.

A importância dessas etapas é atrelar uma à outra de modo que se possa buscar resultados importantes para conhecer, entender e explorar novos horizontes dentro do projeto.

Ou seja, este projeto consiste em conhecer, analisar, compreender, propor e avaliar.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Motor Elétrico de Corrente Contínua

2.1.1 Princípio de funcionamento de um motor de corrente contínua

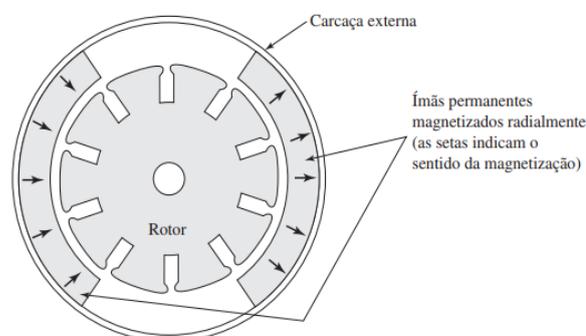
Um motor elétrico requer transformar o máximo de potência elétrica em potência mecânica. Por este motivo os motores utilizam do eletromagnetismo para converter uma energia na outra. Sendo assim composta por uma parte elétrica e uma parte mecânica.

O motor de corrente contínua é composto de duas estruturas magnéticas: estator ou carcaça externa (enrolamento de campo) e rotor (enrolamento de armadura).

O estator é composto de uma estrutura ferromagnética com polos salientes aos quais são enroladas as bobinas que formam o campo, ou de um ímã permanente. A Figura 2 mostra o desenho de um motor cc de 2 polos com enrolamento de campo.

O rotor é um eletroímã constituído de um núcleo de ferro com enrolamentos em sua superfície que são alimentados por um sistema mecânico de comutação (Figura 2). Esse sistema é formado por um comutador, solidário ao eixo do rotor, que possui uma superfície cilíndrica com diversas lâminas às quais são conectados os enrolamentos do rotor; e por escovas fixas, que exercem pressão sobre o comutador e que são ligadas aos terminais de alimentação. O propósito do comutador é o de inverter a corrente na fase de rotação apropriada de forma a que o conjugado desenvolvido seja sempre na mesma direção. (Siemens, Motores De Corrente Contínua, 2006, p. 3)

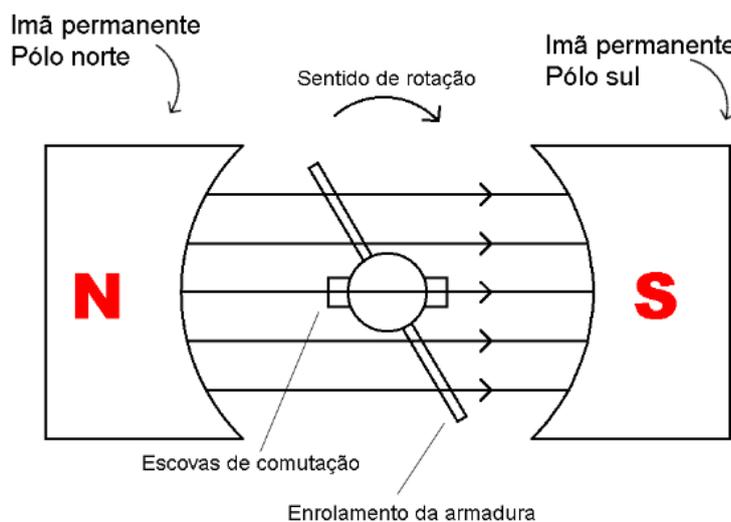
Figura 2 - Partes de um motor de corrente contínua



Fonte: UMANS, STEPHEN D. (2014, p.437)

Na Figura 3, está representado um motor de ímã permanente. Neste tipo de motor, pode-se notar a presença de um fluxo magnético, no sentido do polo norte ao polo sul. Este fluxo atravessa o enrolamento da armadura, existente no rotor.

Figura 3 - Modelo de motor de ímãs permanentes



Fonte: Os autores (2022).

Devido à baixa resistência do enrolamento de armadura, quando se aplica uma tensão nos seus terminais, observa-se uma elevada corrente passando pelo circuito. Esta corrente oferece torque o suficiente para a armadura girar. À medida que esse procedimento ocorre, os condutores de armadura cortam as linhas de força do campo, gerando um efeito de contratensão nos condutores. (HAND, 2014, p.30)

À medida que a armadura ganha velocidade, observa-se um aumento da contratensão que reduz cada vez mais a tensão de linha, reduzindo, portanto, a corrente de armadura. (HAND, 2014, p.30)

A tensão ca, gerada em cada bobina de armadura rotativa, é convertida em cc nos terminais externos da armadura por meio de um comutador rotativo e de escovas estacionárias, às quais os condutores da armadura estão conectados. A combinação de comutador e escovas forma um retificador mecânico, resultando em uma tensão cc de armadura e uma onda de FMM de armadura que está fixa no espaço. (UMANS, 2014, p. 404)

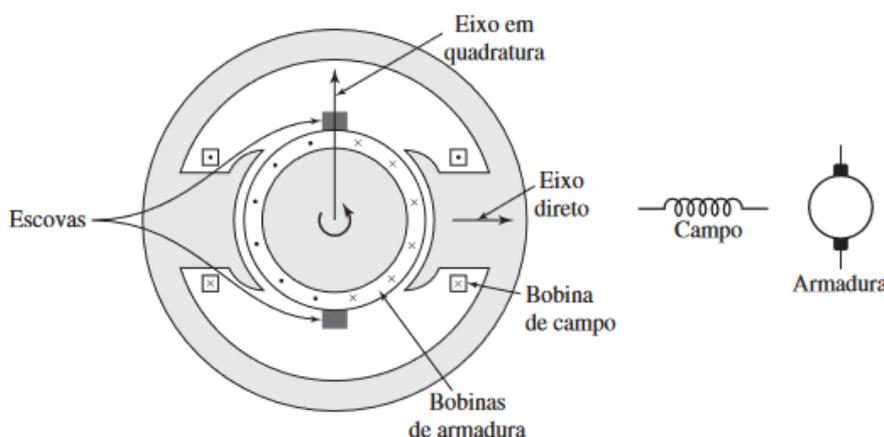
As escovas estão posicionadas de modo que a comutação ocorra quando os lados da bobina estão na zona neutra, a meio caminho entre os polos de campo. O eixo da onda de FMM de armadura estará então distanciado 90 graus elétricos do eixo dos polos de campo, isto é, no eixo em quadratura. A onda de FMM de armadura

estará então o longo do eixo das escovas. A posição geométrica das escovas em uma máquina real localiza-se a aproximadamente 90 graus elétricos da posição mostrada na Figura 4 devido à forma das conexões de terminação até o comutador.

O exemplo ilustrado na Figura 3, citado anteriormente, é de um motor conhecido como motor de ímãs permanentes, no qual a diferença para um motor real é a quantidade de enrolamentos de armadura, possuindo mais bobinas e assim aumentando sua eficiência.

Este tipo de motor então pode ser alterado, substituindo os ímãs permanentes por enrolamento, chamados de enrolamento de campo. Neste caso, o enrolamento de campo irá produzir o fluxo magnético através do rotor, mediante a circulação de corrente por este enrolamento de campo, como observado na Figura 4.

Figura 4 - Representação esquemática de uma máquina de corrente contínua

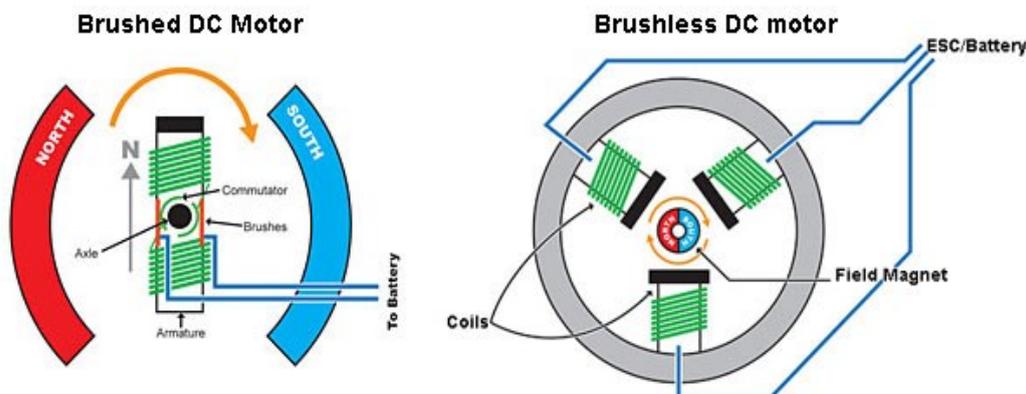


Fonte: MÁQUINAS ELÉTRICAS, UMANS (2014, p.404)

O controle de velocidade de um motor de corrente contínua pode ser controlado por meio da variação da sua tensão na armadura desde que se mantendo um fluxo constante, com excitação independente. Ainda, pode-se ainda manter uma alimentação constante e optar pela diminuição do fluxo, diminuindo a corrente de campo, uma vez que são proporcionais.

Há também motores de corrente contínua que eliminam os enrolamentos de armadura, substituindo por ímãs permanentes. Entretanto, ainda é necessário utilizar os enrolamentos de campo. Este tipo de motor, chamado de *brushless* ou motores sem escovas. O fato de eliminar as escovas de comutação, reduz as perdas no motor. Neste tipo de motor também é necessário utilizar sensores e um controlador eletrônico capaz de comutar os enrolamentos de campo.

Figura 5 - Diferença entra motor com escovas (esquerda) e sem escovas (direita)



Fonte: RC Tuning - Disponível em: <https://highvoltagegarc.wordpress.com/2013/05/22/rc-tuning-motores/>

Acesso em 19 de outubro de 2022.

As máquinas de corrente contínua são máquinas consideradas extremamente versáteis, com diferentes combinações diferentes de enrolamentos de campo, comutação, embricamento, excitações, entre outros. As máquinas também podem ter uma grande gama de tensões x corrente, ou velocidade x conjugado (UMANS, 2014, p. 403).

Devido à velocidade de rotação do motor de corrente contínua ser facilmente controlada, os motores de corrente contínua são amplamente utilizados em aplicações que dependem de uma grande variação de rotação do motor ou uma velocidade precisa de saída.

Nos últimos anos, a tecnologia de estado sólido que é utilizada nos sistemas de acionamento ca desenvolveu-se o suficiente para que esses sistemas estejam substituindo as máquinas de corrente contínua em aplicações antes associadas quase exclusivamente às máquinas de corrente contínua. Entretanto, a versatilidade das máquinas de corrente contínua, em combinação com a relativa simplicidade dos seus sistemas de acionamento, irá assegurar o seu uso continuado em uma ampla variedade de aplicações. (UMANS, 2014, p. 403)

2.1.2 Aspectos construtivos

Um motor se divide em duas partes principais: Estator e rotor.

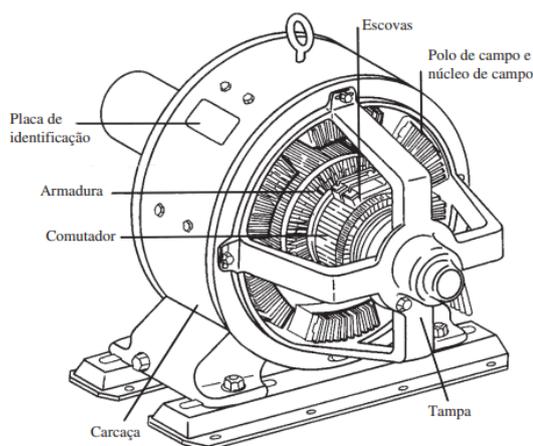
No estator está a carcaça da máquina onde estão localizados os ímãs permanentes ou os enrolamentos de campo, responsáveis pela geração do campo

magnético no interior do motor

No rotor encontra-se os enrolamentos de campo e comutador, além do eixo do motor onde deverá ser conectada a carga.

Na figura 6 é possível observar um diagrama simplificado do motor cc.

Figura 6 - Diagrama simplificado de um motor de corrente contínua



Fonte: CHAPMAN, STEPHAN J. (2013, p.450)

Utilizando-se a Figura 4 como base, e dissecando o motor de corrente contínua em algumas partes menores, temos as seguintes definições das principais partes do motor de corrente contínua:

Placa de identificação: Na placa de identificação, diversas as especificações técnicas são apresentadas pelo fabricante ao usuário. Nela estão presentes a marca, o modelo, potência, tensões de operação, entre outras informações importantes para o uso do equipamento. Em motores de menor tamanho, muitas vezes não é possível apresentar as informações em uma placa de identificação, dessa forma, tais informações são apresentadas no manual de instruções ou datasheet do motor.

Tampa: A tampa do motor é considerada uma parte integrante do motor, sendo uma de estrutura presa à carcaça do motor, com objetivo de proteger as partes internas mais sensíveis de objetos estranhos, poeira, entre outros.

Polos de campo: Os polos do campo e seu núcleo são as partes responsáveis pelo enrolamento de campo, onde é gerado o campo magnético do motor. Também podem ser chamados de polos salientes.

Armadura: Situada no interior do motor, está o rotor e seu enrolamento de armadura. O rotor é um eixo usinado, comumente feito de aço. Nele há existência de ranhuras, local onde são alojados os enrolamentos da armadura. Como pode ser

observado na Figura 7.

Figura 7 - Rotor do motor elétrico



Fonte: Adaptado de AMAZON. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Aexit-Impact-Comutador-El%C3%A9trico-Hitachi/dp/B07MB9L9D8>
Acesso em: 01 de novembro de 2021.

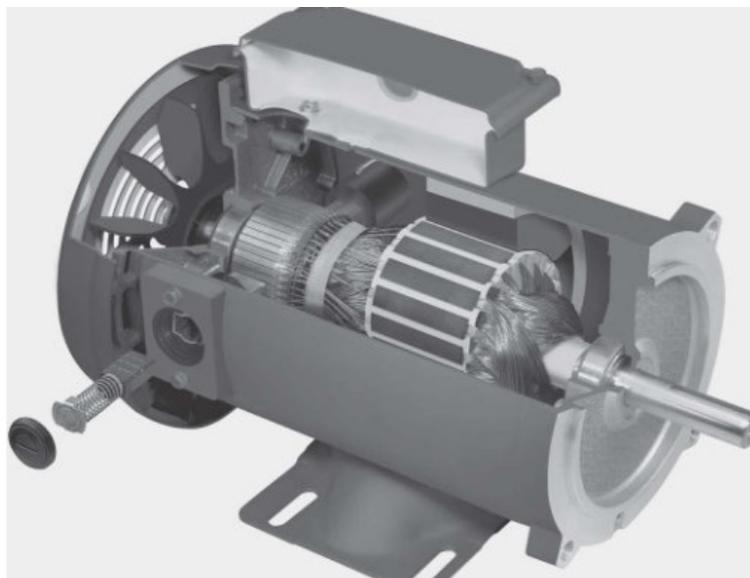
Comutador: No eixo do rotor, há o comutador, local onde há o contato do rotor com a energia externa conectada ao motor, por meio das escovas. O comutador é uma espécie de anel, com vários segmentos. Cada segmento é responsável pelo contato com cada bobina da armadura, sendo em um lado seu início e no outro lado oposto o término da espira.

O contato entre a energia elétrica e o comutador é feito através das escovas.

Escovas: O contato entre a energia elétrica e o comutador é feito através das escovas, as escovas que entram em contato com o comutador, são escovas normalmente de carvão. A construção delas deve ser um material condutivo e de média dureza, visto que um material duro, a superfície do comutador irá se desgastar rapidamente. Se as escovas forem macias, elas terão um desgaste elevado, implicando em pouca durabilidade e grande manutenção.

Enrolamentos: Os enrolamentos, tanto da armadura quanto do campo, são feitos em cobre, amplamente utilizado em ligações elétricas, fios e principalmente em bobinas, estas comumente encontradas em motores, geradores e transformadores.

Figura 8 - Perfil do motor elétrico



Fonte: UMANS, STEPHEN D. (2014, p.437)

Apesar de teoricamente um motor possuir um funcionamento simples, como exemplificado na Figura 8, para uma boa operação do motor é necessária, uma boa escolha de seus materiais em sua composição, além de muito estudo desenvolvido ao longo do tempo para que o espaço e materiais fossem bem aproveitados a fim de amplificar a eficiência.

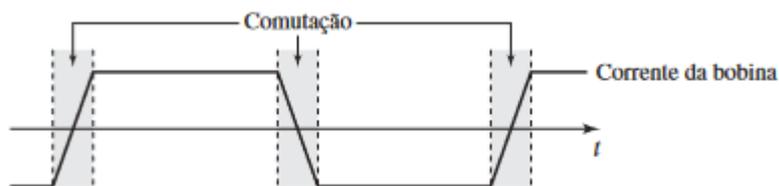
2.1.3 Comutação

A comutação é a parte mais crítica do projeto e funcionamento de qualquer máquina de corrente contínua, que possui o objetivo de auxiliar e manter o movimento do motor no sentido desejado, por meio da transferência da corrente de armadura através dos contatos entre as escovas e o comutador. (CHAPMAN, 2013, p. 416).

Na máquina de corrente contínua, a comutação é uma das partes mais importantes e sensíveis, uma vez que uma comutação fora de compasso pode gerar forças eletromagnéticas contra a rotação ou perder parte da força eletromagnética a favor do movimento. Na imagem 9 pode-se observar o momento de comutação.

Para realizar a comutação, o material utilizado, usualmente escovas de carvão, são posicionadas de maneira em que haja o aproveitando da tensão e corrente que estão proporcionando torque no sentido do movimento.

Figura 9 - Forma de onda da corrente em uma bobina linear com comutação linear



Fonte: UMANS, STEPHEN D. (2014, p.413)

Enquanto cada escova está em contato com as lâminas do comutador, os curtos-circuitos criados pelas escovas removem temporariamente do circuito principal as bobinas conectadas, na sequência, a corrente da bobina inverte de sentido. (UMANS,2014, p.413)

O período de comutação é diretamente relacionado a velocidade de rotação do rotor, ou seja, do tempo de contato da escova com a lâmina. Já a taxa de variação da corrente na bobina depende da indutância da bobina. Em certas situações a escova perde o contato com a lâmina antes da corrente ter atingido o seu valor final de comutação, neste caso ocorre o faiscamento no comutador. Esta ocorrência acaba desgastando a escova e aumentando a necessidade de manutenção e reposição de escovas desta máquina.

Em razão do faiscamento, a utilização do motor de corrente contínua em ambientes “explosivos” é fortemente desaconselhada.

2.1.3.1 Problemas associados à comutação

Reação de Armadura: Uma vez que os enrolamentos de campo do motor de corrente contínua são conectados à uma fonte de corrente contínua e o eixo do rotor gira é gerado um campo magnético próprio. Esse campo enfraquece o campo original criado pela máquina, tal efeito de enfraquecimento é denominado Reação de Armadura.

Tensões $L \frac{di}{dt}$: Outro problema de comutação é a ocorrência de tensões $L \frac{di}{dt}$, nos segmentos do comutador que são desligados das escovas, os choques indutivos. Com qualquer indutância na bobina uma tensão será induzida na bobina e esta força é oposta à inversão de corrente na bobina, e com a abertura do curto-circuito, ocorre o centelhamento. [Fundamentos de Máquinas Elétricas, Stephen Chapman, 5 Ed., pág. 417].

Considerando uma máquina que gira a 800 rpm e com 50 segmentos de comutador, cada segmento se move debaixo de uma escova e cessa o contato em $t = 0,0015$ s, dessa forma a variação de corrente deve ocorrer em 266.667 A/s.

Havendo a mínima indutância na espira, um pico de tensão significativo será induzido no segmento do comutador, gerando o faiscamento.

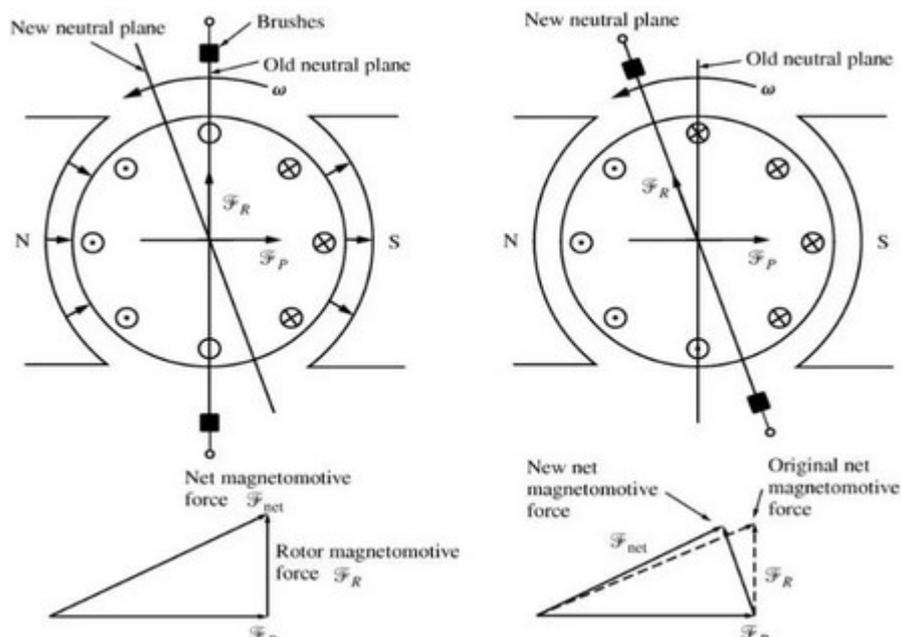
Ambos os problemas afetam a máquina de corrente contínua deslocando a linha neutra e reduzindo a vida útil das escovas, perdendo eficácia e necessitando uma manutenção mais frequente.

Para reduzir tais problemas podem ser aplicadas as seguintes soluções construtivas:

- Deslocamento das escovas
- Enrolamentos de interpolo
- Enrolamentos de compensação

Deslocamento das escovas: O deslocamento de escovas, observado na Figura 10, é uma solução já obsoleta e não muito aplicada, já que a ideia inicial era de seguir o deslocamento do plano neutro, porém, com a variação da carga, o deslocamento do plano neutro também varia, e o deslocamento já não cumpria seu papel em totalidade.

Figura 10 - Exemplificação da alteração do plano neutro



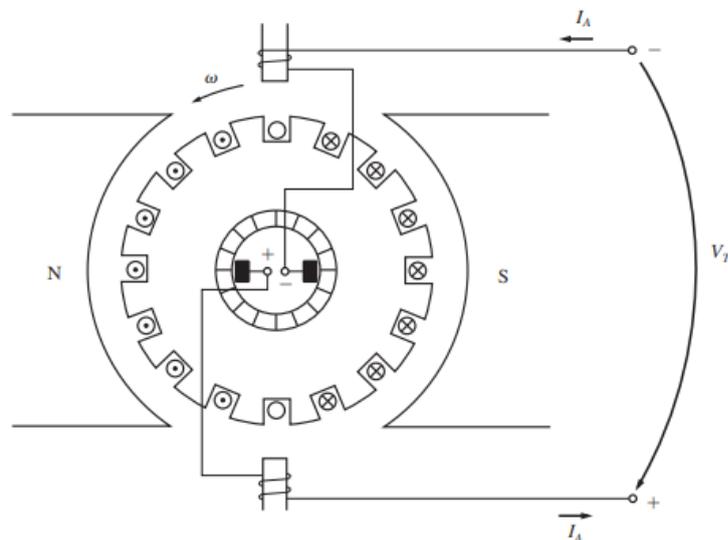
Fonte: Chapman, Fundamentos de Máquinas Elétricas. (2013, p.440)

Tal solução também não pode ser aplicada em máquinas que atuam tanto como motor quanto como gerador, uma vez que o sentido de deslocamento do plano neutro se inverte com a passagem de motor para gerador e vice-versa.

Enrolamento de Interpolo: A principal ideia por trás desta solução é reduzir, ou até zerar, a tensão nos condutores em que está havendo a comutação, dessa forma não há faiscamento nas escovas. O método para atingir tal objetivo é inserir pequenos polos, denominados interpolos, entre os polos principais da máquina, diretamente sobre os condutores, fornecendo um fluxo pelo uso dos polos de comutação.

Para o cancelamento da tensão, os enrolamentos dos interpolos do motor são ligados em série com os enrolamentos do motor, conforme Figura 11 abaixo:

Figura 11 - Enrolamento da Máquina de corrente contínua com Interpolos



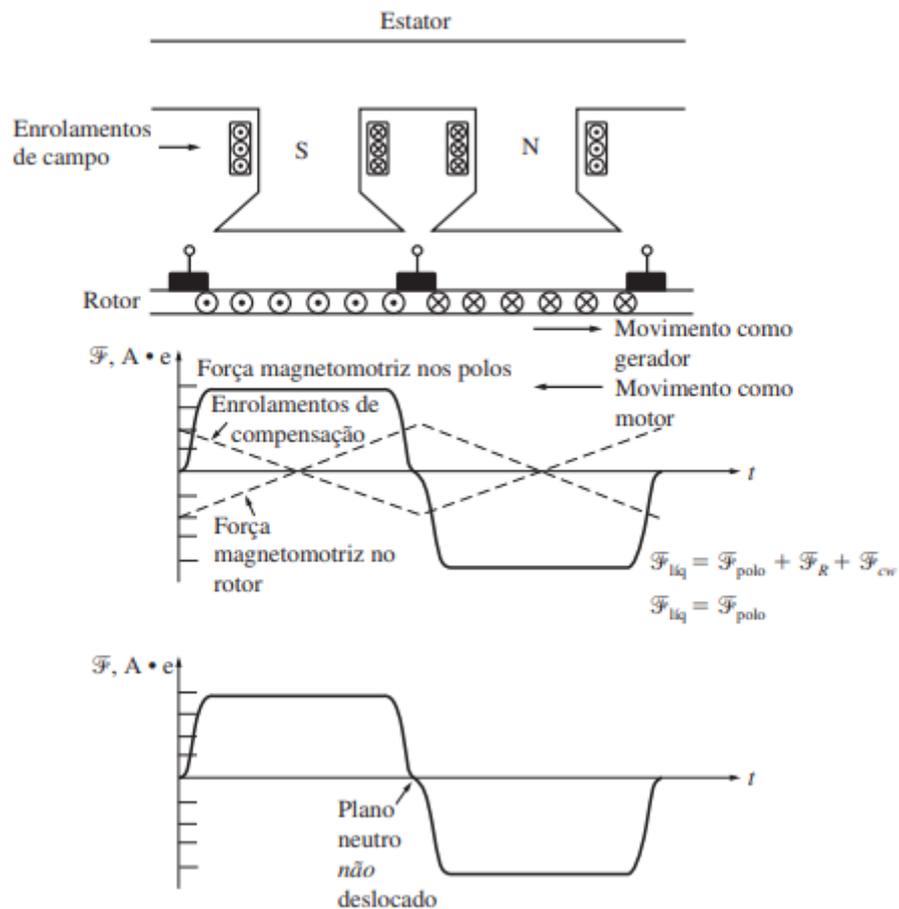
Fonte: Chapman, Fundamentos de Máquinas Elétricas. (2013, p.441)

O uso de polos de comutação ou interpolos para correção de problemas de faiscamento das máquinas de corrente contínua são extremamente comuns, pois permitem solucionar o faiscamento a um custo bem baixo, sendo usualmente aplicados em motores com mais de 1 HP de potência. Os polos de comutação não alteram nada em relação à distribuição de fluxo debaixo das faces polares. Dessa forma, o problema do enfraquecimento de fluxo continua presente. Em relação ao faiscamento, na maioria dos motores de porte médio de uso geral, esse problema é corrigido pelo uso de interpolos e, em relação ao enfraquecimento de fluxo, não é realizada nenhuma ação. (CHAPMAN, 2013, p. 442).

Enrolamento de compensação: Em motores com grande carga, cargas rapidamente variáveis e campo fraco, e alto rendimento necessário, a questão do enfraquecimento de fluxo pode ser algo grave e extremamente prejudicial. Com o objetivo de cancelar a reação da armadura e eliminar o deslocamento do plano neutro e enfraquecimento do fluxo, é utilizada a técnica do enrolamento de compensação. (CHAPMAN, 2013, p. 442).

Essa terceira técnica envolve a colocação de enrolamentos de compensação em ranhuras abertas nas faces dos polos, paralelamente aos condutores do rotor, cancelando assim o efeito de distorção causado pela reação de armadura. Esses enrolamentos são conectados em série com os enrolamentos do rotor. Desse modo, sempre que houver mudança de carga no rotor, haverá também alteração de corrente nos enrolamentos de compensação. (CHAPMAN, 2013, p. 442).

Figura 12 - O fluxo e as forças magnetomotrizes em uma máquina de corrente contínua com enrolamentos de compensação



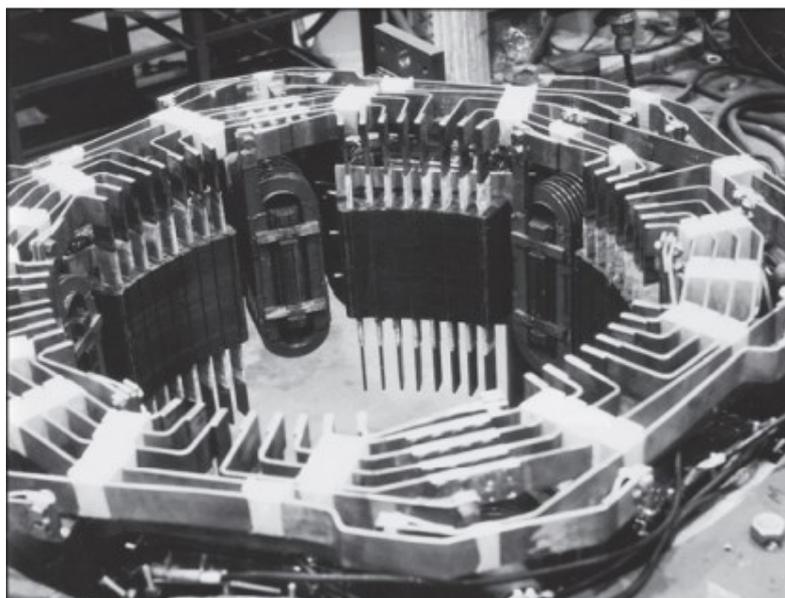
Fonte: Chapman, Fundamentos de Máquinas Elétricas. (2013, p.444)

O grande impeditivo desta técnica é seu valor financeiro, pois devem ser

construídos nas faces dos polos, e devem ser utilizados em conjunto com interpolos, uma vez que os enrolamentos de compensação não mitigam os efeitos de $L \frac{di}{dt}$.

Devido ao custo alto de implantação, a utilização da técnica citada acima é aplicada apenas em casos extremamente necessários, em motores com alto grau de rendimento requerido.

Figura 13 - O estator de uma máquina de corrente contínua de seis polos com interpolos e enrolamentos de compensação. (Cortesia de Westinghouse Electric Company)



Fonte: Chapman, Fundamentos de Máquinas Elétricas. (2013, p.445)

2.1.4 Perdas nas máquinas de corrente contínua

Um dos fatores mais importantes que limitam a operação satisfatória de uma máquina de corrente contínua é a capacidade de transferir a corrente de armadura necessária através dos contatos entre as escovas e o comutador, sem faiscamento nem excessivas perdas locais por aquecimento das escovas e do comutador. O faiscamento causa enegrecimento, corrosão e desgaste destrutivo do comutador e das escovas, condições que rapidamente se agravam desgastando o cobre das lâminas do comutador e o carvão das escovas. O faiscamento pode ser causado por condições mecânicas defeituosas, tais como trepidação das escovas ou um comutador áspero que se desgasta de forma não uniforme, ou por condições elétricas, como ocorre em qualquer problema de chaveamento. (UMANS, 2014, p.442)

Devido ao seu funcionamento ser considerado mais simples quando comparado aos outros tipos de motores, as perdas nos motores de corrente contínua

podem ser divididas em 5 itens:

2.1.4.1 Perdas no cobre

Também classificada como perdas no cobre, são perdas que ocorrem nos enrolamentos da armadura e do campo da máquina e podem ser determinadas pelas equações [1] e [2] respectivamente:

$$P_A = I_A^2 \times R_A \quad [1]$$

$$P_F = I_F \times R_F \quad [2]$$

Sendo:

$P_A =$ Perdas na armadura [W]

$P_F =$ Perdas no campo [W]

$I_A =$ Corrente de armadura [A]

$I_F =$ Corrente de campo [A]

$R_A =$ Resistência de armadura [Ω]

$R_F =$ Resistência de campo [Ω]

Deve-se considerar a resistência dos enrolamentos à temperatura usual durante o funcionamento.

2.1.4.2 Perdas nas escovas

É a determinação das perdas devido ao contato mecânico entre as escovas da máquina, o qual gera uma queda de tensão. Esta potência dissipada pode ser determinada pela equação [3]:

$$P_{QE} = V_{QE} \times I_A \quad [3]$$

Onde:

$P_{QE} =$ Perdas por queda de tensão [W]

$V_{QE} =$ Queda de tensão nas escovas [V]

$I_A =$ Corrente de armadura [A]

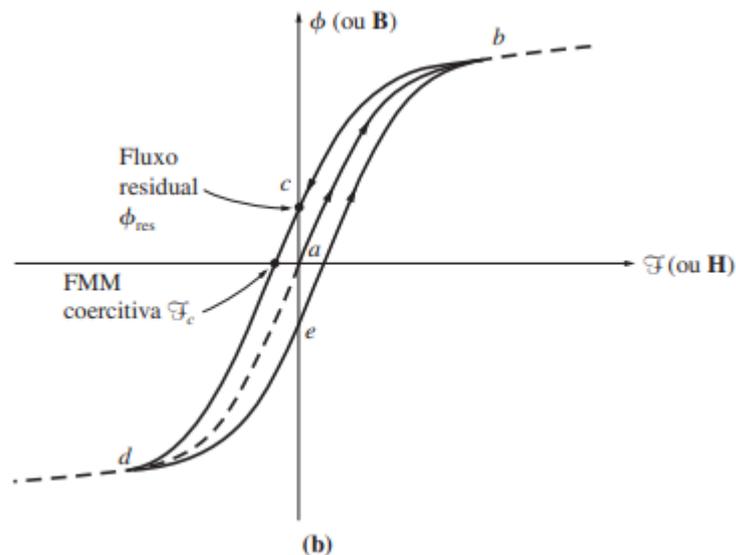
2.1.4.3 Perdas no núcleo

As perdas no núcleo são causadas pelas perdas por histerese e por correntes parasitas.

Perdas por histerese:

As perdas por histerese ocorrem devido à variação no fluxo no núcleo.

Figura 14 - Laço de histerese traçado a partir do fluxo em um núcleo



Fonte: Chapman, Fundamentos de Máquinas Elétricas. (2013, p.26)

Quando a corrente começa a ser aumentada, o fluxo no núcleo percorre o caminho ab. À medida que a corrente diminui, o fluxo do núcleo segue o caminho bcd e depois, quando a corrente cresce novamente, o fluxo segue o caminho deb.

O fluxo em seu retorno segue um caminho diferente do que percorreu no momento em que a corrente foi incrementada. O fluxo segue um caminho diferente a cada vez que a corrente é aumentada e também de acordo com o fluxo anterior ocorrido.

Se uma força magnetomotriz elevada for aplicada primeiro ao núcleo e removida em seguida, então o fluxo no núcleo seguirá o caminho abc e assim que a força magnetomotriz é removida, o fluxo no núcleo não se limita ao zero, ficando um resquício de fluxo, sem corrente. Esse campo magnético é denominado fluxo residual do núcleo. Para que o fluxo seja forçado a voltar a zero, um valor de força magnetomotriz conhecido como força magnetomotriz coercitiva F_c deve ser aplicado

ao núcleo no sentido oposto.

Uma forma de se obter o valor das perdas por histerese é calculando a área entre as curvas no gráfico B x H. (CHAPMAN, 2013, p. 27).

2.1.4.4 Perdas por correntes parasitas

Quando uma corrente variável está fluindo pelo enrolamento, um campo magnético variável surge no núcleo. A variação desse campo, aumentando e diminuindo, induz uma tensão no núcleo e essa força eletromotriz causa a circulação de correntes parasitas. Para minimizá-las, usam-se materiais de baixa condutividade, revestidos por um verniz isolador.

Quanto menor a espessura da chapa e maior a resistividade do material, menores são as perdas por correntes parasitas. Portanto, os núcleos são construídos com material laminado, com pequena espessura e com adição de silício que resulta num material de elevada resistividade.

2.1.4.5 Perdas mecânicas

As perdas mecânicas que são observadas em máquinas de corrente contínua são divididas em 2 tipos básicos. As perdas por atrito, como o nome já sugere, ocorre devido ao atrito entre os rolamentos da máquina em seu eixo. Já as perdas por ventilação são definidas pelo atrito entre as partes móveis do motor (rotor) e o meio externo (ar).

2.1.4.6 Perdas suplementares

Perdas suplementares são aquelas que não podem ser colocadas em nenhuma das categorias anteriores. Independentemente de quão cuidadosa é a análise das perdas, algumas delas acabam não sendo incluídas em nenhuma categoria. Todas essas perdas reunidas constituem o que se denomina perdas suplementares. Para a maioria das máquinas, as perdas suplementares são consideradas por convenção como representando 1% da carga total. (CHAPMAN, 2013, p. 456).

2.1.4.7 Fluxo De Potência

O diagrama do fluxo de potência é o modo mais simples e eficaz de representar as perdas de potência em uma máquina de corrente contínua.

Pelo diagrama, pode-se observar a entrada da potência mecânica na máquina e, a partir dela, as subtrações das perdas já descritas anteriormente. A potência mecânica resultante desta operação (em geradores) é definida pela equação [4]:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \times \omega_m \quad [4]$$

Onde:

P_{conv} = Potência convertida [W]

τ_{ind} = Torque aplicado [N.m]

ω_m = Velocidade angular $\left[\frac{rad}{s}\right]$

Já a potência elétrica resultante é definida pela equação [5]:

$$P_{conv} = E_A \times I_A \quad [5]$$

Onde:

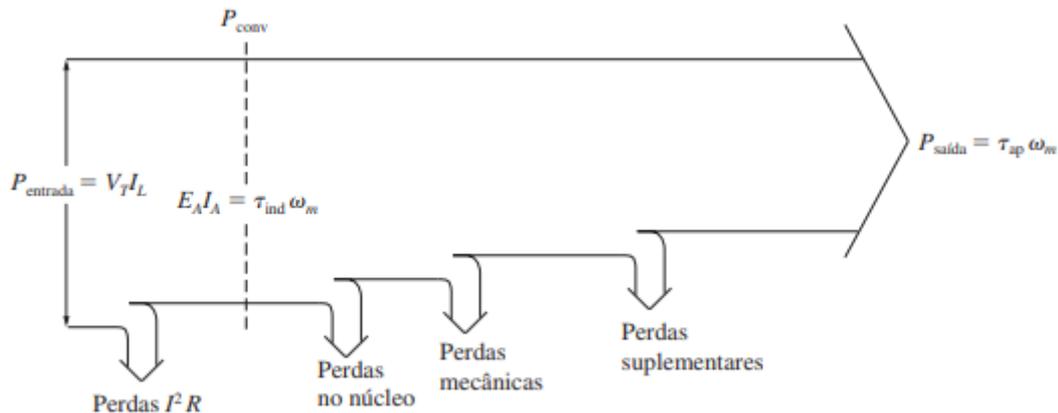
P_{conv} = Potência convertida [W]

E_A = Tensão induzida de armadura [V]

I_A = Corrente de armadura [A]

De todo modo, antes de se definir a potência observada nos terminais, deve-se subtrair as perdas elétricas (I^2R) e perdas nas escovas.

Figura 15 - Diagrama de fluxo de potência de Motor de corrente contínua



Fonte: Chapman, Fundamentos de Máquinas Elétricas. (2013, p.457)

Comparando a potência de entrada com a potência de saída, temos o rendimento da máquina (η), por meio da equação [6]:

$$\eta = (P_{\text{saída}}/P_{\text{entrada}}) \times 100 \quad [6]$$

2.1.5 Classificação dos motores de corrente contínua

Em geral, os motores de corrente contínua podem ser classificados pelo modo de conexão do indutor e das bobinas induzidas, deste modo, pode ser classificado como motor série, motor paralelo, motor composto e motor de excitação independente.

- **Motor Série**

Os motores em série possuem esta classificação pois seus enrolamentos do indutor e de armadura são ligados em série. Possuem como característica ter uma rápida aceleração e um alto torque, deste modo, são mais aplicados em situações que demandam características desta natureza, como em trens e bondes elétricos.

- **Motor Paralelo**

O motor paralelo, também chamado de motor em derivação ou motor shunt, possui a ligação do indutor e dos enrolamentos induzidos em paralelo. Possuem como

característica uma fácil regulagem de sua velocidade de rotação, deste modo, tem uma variedade de aplicações na indústria como maquinários, ferramentas elétricas, elevadores, entre outros.

- **Motor Composto**

O motor composto possui características de motores em série e de motores em paralelo e por isso também são conhecidos por motores mistos. Este possui dois enrolamentos de indutor, sendo um em paralelo e outro em série com o enrolamento induzido. Como características, este motor possui uma grande capacidade de manter sua velocidade de operação mesmo com grandes variações de carga, como ocorre em prensas, por exemplo.

- **Motor de Excitação Independente**

Os motores de corrente contínua com excitação independente possuem este nome por seu indutor e sua armadura serem alimentados por suas fontes de energias independentes. Estes possuem como características um torque constante por toda faixa de operação, permitindo seu uso em acionamento de máquinas operatrizes como bombas a pistão, compressores e ferramentas de avanço.

- **Motor de Passo**

Os motores de passo são aqueles que possuem várias bobinas e de acordo com a ligação destes, é possível mover o seu eixo em ângulos exatos. Por isso, possuem como característica uma alta precisão em seu movimento e um baixo torque, permitindo que sejam aplicados em sistemas mais delicados e precisos como em uma impressora 3D.

- **Servomotor cc**

O servo motor, ou simplesmente servo, é um motor de corrente contínua no qual é possível controlar a posição angular de seu eixo através de um sinal PWM. Deferentemente do motor de passo, o servo motor não permite uma grande liberdade de movimento, geralmente possui seu movimento limitado num ângulo de 180°. Por esse motivo são muito utilizados na robótica e em brinquedos de controle remoto.

- **Motor Brushless**

Como o nome traduzido já sugere, o motor de corrente contínua brushless não possui escovas, são comutados eletronicamente de modo que podem ser alimentados por uma fonte de corrente contínua. Por essa característica, o motor é mais eficiente, demanda baixa manutenção e menor geração de ruídos.

Como contrapartida, os motores brushless possuem um alto custo de aquisição além de uma operação mais complexa. São muito utilizados em drones e aeromodelos, por possuírem uma alta velocidade de rotação.

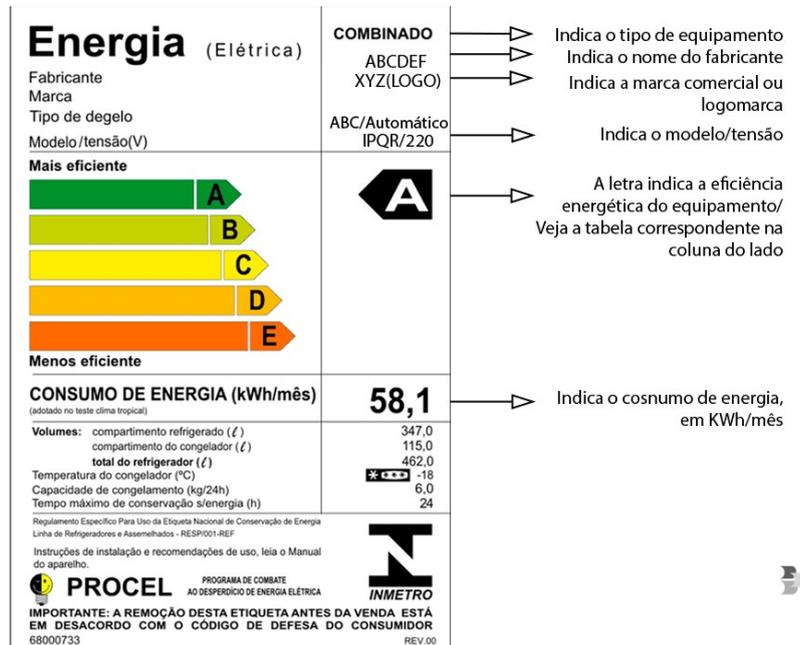
2.2 Eficiência Energética

2.2.1 Eficiência Energética

A utilização racional da energia elétrica consiste em planejar e utilizar a energia de maneira eficiente para obtenção de determinado resultado. Por definição, eficiência energética significa gerar a mesma quantidade de trabalho com menos recursos energéticos. (Empresa de Pesquisa Energética, 2018)

Nas residências, a fim de aumentar a eficiência em eletrodomésticos, foi criado o Selo Procel, em 1993 pelo Ministério de Minas e Energia, que indica aos consumidores qual o nível de eficiência energética do eletrodoméstico.

Figura 16 - Informações que podem ser obtidas através do selo PROCEL



Fonte: PROCEL (2022)

Em um panorama mais amplo comitê técnico da ISO (ISO Technical Committee (TC) 242 – Energy Management) criou em 2011 a ISO 50001 - Gestão de Energia, com o intuito de melhorar a eficiência energética em todos os setores. Com a crescente preocupação mundial da expansão energética acelerada, e o uso de fontes de energia poluentes, se faz necessária ainda mais o uso consciente da energia.

As indústrias por sua vez, devido ao seu alto consumo e representação do custo com energia elétrica nos seus custos fixos, estimado em 40% do custo fixo total das indústrias (FIRJAN, 2017), estão buscando alternativas para redução destes custos, seja a migração ao mercado livre de energia, em que as empresas negociam suas condições de fornecimento de energia elétrica bilateralmente, ou até com a construção de usinas próprias para geração, seja ela solar, PCHs, CGHs, eólicas, entre outras. Outra solução adotada é a cogeração, em que a indústria utiliza sobras de processo para geração de energia, entre elas, calor expelido ou sobras de matérias primas.

Já no agronegócio, um dos principais setores no aumento da eficiência é a automatização. De acordo com a Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), a automação agrícola pode ser entendida como um sistema no qual os processos operacionais de produção agrícola, pecuária e/ou florestal são monitorados, controlados e executados por meio de máquinas e ou dispositivos

mecânicos, eletrônicos ou computacionais, ampliando assim a capacidade de trabalho humano. Com tal investimento, tem-se um melhor resultado no final da cadeia produtiva, melhorando a produtividade de máquinas e recursos, reduzindo perdas, etc.

Muitas dessas máquinas são projetadas no exterior e entram no Brasil importadas, dessa forma as máquinas são projetadas e testadas em ambientes diferentes da realidade do clima tropical brasileiro. As altas temperaturas e umidade têm prejudicado o funcionamento de diversas máquinas, conforme exposto pela empresa Doga, que possui diversos motores de corrente contínua em aplicações agrícolas e que cita estão operando inadequadamente e necessitam alguma solução para o problema.

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Na intenção de ter um contato próximo às aplicações práticas dos motores de corrente contínua, a Doga do Brasil Ltda se ofertou para que fossem realizados alguns estudos sobre seus motores de corrente contínua e foi realizada uma visita às suas instalações em novembro de 2021.

Localizada em Pinhais, na região metropolitana de Curitiba, a Doga do Brasil Ltda iniciou as operações no Brasil em 2001 com o objetivo de atender a demanda do mercado automotivo da América Latina, principalmente os mercados de ônibus, máquinas agrícolas e de construção, trens e motores de corrente contínua com aplicação no setor industrial. Em suas instalações estão localizadas equipes de gestão logística, comercial, qualidade e engenharia para suporte técnico.

Alguns exemplos dos produtos da Doga são: Sistemas limpadores de para-brisas; Sistemas lavadores; Depósitos automotivos; Motores de corrente contínua de aplicações gerais; Sistemas levantadores de vidro e Produtos para estampagem a sopro.

De origem espanhola, a empresa compartilhou alguns desafios enfrentados pela equipe técnica para sua adaptação ao mercado brasileiro. Um dos pontos discutidos foi a resposta de seus produtos, desenvolvidos na Europa, ao clima tropical brasileiro, em especial aos motores de corrente contínua que são amplamente empregados em máquinas agrícolas como colheitadeiras e semeadeiras.

Segundo o Francisco Roman, gerente de contas da Doga, dentre os pontos de melhorias em seus produtos, está a redução do aquecimento e aumento do índice de proteção IP do Motor de Performance Type 319. Segundo a empresa, este produto possui margem para desenvolvimento de melhorias devido à queda de performance causada pelas particularidades do clima do campo brasileiro.

Desenvolvido para aplicações em plantadeiras o Motor de Performance Type 319, tem um papel importante no processo do plantio para garantir que as sementes sejam depositadas corretamente no solo, com espaçamento ideal, evitando perdas ou plantio duplo e dessa forma evitando sobreposições nas linhas de plantio. A distribuição de sementes de forma homogênea garante a melhor otimização da lavoura. Em um mesmo equipamento de plantadeira contém dezenas de motores, e a melhora na sua performance individual é vital para a melhoria dos resultados da

agricultura de precisão.

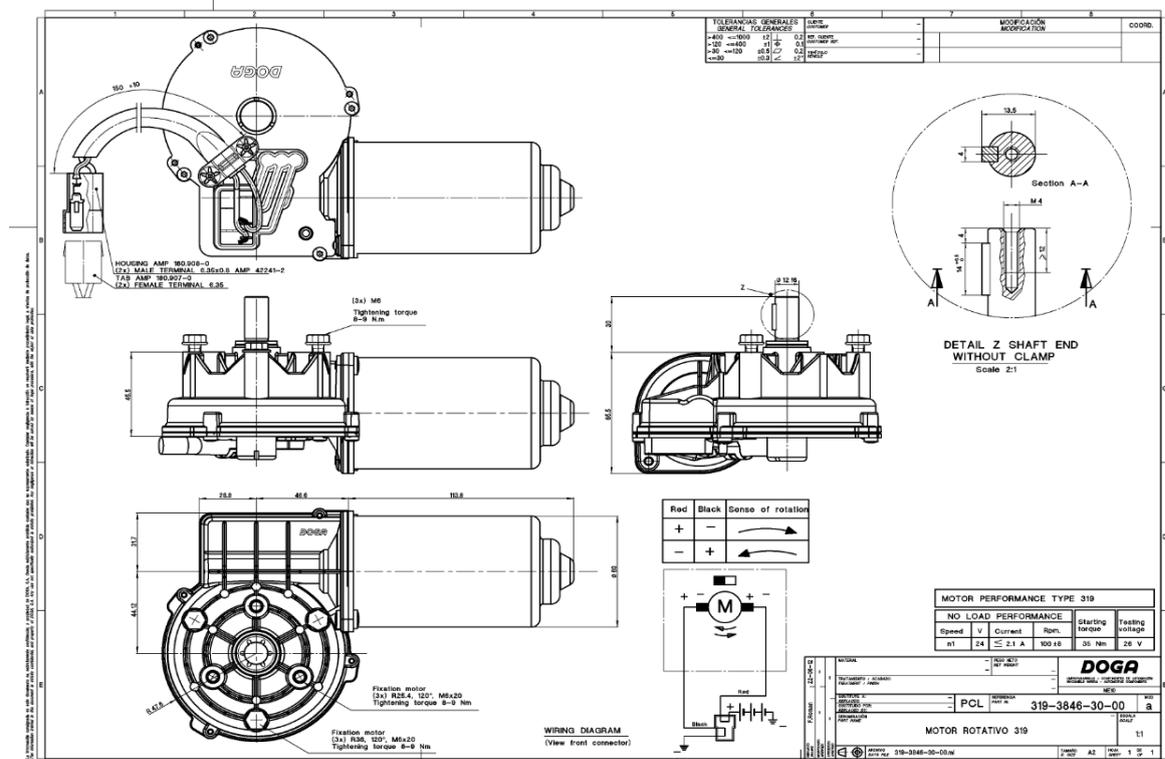


Figura 17 - Esquematização do Motor Type 319.

Fonte: Doga do Brasil LTDA (2021)

3.1 Ensaio a vazio

Para melhor se conhecer os parâmetros do motor, foi realizado um ensaio a vazio. Neste tipo de ensaio, o motor é ligado, sem cargas mecânicas, aplicando-se tensão gradativamente, a fim de conhecer seus parâmetros, como a corrente, rotação, potência elétrica e perdas.

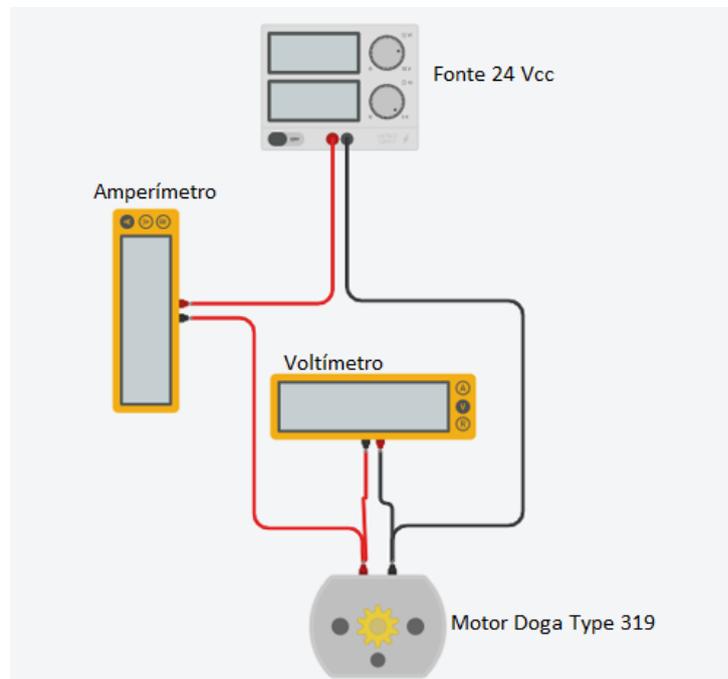
3.1.1 Metodologia

Para o ensaio a vazio foi necessário ligar o motor em uma fonte de tensão capaz de chegar na tensão nominal do motor de 24 V de corrente contínua. Neste ensaio, o objetivo é aplicar gradativamente a tensão até chegar na tensão nominal do motor, medindo a velocidade rotacional com um tacômetro e a corrente de armadura com um amperímetro.

No eixo de saída do moto redutor foi inserido um disco bicolor, usado para

auxiliar um tacômetro na medição de velocidade de rotação do motor.

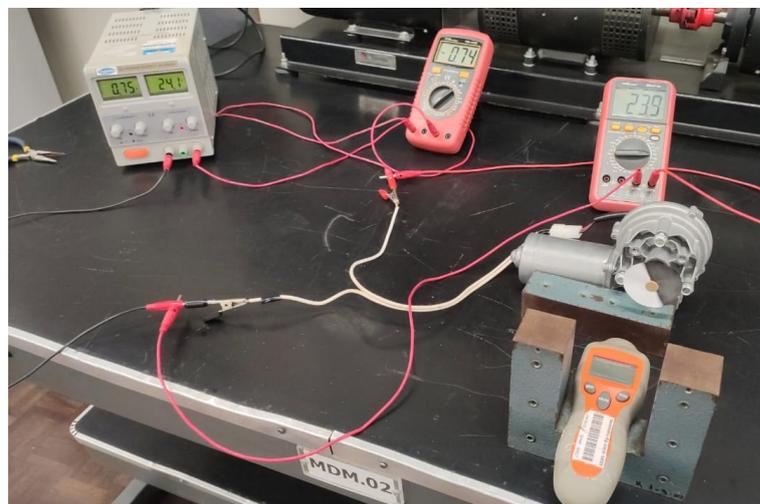
Figura 18 - Diagrama ensaio a vazio



Fonte: os autores (2022)

Ou seja, aumentando-se gradativamente uma tensão no motor, de 2 em 2 volts, deve-se observar um aumento gradativo na corrente e na velocidade de rotação do motor.

Figura 19 - Montagem para ensaio do motor de corrente contínua.



Fonte: os autores (2022)

Os multímetros utilizados são da marca ICEL, modelo MD-1700 como amperímetro e MD-6110 como voltagem. Já o tacômetro era do modelo TC-5035,

também do fabricante ICEL.

3.1.2 Resultados

Sendo assim, os resultados medidos estão na tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros medidos no motor.

Tensão	Corrente	Rotação
4,00	0,45	13,70
6,00	0,50	21,40
8,00	0,53	28,80
10,00	0,57	36,20
12,00	0,60	43,80
14,00	0,62	51,40
16,00	0,65	59,10
18,00	0,68	66,60
20,00	0,70	74,30
22,10	0,73	82,50
24,00	0,75	89,90

Fonte: os autores (2022)

Foi também medida a resistência de armadura, no qual foi obtido o valor de $R_a = 0,821\Omega$, a fim de que possam ser conhecidas as perdas elétricas nessa situação. Para essa medição foi utilizado um multímetro MD-6110, da ICEL. Essa medição é realizada medindo a resistência entre os terminais das escovas

Alguns outros parâmetros podem ser obtidos através de cálculos. A rotação no motor elétrico, desconsiderando o redutor de velocidade, é obtido através do manual do fabricante, onde para cada rotação no eixo mecânico, o motor elétrico executa 39 rotações, sendo assim na proporção 1:39. Pode-se obter também a potência elétrica do motor, através da equação [7]:

$$P = V \times I \quad [7]$$

Onde:

$P = \text{Potência [W]}$

$V = \text{Tensão [V]}$

$I = \text{Corrente [A]}$

E por fim, pode-se calcular as perdas a vazio a partir da equação [8]:

$$P_{Perdas} = I^2 \times R_a \quad [8]$$

Onde:

P = Potência dissipada [W]

I = Corrente [A]

R_a = Resistência de armadura [Ω]

Na tabela 2 estão apresentados os valores medidos e os valores calculados.

Tabela 2: Parâmetros medidos no motor e parâmetros calculados do motor original.

Tensão [V]	Corrente [A]	Rotação [rpm]	Rotação no Motor [rpm]	Potência [W]	Perdas [W]
4,00	0,45	13,70	534,30	1,80	0,17
6,00	0,50	21,40	834,60	3,00	0,21
8,00	0,53	28,80	1123,20	4,24	0,23
10,00	0,57	36,20	1411,80	5,70	0,27
12,00	0,60	43,80	1708,20	7,20	0,30
14,00	0,62	51,40	2004,60	8,68	0,32
16,00	0,65	59,10	2304,90	10,40	0,35
18,00	0,68	66,60	2597,40	12,24	0,38
20,00	0,70	74,30	2897,70	14,00	0,40
22,10	0,73	82,50	3217,50	16,13	0,44
24,00	0,75	89,90	3506,10	18,00	0,46

Fonte: os autores (2022)

A partir desses dados, pode-se observar um crescimento nas perdas de modo proporcional à corrente de armadura. Esta potência dissipada pode estar relacionada, portanto, à queda de tensão nas escovas

3.1.3 Análise dos resultados

Existem dois pontos principais a serem observados no comportamento do motor a vazio. Um deles é a corrente que o motor chega. O outro ponto importante são as perdas.

Essas perdas aumentam gradativamente conforme aumenta-se a tensão e a corrente no motor. Cabe ressaltar que essas perdas são apenas as perdas elétricas, sem considerar perdas mecânicas do sistema.

3.2 Abertura do conjunto

Após a realização do ensaio a vazio, foi feita uma abertura da estrutura do conjunto do motor para se observar seus detalhes internos. Ao abrir a primeira parte removível do conjunto, pode-se observar o seu redutor.

Na imagem 20, pode-se então observar uma engrenagem plástica. Esta engrenagem, conectada ao eixo final de todo o sistema é onde é feita a redução de velocidade na proporção fornecida pelo fabricante através do manual, no qual é de 1:39.

Figura 20 - Sistema redutor do conjunto eletromecânico.



Fonte: os autores (2022)

Esta engrenagem se conecta ao motor elétrico através de uma rosca infinita, esta sim conectada ao eixo do motor elétrico, visualizada na Figura 21. Para um melhor funcionamento dessas partes há uma pasta lubrificante, observada na borda externa da engrenagem e na rosca infinita.

É possível também observar uma massa preta na borda da carcaça, sendo esta uma vedação para evitar a entrada de poeira, água e outros agentes que interfiram no funcionamento.

Figura 21 - Detalhe do redutor e do conector elétrico.

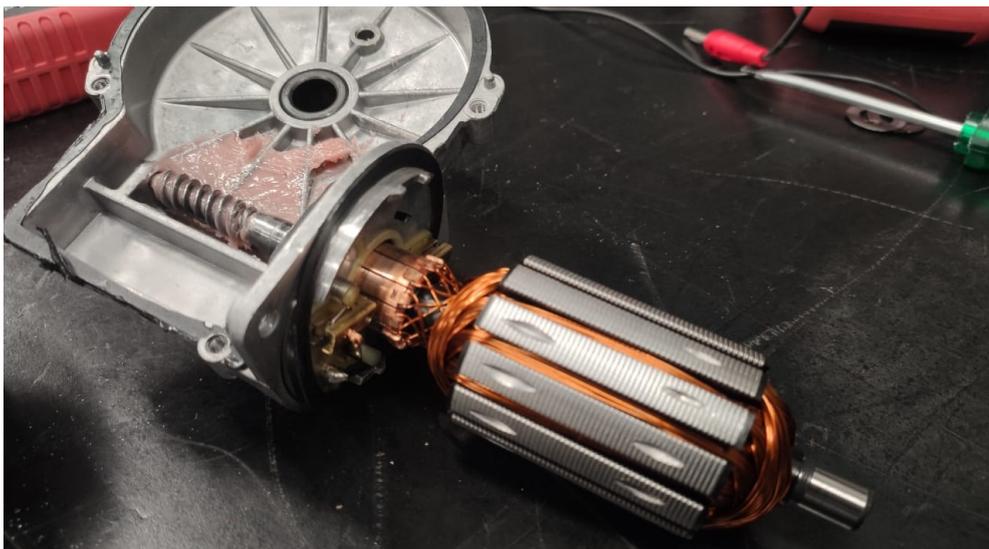


Fonte: os autores (2022)

Circulado em vermelho está a conexão elétrica entre o motor e o chicote elétrico existente em sua carcaça, por onde é feita a ligação elétrica do conjunto. Prosseguindo com a desmontagem, foi aberta então a estrutura do motor elétrico, sendo assim dividido em duas partes.

Na Figura 22 possível observar o rotor. Nele estão seu enrolamento de armadura, comutador e as escovas. Neste momento pode ser dado um enfoque maior nas escovas. Elas são alojadas no porta-escovas, presos a carcaça do conjunto eletromecânico, responsáveis por transmitir energia da fonte ao rotor, sendo assim, uma parte de extrema importância para o funcionamento.

Figura 22 - Rotor do motor de corrente contínua.



Fonte: Os autores (2022).

Já na carcaça do motor, está um outro componente extremamente importante: os ímãs permanentes. Não foi possível obter o material de construção dos ímãs.

Os ímãs posicionados na carcaça são os responsáveis pelo fluxo campo magnético. Na imagem 23, de modo ilustrativo, estão representados os dois polos. Ao fundo, é possível observar o mancal do eixo do motor, com graxa para a lubrificação.

Figura 23 - Detalhamento dos ímãs permanentes.



Fonte: Os autores (2022).

Problemas de comutação

Após a abertura do motor e avaliação dos componentes, foi identificado que um dos motivos que podem trazer a perda de rendimento são as escovas. As escovas são elementos importantes no motor, pois fazem o contato elétrico entre uma parte fixa e uma parte móvel, além de contribuir diretamente na resistência de armadura, sendo um dos elementos que podem ser responsáveis pelas perdas.

Dessa forma, existem escovas consideradas de alta performance, para

motores com necessidades de alto rendimento, que poderiam ser utilizadas nesse motor. Tais escovas, por mais que possuam um valor mais alto, também trazem inúmeros benefícios, como:

Motor de alto rendimento vs. normal

- Redução do consumo de energia elétrica através do aumento do rendimento dos motores e consequente redução de perdas;
- Aumento da vida útil dos motores elétricos pois funcionam a temperaturas mais baixas por apresentarem menores perdas;
- Rendimento mais elevado para cargas baixas;

Com tais ações, é possível reduzir os efeitos indesejados que o motor sofre no campo e que prejudicam seu funcionamento.

3.3 Ensaios de temperatura em ambiente aberto

A fornecedora do motor de corrente contínua, Doga do Brasil, citou que o maior problema do motor se tratava em como ele se comportava com o aumento da temperatura com seu funcionamento, dessa forma, foram realizados alguns ensaios com aferição de temperatura em diversas situações para diminuir o aquecimento do motor.

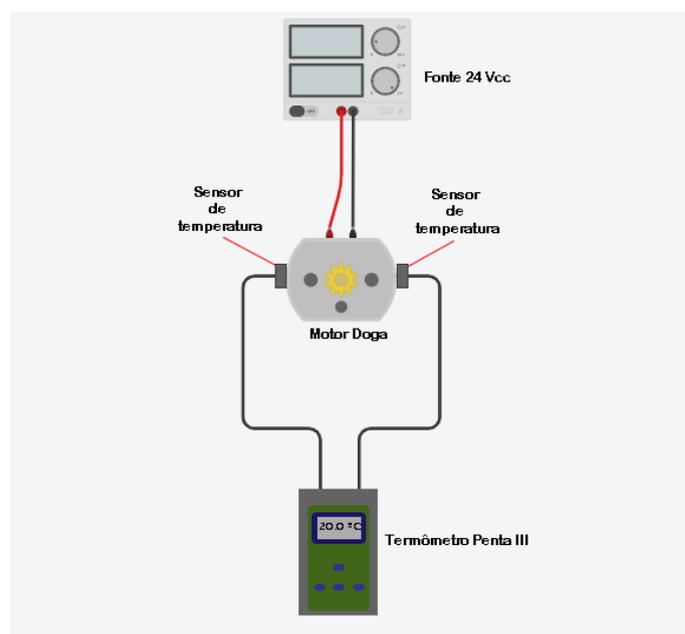
3.3.1 Metodologia dos ensaios de temperatura

Neste ensaio, o motor foi ligado em tensão nominal, a vazio, e a cada período fixado, deve ser feita uma medição de temperatura. Para esta medição de temperatura foi utilizado um Penta III, da Full Gauge (Figura 24).

Figura 24 - Termômetro Penta III Gauge

Fonte: Os autores (2022).

Este termômetro possui cinco sensores independentes, o que permite que sejam utilizados dois sensores simultaneamente. Os dois sensores foram fixados aproximadamente 180° um do outro, a fim de obter duas temperaturas diferentes e assim calcular a média entre eles. Na imagem 25 é possível observar o diagrama.

Figura 25 - Diagrama do ensaio de temperatura

Fonte: Os autores (2022).

O conjunto eletromecânico ficou o tempo todo sobre a bancada, exposto apenas a temperatura ambiente que era de 17,5 °C, este medido com o auxílio de outro sensor do mesmo termômetro.

Este ensaio é de extrema importância, pois ele será usado como comparação para os ensaios seguintes.

3.3.2 Resultados do ensaio de temperatura

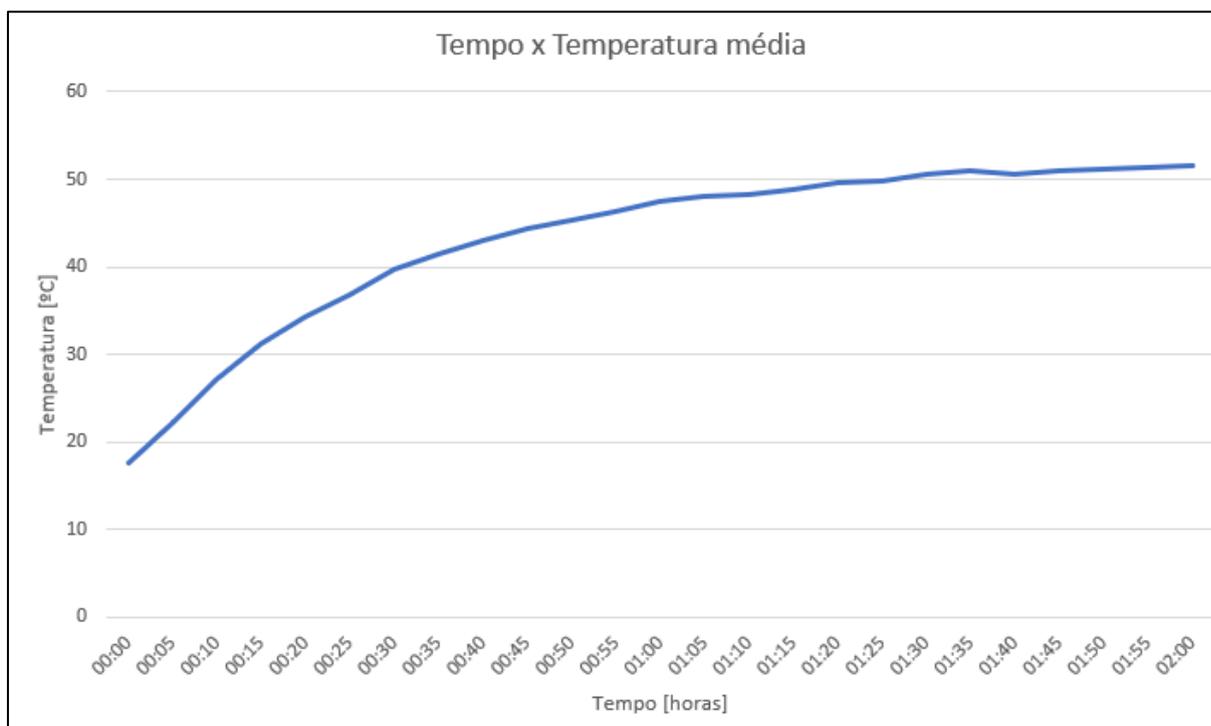
Na tabela 3 estão apresentadas as medições realizadas nos dois sensores e a média de temperatura entre eles.

Tabela 3: Medição de temperatura no motor original.

Tempo [h]	Sensor 1 [°C]	Sensor 2 [°C]	Média [°C]
00:00	17,60	17,50	17,55
00:05	22,20	22,30	22,25
00:10	26,90	27,20	27,05
00:15	30,80	31,50	31,15
00:20	34,00	34,50	34,25
00:25	36,50	37,20	36,85
00:30	38,80	40,50	39,65
00:35	40,50	42,40	41,45
00:40	43,00	43,10	43,05
00:50	43,70	46,90	45,30
00:55	44,90	47,80	46,35
01:00	46,50	48,50	47,50
01:05	46,90	49,10	48,00
01:10	46,90	49,80	48,35
01:15	47,20	50,40	48,80
01:20	48,60	50,70	49,65
01:25	48,40	51,10	49,75
01:30	49,70	51,40	50,55
01:35	49,80	52,00	50,90
01:40	49,70	51,40	50,55
01:45	49,80	52,30	51,05
01:50	49,80	52,60	51,20
01:55	50,30	52,60	51,45
02:00	50,70	52,30	51,50

Fonte: Os autores (2022).

Esses dados ficam mais interessantes quando plotados em um gráfico, conforme a figura 26.

Figura 26 - Gráfico de temperatura x tempo com o motor exposto.

Fonte: Os autores (2022).

A partir do gráfico fica mais fácil compreender a curva de temperatura apresentada pelo motor. Até os primeiros 50 minutos é possível observar um crescimento rápido de temperatura, que passa a ser gradativamente menor em seguida. Já próximo de uma hora e meia de funcionamento a temperatura tende a se estabilizar em aproximadamente 51,5 °C.

A partir de 01h30 de ensaio, a temperatura possui uma variação muito pequena e pode-se considerar estabilizado.

3.3.3 Análise dos resultados do ensaio de temperatura

Naturalmente o motor apresenta um aquecimento durante seu funcionamento. É possível observar que neste ensaio a variação foi mais de 30 °C, podendo ser considerado um grande aumento na temperatura em um período de duas horas.

Com isso, deve-se questionar a possibilidade de reduzir este ganho inevitável de temperatura.

3.4 Ensaios de temperatura em ambiente parcialmente confinado com ventilação forçada

A primeira solução aparente para se corrigir um problema de temperatura é uma extremamente trivial, que é produzir uma ventilação forçada, retirando o calor de sua fonte.

Para que pudesse ser realizado este ensaio, o motor foi parcialmente confinado dentro de um tubo de PVC, com uma extremidade aberta e outra fechada com um *cooler* embutido.

Esta solução, apesar de não ser ideal, se trata de uma solução simples e barata, fácil de ser feita sem a necessidade de elementos elaborados. O ideal seria uma cápsula capaz de acomodar melhor o motor, fixá-lo e possuir uma saída para o seu eixo mecânico. Entretanto isso requer uma modelagem 3D e impressão em impressora 3D, o que tornaria este estudo caro e inviável neste momento.

Figura 27 - Motor dentro do tubo com ventilação forçada.



Fonte: Os autores (2022).

3.4.1 Metodologia do ensaio de temperatura em ambiente parcialmente confinado com ventilação forçada

Como dito anteriormente, o motor foi inserido dentro de um tubo de PVC, sendo suas dimensões: 150 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento.

Novamente foi utilizado o mesmo termômetro, posicionado da mesma maneira como no ensaio anterior utilizado como parâmetro.

O *cooler* utilizado neste experimento foi um Intel, de 12 volts, de tamanho 60mm x 60mm. Este *cooler* é extremamente simples e barato, fácil de ser encontrado em lojas de informática e eletrônicos, por aproximadamente R\$12,00.

Figura 28 - Cooler utilizado no ensaio.



Fonte: Os autores (2022).

Este *cooler* foi inserido com o objetivo de não ventilar ar para dentro do sistema, mas sim retirar o ar de dentro, forçando o ar quente a sair, criando assim um fluxo de ar por dentro da tubulação.

Desta forma, foi seguido os mesmos parâmetros estabelecidos no ensaio anterior. As medições foram feitas a cada 5 minutos, obtendo assim os dados dos dois sensores e posteriormente calculada a média entre eles.

3.4.2 Resultados do ensaio de temperatura em ambiente parcialmente confinado

Os dados obtidos neste ensaio estão apresentados na tabela 4:

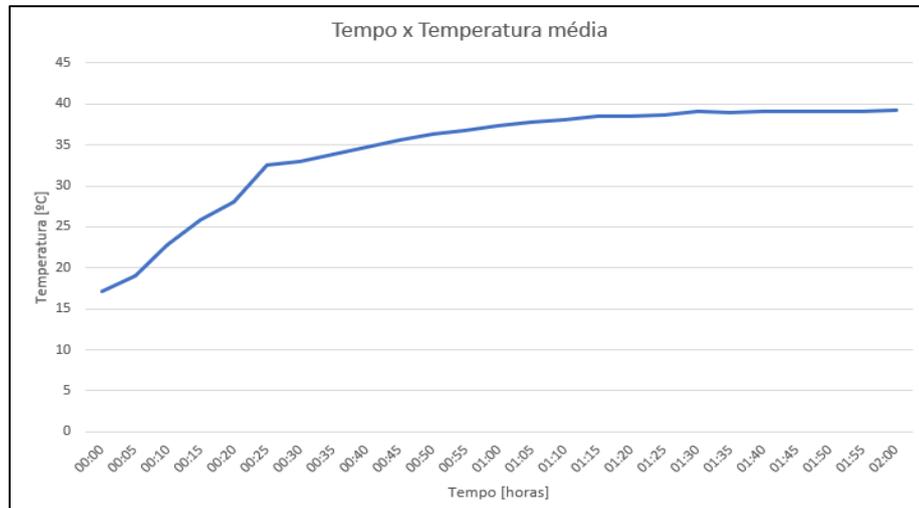
Tabela 4: Medição de temperatura no motor parcialmente confinado com ventilação forçada.

Tempo [h]	Sensor 1 [°C]	Sensor 2 [°C]	Média [°C]
00:00	17,10	17,10	17,10
00:05	19,10	18,90	19,00
00:10	22,90	22,60	22,75
00:15	26,00	25,70	25,85
00:20	28,00	28,00	28,00
00:25	32,70	32,50	32,60
00:35	34,40	33,40	33,90
00:40	35,20	34,30	34,75
00:45	35,80	35,40	35,60
00:50	36,40	36,30	36,35
00:55	37,00	36,60	36,80
01:00	37,30	37,30	37,30
01:05	37,80	37,90	37,85
01:10	37,70	38,50	38,10
01:15	38,40	38,50	38,45
01:20	38,30	38,80	38,55
01:25	38,50	38,90	38,70
01:30	38,90	39,20	39,05
01:35	39,00	38,90	38,95
01:40	39,20	38,90	39,05
01:45	39,00	39,20	39,10
01:50	39,10	39,00	39,05
01:55	39,00	39,20	39,10
02:00	39,40	39,20	39,30

Fonte: Os autores (2022).

Novamente, a melhor maneira de explicitar e interpretar estes resultados é traçando um gráfico, apresentado na figura 24.

Figura 29 - Gráfico de temperatura com o motor parcialmente confinado.



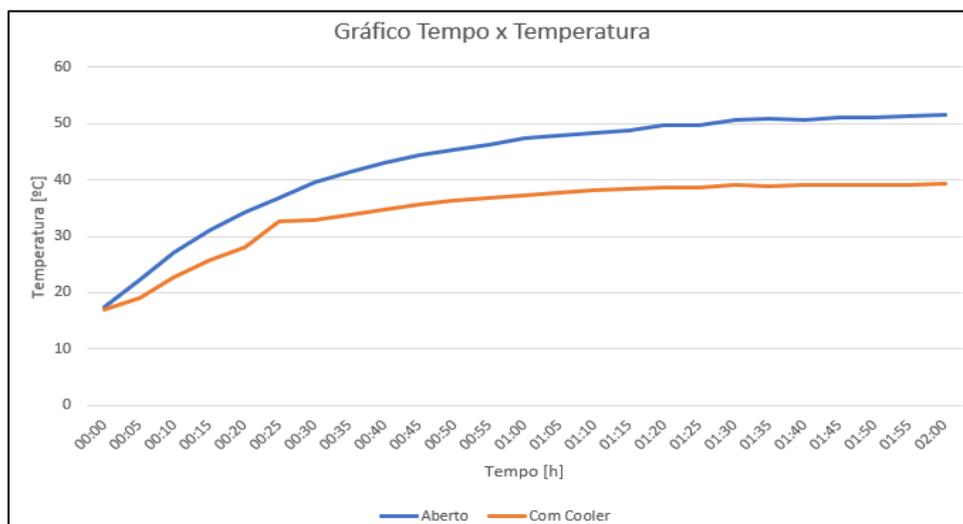
Fonte: Os autores (2022).

Com este ensaio pode-se observar uma subida de temperatura menos abrupta, e que próximo a 01:15 a temperatura já começa a estabilizar, porém desta vez, na média de 39 °C.

3.4.3 Análise dos resultados do ensaio de temperatura em ambiente parcialmente confinado

Quando plotado junto ao gráfico de controle, essa diferença fica ainda mais evidente.

Figura 30 - Gráfico comparativo entre os ensaios.



Fonte: Os autores (2022).

Neste comparativo fica evidente a diferença de temperatura entre os dois

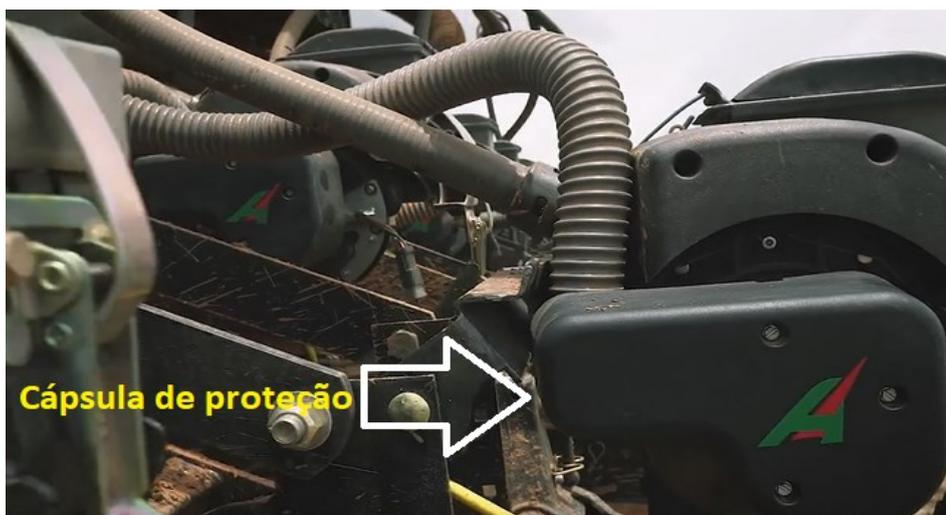
ensaios. Mesmo estando parcialmente confinado e utilizando um *cooler* pequeno, o resultado já é extremamente satisfatório, podendo ser observada uma redução de mais de 10 °C neste ensaio.

Esse teste demonstra que apesar do motor esquentar, é possível de maneira simples reduzir sua temperatura, utilizando a ventilação forçada.

3.5 Ensaios de temperatura em ambiente totalmente confinado

O teste subsequente, foi elaborado a partir da premissa de um vídeo divulgado por um cliente da empresa parceira. Neste vídeo é possível observar o motor coberto por uma capa de proteção, no qual inibe que o motor sofra danos por pedras, galhos e outros materiais que possam colidir com o motor, porém, colocando-o em um ambiente totalmente confinado, o que aumenta a temperatura interna e prejudica o funcionamento do motor.

Figura 31 - Imagem da cápsula de proteção do motor em campo



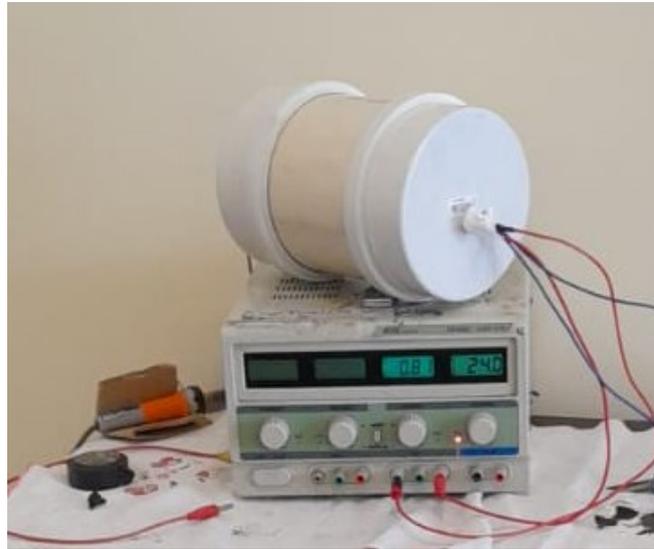
Disponível em: <https://www.facebook.com/watch/?v=782352369375245>

Acesso em: 13 de Setembro de 2022

3.5.1 Metodologia do ensaio de temperatura em ambiente totalmente confinado

Neste ensaio, o motor foi inserido dentro de um tubo de PVC, tal qual no ensaio anterior. Entretanto, as duas extremidades do tubo foram tampadas. Novamente foram realizadas medições de cinco em cinco minutos, utilizando os mesmos termômetros de anteriormente.

Figura 32 - Ensaio realizado com o motor totalmente confinado



Fonte: Os autores (2022).

3.5.2 Resultados do ensaio de temperatura em ambiente totalmente confinado

As medições obtidas estão apresentadas na tabela 5:

Tabela 5: Medição de temperatura no motor totalmente confinado sem ventilação forçada.

(continua)			
Tempo [h]	Sensor 1 [°C]	Sensor 2 [°C]	Média [°C]
00:00	21,20	21,20	21,20
00:05	24,80	24,80	24,80
00:10	29,90	29,60	29,75
00:15	34,40	34,00	34,20
00:20	38,20	37,80	38,00
00:25	41,40	41,10	41,25
00:30	44,60	44,30	44,45
00:35	47,10	47,20	47,15
00:40	49,80	49,70	49,75
00:45	51,90	52,00	51,95
00:50	53,80	54,20	54,00
00:55	55,70	56,00	55,85
01:00	57,30	57,70	57,50
01:05	58,70	59,40	59,05
01:10	60,20	60,70	60,45
01:15	61,50	62,20	61,85
01:20	62,60	63,40	63,00
01:25	63,70	64,40	64,05
01:30	64,80	65,40	65,10

Tabela 5: Medição de temperatura no motor totalmente confinado sem ventilação forçada.

			(conclusão)
Tempo [h]	Sensor 1 [°C]	Sensor 2 [°C]	Média [°C]
01:35	65,60	66,50	66,05
01:45	67,20	68,10	67,65
01:50	67,80	68,50	68,15
01:55	68,40	69,10	68,75
02:00	68,90	69,70	69,30

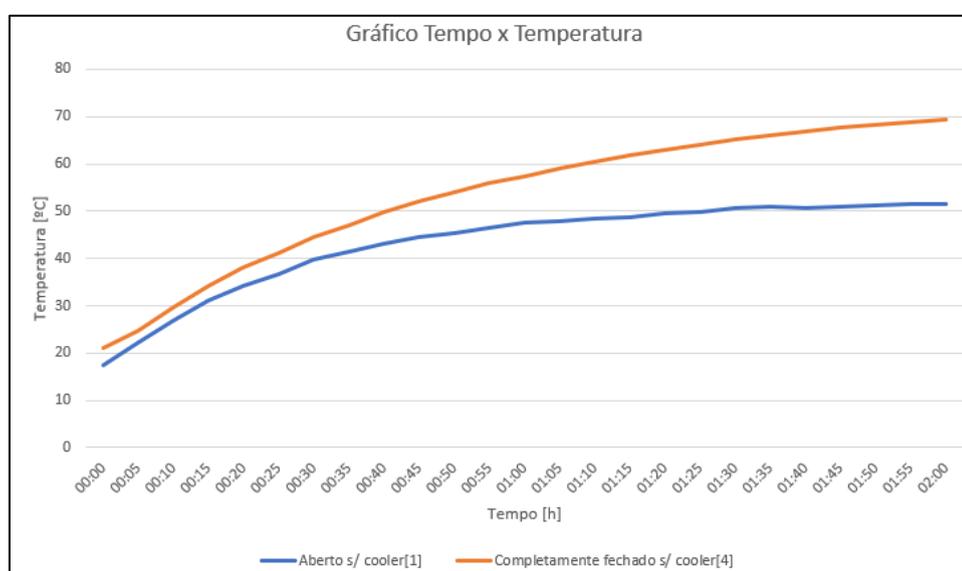
Fonte: Os autores (2022).

A partir da tabela 5 é possível observar a variação de temperatura com o motor totalmente confinado. É importante notar o grande salto que há entre a temperatura inicial e última medida após duas horas, sendo uma variação de pouco menos de 50 °C.

3.5.2 Resultados do ensaio de temperatura em ambiente totalmente confinado

Para melhor observar os resultados, foi novamente plotado um gráfico, que pode ser observado na figura 33 com as temperaturas médias em função do tempo. Desta vez já será apresentado o gráfico comparativo entre os dois ensaios de temperatura anteriores e este atual.

Figura 33 - Gráfico de temperatura em ambiente totalmente confinado e sem ventilação.



Fonte: Os autores (2022).

No gráfico da figura 33 é possível observar a relação de temperatura entre os três ensaios. O ensaio realizado com o motor parcialmente confinado com ventilação,

continua sendo o que menos aquece o motor.

Na situação do motor totalmente confinado, pode-se perceber que há um grande incremento na temperatura, o que definitivamente prejudica a operação do motor, conforme externalizado pela fabricante do motor, Doga do Brasil.

Para este ensaio o motor tende a estabilizar na região dos 68 °C, ante 51 °C do motor aberto.

3.6 Ensaio de temperatura em ambiente totalmente confinado com ventilação forçada

O teste subsequente, foi elaborado com o intuito de reduzir a temperatura do motor, porém sem retirar a capa que protege o motor de impactos físicos, uma vez que ela tem sua utilidade e o ideal seria realizar a melhoria evitando ao máximo alterar as características do motor e seu uso no dia-dia.

Com isso, foi tomada uma decisão por encapsular totalmente o motor dentro do tubo de PVC, com um lado vedado com o *cooler* e o outro lado completamente vedado, a fim de observar sua temperatura em um ambiente totalmente confinado, porém com uma fonte de ventilação forçada.

3.6.1 Metodologia do ensaio de temperatura em ambiente totalmente confinado com ventilação forçada

Neste ensaio, o motor foi inserido dentro de um tubo de PVC, tal qual no ensaio anterior. Entretanto, as duas extremidades do tubo foram tampadas, sendo uma delas com o *cooler* retirando o ar quente. Novamente foram realizadas medições de cinco em cinco minutos, utilizando os mesmos termômetros de anteriormente. Na figura 34 pode ser observado a estrutura do ensaio.

Figura 34 - Ensaio com o motor totalmente confinado e ventilação forçada



Fonte: Os autores (2022).

3.6.2 Resultados do ensaio de temperatura em ambiente totalmente confinado com ventilação forçada

As medições obtidas estão apresentadas na tabela 6, a seguir:

Tabela 6: Medição de temperatura no motor totalmente confinado com ventilação forçada.

(continua)			
Tempo [h]	Sensor 1 [°C]	Sensor 2 [°C]	Média [°C]
00:00	18,70	18,70	18,70
00:05	21,50	21,40	21,45
00:10	25,60	27,10	26,35
00:15	29,00	31,60	30,30
00:20	32,30	35,10	33,70
00:25	34,80	38,00	36,40
00:30	36,70	40,40	38,55
00:35	38,30	42,30	40,30
00:40	39,70	43,90	41,80
00:45	40,70	45,10	42,90
00:50	41,50	46,30	43,90
00:55	42,50	47,10	44,80
01:00	43,70	48,20	45,95
01:05	44,00	48,80	46,40
01:10	44,60	49,50	47,05
01:15	44,80	49,80	47,30
01:25	45,30	50,40	47,85
01:30	45,60	50,40	48,00
01:35	45,80	50,70	48,25

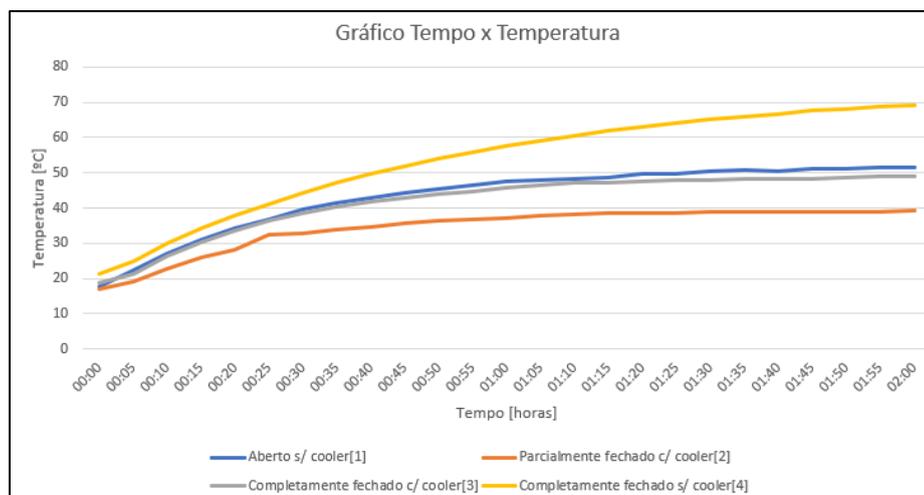
Tabela 6: Medição de temperatura no motor totalmente confinado com ventilação forçada.

Tempo [h]	Sensor 1 [°C]	Sensor 2 [°C]	(conclusão)
			Média [°C]
01:40	45,90	50,70	48,30
01:45	45,90	51,00	48,45
01:50	46,50	51,00	48,75
01:55	46,50	51,30	48,90
02:00	46,50	51,40	48,95

Fonte: Os autores (2022).

Para melhor observar os resultados, foi novamente plotado um gráfico com as temperaturas médias em função do tempo. Desta vez já será apresentado na figura 35 o gráfico comparativo entre os quatro ensaios de temperatura anteriores e este atual.

Figura 35 - Gráfico comparativo entre os ensaios.



Fonte: Os autores (2022).

3.6.3 Análise dos resultados do ensaio de temperatura em ambiente totalmente confinado com ventilação forçada

No gráfico da figura 35 é possível observar a relação de temperatura entre os quatro ensaios. O ensaio realizado com o motor parcialmente confinado com ventilação, continua sendo o que menos aquece o motor.

Entretanto, mesmo o motor estando totalmente confinado, mas com ventilação, sua temperatura é um pouco menor que o motor estando totalmente aberto sem ventilação alguma.

Para este ensaio o motor tende a estabilizar na região dos 48 °C, ante 51 °C dele aberto.

A partir destes quatro ensaios já é possível obter uma análise parcial sobre o comportamento do motor e como ele pode ser beneficiado desde implementos para sua melhoria de temperatura, assim como durabilidade.

3.7 Ensaio de temperatura com substituição de escovas de contato.

Um dos principais motivos de aquecimento em motores elétricos se dá devido ao efeito Joule. Esse aquecimento é devido à corrente que passa no motor, onde quanto maior for a corrente, maior será a perda por aquecimento.

Conseqüentemente uma das maneiras de reduzir esta perda é reduzir a corrente que passa através do motor. Para isso, foi proposta a substituição das escovas de carvão presentes no comutador.

Para isso, foi utilizado um par de escovas de carvão Bosch, para lixadeiras elétricas, modelo 000 611 028 (Figura 36).

Figura 36 - Jogo de escovas Bosch



Fonte: Os autores (2022).

Por serem de outro fabricante, este modelo não se adaptava ao motor. Para isso a escova foi adaptada a fim de ser utilizada no motor Doga.

3.7.1 Metodologia do ensaio de temperatura com substituição de escovas de contato.

Para este teste, foi então replicado o ensaio descrito na seção 3.3, onde o

motor foi deixado exposto em temperatura ambiente, sem estar confinado ou com ventilação forçada.

Seguindo a mesma metodologia, partiu-se o motor em sua tensão nominal, com medições sendo feitas a cada cinco minutos, durante duas horas. Foram posicionados dois sensores ao redor do motor, igual feito nos ensaios anteriores.

3.7.2 Resultados do ensaio de temperatura com substituição de escovas de contato.

Os resultados do ensaio estão apresentados na tabela 7:

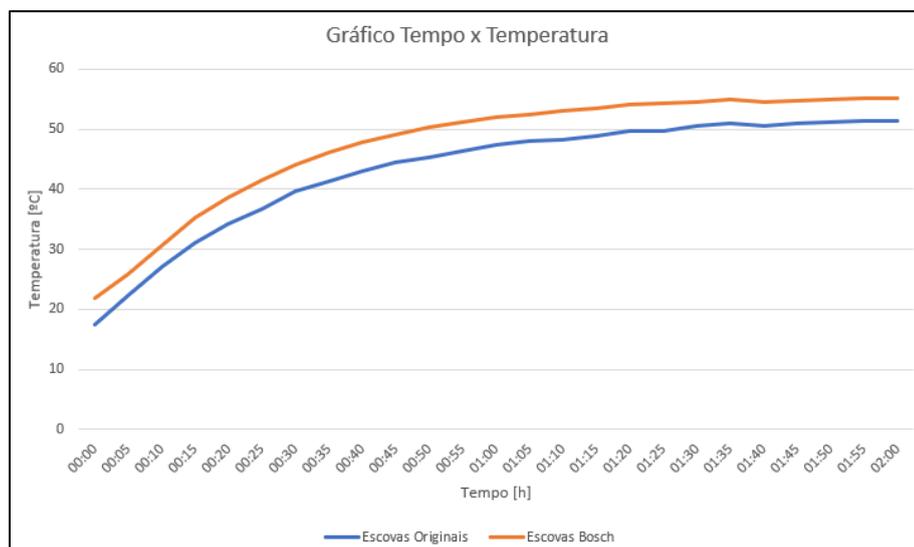
Tabela 7: Medição de temperatura no motor com escovas Bosch

Tempo [h]	Sensor 1 [°C]	Sensor 2 [°C]	Média [°C]
00:00	16,80	17,10	16,95
00:05	21,90	21,90	21,90
00:10	28,20	27,50	27,85
00:20	37,10	36,30	36,70
00:25	40,40	39,80	40,10
00:30	43,30	42,90	43,10
00:35	45,70	45,30	45,50
00:40	46,60	47,20	46,90
00:45	48,10	48,80	48,45
00:50	49,70	50,00	49,85
00:55	50,70	51,00	50,85
01:00	51,90	52,00	51,95
01:05	52,90	52,70	52,80
01:10	53,50	53,30	53,40
01:15	54,20	53,90	54,05
01:20	54,80	54,50	54,65
01:25	55,20	54,80	55,00
01:30	55,80	55,70	55,75
01:35	56,00	55,80	55,90
01:40	56,40	56,00	56,20
01:45	56,40	56,30	56,35
01:50	56,10	56,00	56,05
01:55	56,40	56,10	56,25
02:00	56,40	56,10	56,25

Fonte: Os autores (2022).

Para melhor se visualizar os resultados, foi plotado um gráfico comparando o motor 100% original com o alterado.

Figura 37 - Gráfico comparativo entre os ensaios.



Fonte: Os autores (2022).

3.7.3 Análise dos resultados do ensaio de temperatura com substituição de escovas de contato.

O motor com as escovas Bosch, apresentou uma temperatura levemente maior que o motor com as escovas originais. Essa temperatura maior pode ser entendida como um aumento na corrente, ou seja, uma maior resistência nas escovas da marca Bosch. Para se comprovar isso, deve ser refeito o ensaio a vazio, onde é extraída a corrente no motor.

3.8 Ensaio a vazio com substituição de escovas de contato.

Para se entender melhor o comportamento do motor quando a vazio, o melhor ensaio a ser feito, é o ensaio a vazio. A partir deste ensaio, é possível então avaliar o comportamento da corrente e também das perdas no motor.

3.8.1 Metodologia do ensaio a vazio com substituição de escovas de contato.

Para este ensaio, foi utilizada a mesma metodologia do ensaio no capítulo 3.1.1. Para que seja possível comparar os dados, é necessário que seja replicado da mesma maneira que o ensaio de parâmetro. A sua montagem foi exatamente igual a que pôde ser observada na figura 19.

3.8.2 Resultados do ensaio a vazio com substituição de escovas de contato.

Os resultados medidos neste ensaio, estão apresentados na tabela 8 a seguir:

Tabela 8: Ensaio a vazio com escovas Bosch

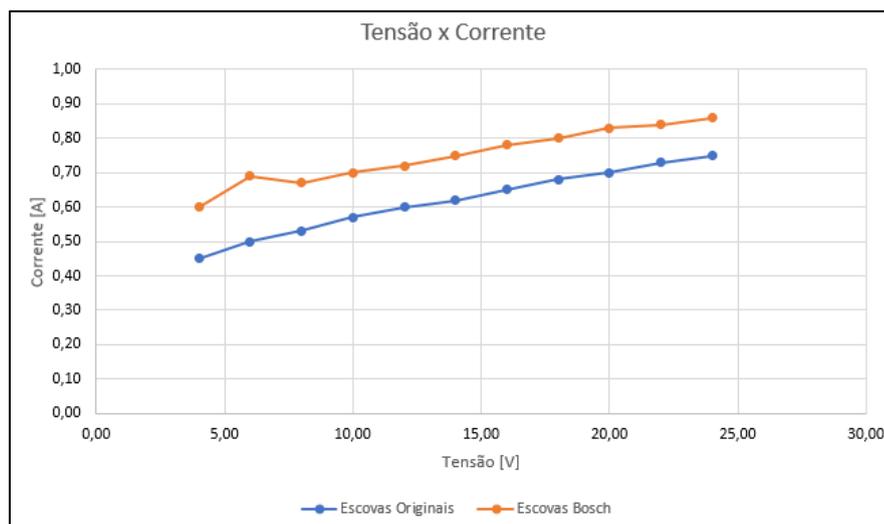
Tensão [V]	Corrente [A]
4,00	0,60
6,00	0,69
8,00	0,67
10,00	0,70
12,00	0,72
14,00	0,75
16,00	0,78
18,00	0,80
20,00	0,83
22,00	0,84
24,00	0,86

Fonte: Os autores (2022).

3.8.3 Análise dos resultados do ensaio a vazio com substituição de escovas de contato.

Com os dados obtidos na tabela 8, o melhor modo de comparar com o ensaio com o motor original, é plotando estes dados em um gráfico na figura 38.

Figura 38 - Gráfico comparativo de Tensão x Corrente entre o motor original e motor com escovas Bosch



Fonte: Os autores (2022).

A partir da interpretação do gráfico, fica evidente que de fato houve um aumento expressivo na corrente no motor.

Deste modo, esse aumento corrobora com o aumento das perdas e consequentemente o aumento de temperatura, conforme observado na seção 3.7.

Ou seja, o motor com as escovas originais está sendo até o presente momento, o mais eficiente. Pode ser que haja no mercado escovas mais eficientes, entretanto, teria que ser avaliado o custo x benefício.

Por alguns problemas na montagem do equipamento, foi decidido por não reabrir o motor para novas alterações, a fim de evitar danos no equipamento. Deste modo, não foi possível obter a resistência de armadura do motor com as escovas Bosch.

4. CONCLUSÃO

Com base nos dados obtidos, pode-se então fazer uma análise acerca da temperatura deste motor em questão.

O motor apresenta uma melhora significativa em sua temperatura quando parcialmente confinado dentro de uma proteção capaz de produzir uma ventilação forçada em seu interior.

Para uma solução em escala de produção, o ideal seria uma proteção plástica, onde é capaz de absorver impactos de detritos. Nesta proteção deve possuir um *cooler* direcionado a retirar o ar quente do interior da proteção. Do lado oposto ao motor, deve haver uma entrada de ar, capaz de fornecer um fluxo de ar.

É visto também que mesmo se esta proteção confinar totalmente o motor, mas ainda assim possuir ventilação forçada capaz de retirar o ar quente de seu interior, sua temperatura será relativamente menor que com o motor totalmente exposto. Entretanto, há alguns pontos a serem pontuados.

A opção trivial de inserir um *cooler*, pode trazer alguns problemas. Um deles é que devido ao fato de o *cooler* ser também um motor, ele estaria suscetível a absorver poeira, água e outros elementos presentes no campo. Deste modo pode ser tratado como um componente a mais a ter manutenção e apresentar problemas.

De certo modo, a premissa anterior está correta, de fato o *cooler* pode e vai apresentar problemas em larga escala. Porém, um *cooler* deste tipo, custa apenas R\$ 12,00, o que se trata de ser um valor muito inferior ao valor do motor. Deste modo, um *cooler*, além de ser de fácil substituição, acesso, baixa manutenção e de baixo valor, pode ser um ponto interessante a ser pensado na sua utilização em larga escala.

Outro ponto importante está na metodologia. O motor foi testado levando em consideração a temperatura ambiente de Curitiba, no estado do Paraná. Curitiba é a capital mais fria do Brasil, e apresenta médias de temperaturas bem inferiores às encontradas nos locais de uso do motor.

Apesar disso, os dados podem ser considerados satisfatórios, pois mesmo em um ambiente mais ameno, o motor apresentou temperaturas elevadas. Um parâmetro extremamente empírico é o fato de que ao se tocar com as mãos, não é possível permanecer com a mão no motor, tal qual sua temperatura já é elevada para a sensibilidade humana.

Com estes dados obtidos é possível concluir que é possível melhorar o comportamento no aquecimento do motor. Inevitavelmente o motor irá esquentar, entretanto o objetivo de reduzir a sua temperatura foi alcançado em testes. Este pode ser um direcionamento a ser aplicado em sua aplicação no campo. Não cabe a este estudo aplicar essa solução no campo, mesmo que em baixa escala.

Já nos testes onde houve a substituição da escova, não houve uma melhora, mas sim uma piora no aquecimento do motor. Ou seja, as escovas que saem de fábrica são melhores do que as adaptadas de outro fabricante. Este aquecimento maior pode ser explicado pelo expressivo aumento da corrente, aumentando assim as perdas no motor.

Com isso, é possível concluir que a melhor solução encontrada nesta tese, é de que se o motor se encontrar dentro de uma capa protetora, refrigerado por um *cooler*, onde possa haver um fluxo de ar através do motor, seu aquecimento será consideravelmente menor.

REFERÊNCIAS

Agrosystem, Erin Stern. **Conheça nossas soluções que estão revolucionando o plantio em lavouras em todo Brasil.** Disponível em: <https://www.facebook.com/watch/?v=782352369375245> Acesso em 13 de setembro de 2022.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas** [recurso eletrônico] /Stephen J. Chapman; tradução: Anatólio Laschuk. – 5. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre: AMGH, 2013.

DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de máquinas elétricas.** Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1994.

FIRJAN, 2017. **Custo e qualidade para a competitividade da indústria nacional.** Disponível em: <https://www.firjan.com.br/firjan/empresas/competitividade-empresarial/temas-em-destaque/energiaeletrica/custo/default-7.htm#:~:text=Introdu%C3%A7%C3%A3o,de%20seus%20custos%20de%20produ%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 19 de Maio de 2021.

HAND, Augie. **Motores elétricos: manutenção e solução de problemas;** Tradução: Flávio Adalberto Poloni Rizzato – 2. Ed. – Editora Bookman, 2014.

High Voltage RC. **RC Tuning.** Disponível em <https://highvoltagegarc.wordpress.com/2013/05/22/rc-tuning-motores/> Acesso em 19 de Outubro de 2022.

MARTIGNONI, Alfonso. **Máquinas de corrente contínua.** Porto Alegre, RS, Ed. Globo, 1974.

Ministério de Minas e Energia, 2021. **Procel - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica.** Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/planejamento-e-desenvolvimento-energetico/procel->

programa-nacional-de-conservacao-de-energia-eletrica-1#:~:text=O%20Procel%20%2D%20Programa%20Nacional%20de,(Secretaria%20Executiva%20do%20Programa). Acesso em: 19 de Maio de 2021.

MUSEU WEG. **A história do motor elétrico que você precisa conhecer.** 2018. Disponível em: <https://museuweg.net/blog/a-historia-do-motor-eletrico/> Acesso em: 19 de maio de 2021.

MUSEU WEG. **A incrível transformação dos motores no seu dia a dia.** 2017. Disponível em: <https://museuweg.net/blog/a-incrivel-transformacao-dos-motores-no-seu-dia-a-dia/#content> Acesso em: 19 de Maio de 2021.

ORNELAS, Pedro. **Motores Elétricos de Corrente Contínua.** Disponível em: http://www.marioloureiro.net/tecnica/electrif/Motoresde_corrente_continua3.pdf. Acesso em: 19 de maio de 2021.

SANTANA, Adrielle de Carvalho. **Motores de Corrente Contínua.** Disponível em: http://professor.ufop.br/sites/default/files/adrielle/files/aula_7.pdf. Acesso em 11 de maio de 2021.

SIEMENS, Motores De Corrente Contínua, Disponível em: http://www.marioloureiro.net/tecnica/electrif/Motores_cc_ind1.pdf Acesso em 21 de outubro de 2022.

UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley [recurso eletrônico]** / Stephen D. Umans; tradução: Anatólio Laschuk. – 7. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre: AMGH, 2014.