

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Leonardo Heldt Marino

**MOTOR HEXAFÁSICO PARA APLICAÇÃO
VEICULAR IN-WHEEL UTILIZANDO O
CONCEITO DE MÁQUINA SÍNCRONA DE
IMÃS PERMANENTES DE DUPLO
ACIONAMENTO**

Porto Alegre

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Leonardo Heldt Marino

**MOTOR HEXAFÁSICO PARA APLICAÇÃO VEICULAR
IN-WHEEL UTILIZANDO O CONCEITO DE MÁQUINA
SÍNCRONA DE IMÃS PERMANENTES DE DUPLO
ACIONAMENTO**

Projeto de Diplomação - ELE, pela Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

UFRGS

Orientador: Prof. Dr. Igor Pasa Wiltuschnig

Porto Alegre

2024

Leonardo Heldt Marino

**MOTOR HEXAFÁSICO PARA APLICAÇÃO VEICULAR
IN-WHEEL UTILIZANDO O CONCEITO DE MÁQUINA
SÍNCRONA DE IMÃS PERMANENTES DE DUPLO
ACIONAMENTO**

Projeto de Diplomação - ELE, pela Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Me. Eng. Gabriel Behling da Silveira
UFRGS

Prof^a. Dra. Thieli Smidt Gabbi
UFSM

Prof. Dr. Igor Pasa Wiltuschnig
Orientador - UFRGS

Aprovado em 23 de Agosto de 2024.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, José Luiz e Cátia, que, mesmo com todas as dificuldades que tive ao longo deste processo de aprendizagem, não mediram esforços para a conquista do meu sonho.

À minha namorada, Hévellin, que durante a jornada esteve sempre ao meu lado.

Ao professor Igor e à professora Thieli, por todo o apoio e orientação para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de graduação, que tornaram essa jornada muito mais proveitosa e divertida, transformando desafios em conquistas e obstáculos em aprendizados.

Aos meus colegas da TK Elevator, agradeço pelo apoio contínuo no meu desenvolvimento profissional e por me introduzirem ao mundo da engenharia.

Creio firmemente em uma lei de compensação. As verdadeiras recompensas são sempre proporcionais ao esforço e aos sacrifícios feitos.

– Nikola Tesla

Resumo

Neste projeto, foi desenvolvido e analisado um motor síncrono de ímã permanente trifásico duplo (*Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor*) para aplicações em veículos elétricos, com foco em motocicletas. Utilizando o método dos elementos finitos (FEM), foram simulados diversos cenários operacionais para identificar e validar os principais parâmetros de desempenho do motor. Os resultados mostraram que o motor alcançou uma potência de 5,76 kW e um conjugado de 84,7 Nm, representando um aumento de 44% em relação ao motor de referência Kasinski Prima Electra 2000. A análise do acionamento senoidal demonstrou eficiência na redução do *ripple* de conjugado, resultando em um funcionamento mais suave e eficiente. O motor também manteve desempenho operacional aceitável em cenários de falha, destacando sua confiabilidade e redundância. Os resultados validam a viabilidade e a eficiência do motor trifásico duplo como uma solução promissora para veículos elétricos.

Palavras-chave: Dual Three-Phase PMSM, Motor síncrono de ímã permanente, Método dos elementos finitos (FEM), Veículos elétricos.

Abstract

In this project, a dual three-phase permanent magnet synchronous motor was developed and analyzed for applications in electric vehicles, specifically focusing on motorcycles. Using the finite element method (FEM), various operational scenarios were simulated to identify and validate the key performance parameters of the motor. The results showed that 44% increase compared to the reference motor, Kasinski Prima Electra 2000. The analysis of sinusoidal drive demonstrated efficiency in reducing torque ripple, resulting in smoother and more efficient operation. The motor also maintained acceptable operational performance in fault scenarios, highlighting its reliability and redundancy. The results validate the viability and efficiency of the dual three-phase motor as a promising solution for electric vehicles.

Palavras-chave: - Dual Three-Phase PMSM, Electric Vehicles, Finite Element Method (FEM), Permanent Magnet Synchronous Motor.

Lista de Figuras

Figura 1 – Primeiro veículo de Ferdinand Porsche, conhecido como P1.	14
Figura 2 – Distribuição de veículos elétricos ao longo dos anos no Brasil.	16
Figura 3 – Número de veículos elétricos ao longo dos anos no Brasil.	18
Figura 4 – Ilustração evolução do veículo elétrico.	19
Figura 5 – Michelin Active Wheel Drive.	20
Figura 6 – Siemens eCorner VDO.	21
Figura 7 – Comparação comutador eletromecânico e comutador eletrônico.	23
Figura 8 – Topologia de BLDC - Rotor Externo.	24
Figura 9 – Topologia de BLDC - Rotor Interno.	24
Figura 10 – Topologia de BLDC - Rotor Axial.	25
Figura 11 – Topologia de BLDC - Motor com dois pares de polos.	26
Figura 12 – Exemplos de localização dos Sensores Hall e formato de onda associado.	27
Figura 13 – Sinal do sensor Hall.	27
Figura 14 – Vista em seção transversal de uma máquina elementar CA trifásica.	28
Figura 15 – Dual 3-phase PMSM drive system.	31
Figura 16 – kasinski Prima Electra 2000.	32
Figura 17 – Exemplo de massa não suspensa.	33
Figura 18 – Resultados para veículo base e +30 kg de massa não suspensa em cada extremidade – comportamento de direção.	33
Figura 19 – <i>software Ansys Eletronic</i>	36
Figura 20 – Malha do método dos elementos finitos aplicado na máquina.	37
Figura 21 – Modelo do motor gerado no módulo RMXprt.	38
Figura 22 – Simetria do modelo 3D da máquina.	44
Figura 23 – Conjugado gerado pela máquina no <i>software</i>	45
Figura 24 – Potência gerada pela máquina no <i>software</i>	45
Figura 25 – Disposição das Fases Da Máquina.	46
Figura 26 – Tensão induzida pela máquina no <i>software</i>	47
Figura 27 – Conjugado com perda de duas fases.	48
Figura 28 – Densidade de fluxo magnético simulada.	48

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Média de milhas diárias dos motoristas norte-americanos durante os dias da semana (em %)	15
Tabela 2 – Desempenho do motor BLDC x número de fases (em %)	25
Tabela 3 – Valores de densidade de corrente linear A_r e densidade de fluxo no entreferro \hat{B}_δ	42

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Veículo Elétrico	13
2.2	Sistema <i>In Wheel</i>	18
2.3	Máquina síncrona	22
2.4	Máquina <i>Brushless</i> BLDC	22
2.4.1	Topologia de BLDC	23
2.4.1.1	Rotor Externo	23
2.4.1.2	Máquina de fluxo radial com rotor Interno	23
2.4.1.3	Máquina de fluxo Axial	24
2.4.1.4	Número de fases	25
2.4.1.5	Número de polos	25
2.4.1.6	Sensor Hall	26
2.5	Tensão induzida	27
2.6	Trabalho, Potência e Conjugado	29
2.7	Sistema síncrono de ímã permanente trifásico duplo acionamentos de motor	30
2.8	Kasinski Prima Electra 2000	31
2.9	Massa não Suspensa	32
3	METODOLOGIA	34
3.1	Hipótese de análise para o projeto	34
3.2	Abordagem	34
3.3	Coleta de Dados	34
3.3.1	Medições Experimentais	34
3.3.2	Análise Computacional	35
3.4	Análise da Máquina	35
3.4.1	Escolha do software	35
3.4.2	Método dos elementos finitos	36
3.4.3	Início da análise	37
3.5	Análise analítica	39
4	RESULTADOS	42
4.1	Estudo Analítico	42
4.1.1	Simulação do Modelo	43

5	CONCLUSÃO	49
6	TRABALHOS FUTUROS	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1 Introdução

O mundo enfrenta desafios urgentes, a poluição do ar, as mudanças climáticas e a dependência de combustíveis fósseis ameaçam nosso planeta e nossa saúde. Nesse contexto, a busca por soluções sustentáveis e inovadoras torna-se crucial. A adoção de veículos elétricos e o desenvolvimento de *powertrains* mais eficientes atualmente é um dos principais cenários no meio automotivo.

Uma promessa para o futuro são os motores *in-wheel*, ou motores de cubo de roda, apresentam-se como uma tecnologia inovadora para motocicletas, oferecendo vantagens como melhor desempenho em baixas rotações, eficiência, projeto e confiabilidade. A centralização da massa em uma das rodas proporciona maior maneabilidade, estabilidade, mais espaço para alocar as baterias e aceleração, além de reduzir perdas de energia. O design mais simples elimina componentes da transmissão tradicional, enquanto a menor necessidade de manutenção garante confiabilidade e quantidade menor de visitas a centro de reparos, e um sistema sem perdas, por se de atuação direta sem nenhuma engrenagem.

A adoção de *powertrains* mais eficientes em veículos elétricos representa um passo importante para um futuro com maior sustentabilidade. Tecnologia como motor *dual three phase* PMSM promete trazer benefícios econômicos e em desempenho comparando com tecnologias que estão consolidadas no mercado. Com o desenvolvimento contínuo e a superação dos desafios existentes, os *powertrains* eficientes podem revolucionar a indústria automotiva e contribuir para a construção de um futuro mais limpo, saudável e próspero para todos. Ao empregar duas configurações trifásicas independentes em um único rotor, onde podem operar de forma conjunta ou separadamente, oferece maior confiabilidade devido à sua redundância inerente, menor ondulação de conjugado, o que proporciona um funcionamento mais suave, e a capacidade de operar com apenas um sistema trifásico, permitindo um desempenho reduzido em caso de necessidade. Além disso, essa configuração reduz os custos dos inversores e a tensão do barramento CC, tornando o sistema mais econômico e eficiente.

O motor *dual three phase* PMSM surge como uma solução inovadora para *powertrains* de carros elétricos. Essa tecnologia oferece diversas vantagens, que são esperadas, em comparação aos motores tradicionais.

- Maior eficiência: O motor *dual three phase* PMSM converte energia elétrica em movimento mecânico com maior eficiência, o que significa que o carro elétrico pode percorrer distâncias maiores com a mesma quantidade de energia.

- Maior densidade de potência: O motor dual three phase PMSM é mais compacto e leve do que os motores tradicionais, permitindo a construção de carros elétricos mais leves e eficientes.

- Maior confiabilidade: O motor *dual three phase* PMSM possui um projeto robusto, maior redundância de segurança em caso de perda de fases (FAN *et al.*, 2018).

Como fruto de pesquisa, os estudos realizado no seguinte trabalho tem como base a máquina elétrica da Kasinski Prima Electra 2000, motocicleta elétrica lançada em meados dos anos 2010. Esta motocicleta conta com um motor CC sem escovas com tensão de 48 V trifásico (MOTONLINE, 2024), a proposta é promover alterações no projeto do estator e do rotor para que atenta a topologia dual *dual three phase* PMSM e com isso analisar e apontar ganhos em eficiência e performance comparando com a sua topologia original.

2 Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica

2.1 Veículo Elétrico

Em 1901, Thomas Edison, interessado no potencial dos veículos elétricos, desenvolveu a bateria níquel-ferro, com capacidade de armazenamento 40% maior que a bateria de chumbo, só que com custo de produção muito mais elevado. As baterias níquel-zinco e zinco-ar foram também criadas no final do século XIX . Além das baterias, duas tecnologias desenvolvidas entre 1890 e 1900 contribuiriam para melhorar o desempenho dos carros elétricos: a frenagem regenerativa, um equipamento capaz de transformar a energia cinética do automóvel em movimento em energia elétrica durante uma frenagem, e o sistema híbrido a gasolina e eletricidade (BARAN; LEGEY, 2011). O início do século XX pode ser considerado o período de maior desenvolvimento do Veículo Elétrico (VE), embora os veículos com Motor de Combustão Interna (MCI) tenham sido desenvolvidos rapidamente neste período. Em Londres, no ano de 1903 havia mais VE's do que veículos à gasolina, no entanto este cenário logo mudou (LOPES, 2008; CORREA et al., 2013). Em 1898 Ferdinand Porsche (1875-1951) apresentou seu primeiro veículo, mostrado na Figura 1, o C.2 Phaeto que também ficou conhecido como P1. O primeiro protótipo do P1 foi o primeiro veículo com tração dianteira do mundo, sua motorização era composta de um pequeno motor elétrico de 3 HP acoplado transversalmente entre as rodas dianteiras, e as rodas traseiras eram as direcionais. Este veículo elétrico ainda estava longe de estar pronto para produção em série, porém foi apresentado ao público. O conceito do veículo foi descartado e outros veículos de teste foram construídos (FREITAS, 2015).

Figura 1 – Primeiro veículo de Ferdinand Porsche, conhecido como P1.



Fonte: Porsche.

A partir de 2010, verifica-se uma nova trajetória das vendas de veículos elétricos no mundo. Nota-se que as vendas partiram de cerca de 10.000 unidades em 2010 para 45.000 em 2011, para mais de 110.000 em 2012 e para aproximadamente 210.000 unidades em 2013, ou seja, o número de unidades comercializadas praticamente dobrou a cada ano a contar de 2009 a 2013 (BARASSA, 2015).

O Departamento de Energia dos EUA (DOE), em colaboração com o Conselho de Pesquisa Automotiva dos EUA, anunciou metas para veículos elétricos de passageiros para 2025 num roteiro desenvolvido em 2017. Objetivos do DOE para atingir densidade de potência de 33 kW/L, vida útil de 300.000 milhas/15 anos e custo de US\$ 6/kW para um acionamento de tração elétrica de 100 kW para permitir uma plataforma de construção altamente eficiente, compacta, confiável e acessível para veículos de passageiros (HUSAIN *et al.*, 2021).

O atendimento à autonomia de 50 milhas – cerca de 80,5 km – representa o requisito para satisfazer as necessidades básicas de cerca de 80% dos motoristas norte-americanos, conforme demonstrado na Tabela 1. No entanto, em função dos múltiplos propósitos do veículo, que pode ser utilizado em viagens ou compartilhado por vários motoristas, a autonomia demandada pelos consumidores tende a ser superior à sua média diária de deslocamento. Esses fatores explicam o maior sucesso dos híbridos, os esforços no desenvolvimento de baterias e a focalização dos projetos em áreas urbanas (HAUCH; FERREIRA, 2010).

Tabela 1 – Média de milhas diárias dos motoristas norte-americanos durante os dias da semana (em %)

	Frequência	Frequência acumulada
Maior que 5 e menor ou igual a 10	10	10
Maior que 10 e menor ou igual a 20	12	23
Maior que 20 e menor ou igual a 30	21	44
Maior que 30 e menor ou igual a 40	16	60
Maior que 40 e menor ou igual a 50	8	79
Maior que 50 e menor ou igual a 60	5	84
Maior que 60	16	100

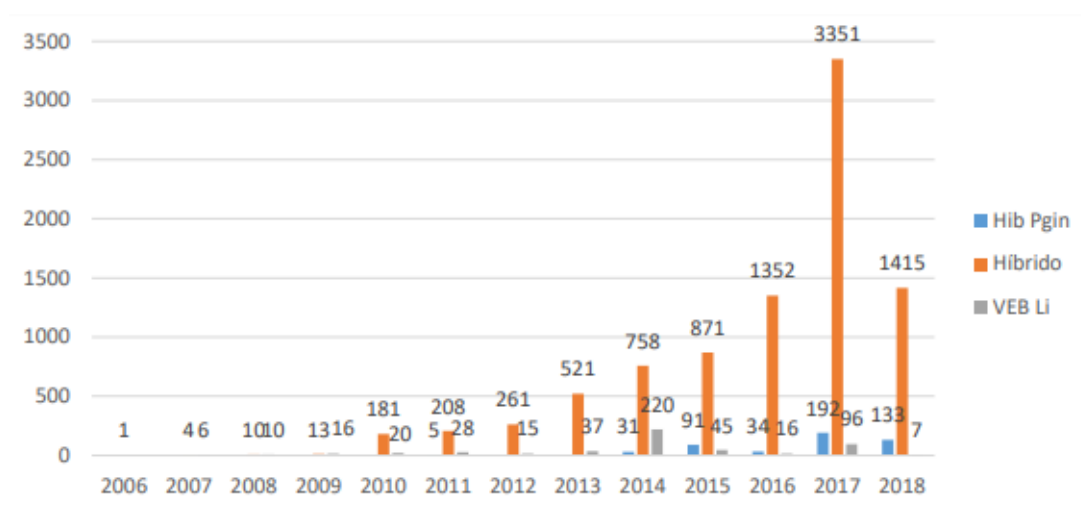
Fonte: Sandalow (2009).

Veículos elétricos certamente são diferentes dos veículos movidos com outras fontes de energias e estão em grande difusão no mercado mundial, vindo a tornar parte da economia e mobilidade nas próximas décadas. Infraestruturas, movimentos sociais e políticas públicas são fatores influentes na busca pela aceitação e divulgação do veículo elétrico. Estes novos conceitos além de possuir baixa taxa de poluição, beneficia o consumidor a gastar menos com o consumo e manutenção do mesmo. Sua adoção de uso se enquadra em uma mobilidade de transportes sustentáveis e uma real alternativa aos veículos de combustão interna que podem trazer mudanças significativas para a sociedade, tanto em aprimorar as tecnologias de transportes pessoais quanto para tornar as economias pouco dependentes do petróleo (BOTELHO, 2015).

O veículo elétrico é colocado como uma das soluções possíveis para o problema da emissão de poluentes dos veículos, dado que o veículo elétrico puro não emite qualquer poluente nocivo à atmosfera. A característica de emissão zero de poluentes tem sua justificativa no grande rol de inovações dos componentes, exemplificados pelas baterias e motores elétricos. Mesmo os veículos elétricos híbridos, os quais contemplam um motor a combustão interna em sua configuração mecânica emitem níveis de poluentes abaixo dos veículos dedicados ao motor a combustão interna (COALITION, 2009).

Segundo dados do Denatran (2019), há aproximadamente 103.380.504 veículos no Brasil, sendo que a região sudeste possui aproximadamente 47% do total de veículos, seguido pela região sul e sudeste, com 19% e 17% respectivamente. A região centro oeste com 9%, norte 5%, e ainda há 2% que não estão ligados a uma região específica. Da totalidade da frota de veículos, aproximadamente 0,01% são elétricos, sejam eles híbridos ou puros, totalizando assim aproximadamente 10.000 unidades (URIONA-MALDONADO, 2019). A Figura 2 ilustra a classificação por híbridos *plug-in*, híbridos e veículos elétricos a bateria, bem como a distribuição ao longo de 2006 a 2018 (VOLAN. T et al., 2019).

Figura 2 – Distribuição de veículos elétricos ao longo dos anos no Brasil.



Fonte: VOLAN. T.

Dado esse cenário, se questiona sob que circunstâncias a entrada de veículos leves eletrificados é estratégica tanto do ponto de vista do planejamento energético, como no contexto da transição para uma economia de baixo carbono (BRAJTERMAN, 2016). Em relação à mitigação das mudanças climáticas, as transições tecnológicas oferecem a principal possibilidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) (MIGUEZ; OLIVEIRA; MENDES, 2012). O setor de transportes é um setor-chave para gestão energética e de muita importância para estratégias de economia de baixo carbono nos próximos anos. Mundialmente, emissões antrópicas anuais de GEE aumentaram em 10 bilhões de tCO₂ entre 2000 e 2010, sendo que esse aumento vem diretamente de abastecimento de energia, indústria, transporte (11%) e setor de construção civil (3%) (IPCC, 2014). No cenário de emissões de GEE podemos destacar a expressiva contribuição do setor de transportes, cujas emissões devem aumentar até 2021 (BRASIL, 2012).


A expansão do mercado mundial de VEs é considerada por especialistas como sustentável e irreversível, uma vez que os motores possuem maior eficiência, quando comparados com motores à combustão, e também por possuírem baixa emissão de gases poluentes, tornando-os aliados para as condições normais de vida nos grandes centros urbanos. Esse avanço vem registrando ritmos acelerados de crescimento. Dados da Internacional Electric Agency (2019), indicam que a frota mundial de VEs em 2018 ultrapassou as 5 milhões de unidades. No Brasil os números são vertiginosamente menores, porém o crescimento é acelerado: a frota circulante conta com pouco mais de 18 mil VEs leves (CAMPELO, 2019)

Dentre as atitudes sustentáveis colocadas em prática pelos empreendimentos de automóveis, tem destaque a fabricação de veículos considerados ecologicamente corretos, projetados, dentre outros benefícios, para diminuir a poluição atmosférica e sonora. CNI/ANFAVE (2012, p. 36) aponta que: “Conceitualmente, os veículos caminham para inovações e tecnologias que favoreçam o meio ambiente, a mobilidade urbana e a segurança do trânsito”. Dois exemplos desses veículos são os elétricos e os híbridos, que garantem uma economia de combustível que pode chegar a até 50%. Esses automóveis apresentam vantagens importantes como a redução da emissão de gás carbônico e a melhoria do desperdício de energia (JÚNIOR; IKEDA; FILHO, 2018), Várias têm sido as medidas criadas pelas empresas automotivas em busca da sustentabilidade, que além de colocar a marca em destaque perante a sociedade, procura preservar o meio ambiente e estabelecer uma melhora da qualidade de vida para a população. Dentre essas medidas estão a criação dos veículos elétricos e/ou híbridos, com o intuito principal de diminuir a poluição atmosférica pelo CO₂ e minimizar os ruídos emitidos pelos veículos tradicionais (COSTA *et al.*, 2018). Os VEs podem ser acionados por máquinas elétricas de diferentes tipos entre elas estão: Máquinas de corrente contínua (MCC), máquinas de indução(MI), máquinas síncronas de ímãs permanentes (MSIP), máquinas de corrente contínua sem escovas (BLDC - *brushless* DC Motor), máquinas síncronas de relutância (MSR) (ZERAOULIA; BENBOUZID; DIALLO, 2006).

Com pode ser observado na Figura 3, com 15.312 emplacamentos, as vendas de veículos eletrificados leves em julho no Brasil foram as melhores de 2024 até agora, levando o acumulado do ano a superar, em apenas sete meses, o total de vendas de 2023. De janeiro a julho, o mercado nacional emplacou 94.616 veículos leves eletrificados, ultrapassando os 93.927 de janeiro a dezembro de 2023 – que já tinha sido o melhor ano da história da eletromobilidade no Brasil (Associação Brasileira do Veículo Elétrico, 2024).

Figura 3 – Número de veículos elétricos ao longo dos anos no Brasil.

SÉRIE HISTÓRICA DE VENDAS DE VEÍCULOS LEVES ELETRIFICADOS NO BRASIL
(BEV+PHEV+HEV+FLEX+MHEV) – 2012 A JULHO 2024



ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	TOTAL
2012	9	16	7	3	13	23	5	3	2	2	18	16	117
2013	45	22	53	50	12	29	65	45	23	39	52	56	491
2014	93	61	65	53	94	52	61	79	71	53	87	86	855
2015	72	56	61	73	72	74	74	100	82	55	65	62	846
2016	58	64	60	137	41	91	48	59	79	93	159	202	1.091
2017	178	157	227	176	208	238	268	627	384	243	240	350	3.296
2018	272	254	367	367	302	382	262	262	286	405	374	437	3.970
2019	370	287	336	290	357	716	960	867	1.264	1.989	2.013	2.409	11.858
2020	1.568	2.053	1.570	442	601	1.334	1.668	1.943	2.113	2.273	2.231	1.949	19.745
2021	1.321	1.389	1.872	2.708	3.102	3.507	3.625	3.873	2.756	2.787	3.505	4.545	34.990
2022	2.558	3.435	3.851	3.123	3.387	4.073	3.136	4.249	6.391	4.460	4.995	5.587	49.245
2023	4.503	4.294	5.989	4.793	6.435	6.225	7.462	9.351	8.458	9.537	10.601	16.279	93.927
2024	12.026	10.451	13.613	15.206	13.612	14.396	15.312						94.616
TOTAL GERAL (2012 A 2024)													315.047

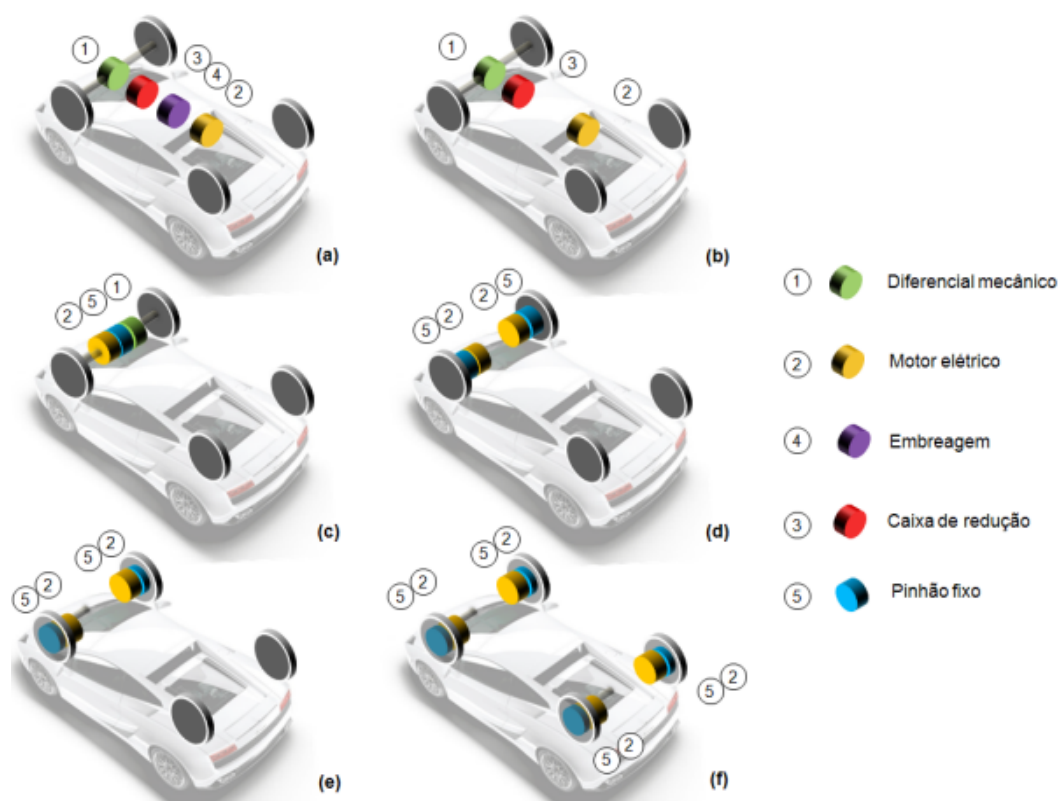
Fonte: (Associação Brasileira do Veículo Elétrico, 2024).

2.2 Sistema *In Wheel*

O sistema de motorização *In-Wheel* ou *Hub Motor* é um sistema simples. Como o próprio nome já sugere, é simplesmente a incorporação de um motor elétrico no cubo das rodas do veículo, podendo ser 4x2 ou mais comumente utilizado 4x4 (FREITAS, 2015). Aprimoramento dessa configuração consiste em integrar a caixa de redução e motor no pneumático, o que originou o chamado "*in-wheel drive*" (roda compacta, ou roda elétrica embutida no pneu), cuja arquitetura pode ser observada na Figura 4(e).

Este sistema permite que o motor tracione diretamente a roda do veículo. Os motores elétricos são controlados de forma mais simples que os motores de combustão interna, o que permite melhorar o desempenho do automóvel. Esta melhoria possibilita o desenvolvimento de outras tecnologias, tais como, prevenção de acidentes, já que com esse sistema é possível aplicar uma gama de controles inteligentes para auxílio da condução do veículo (Matsumi R, et al, 2011). Como os motores e redutores são instalados diretamente nas rodas, um sistema *In-Wheel* não precisa de um diferencial, eixo de transmissão ou outras peças quando comparado para um sistema monomotor. Livre das restrições de *layout* causado por esses componentes do sistema de acionamento, o grau liberdade no *design* de veículos é aumentada por uma Sistema *in-wheel*. Além disso, com a remoção do diferencial e o eixo de transmissão, a perda de energia é reduzida e isso permite uma redução no

Figura 4 – Ilustração evolução do veículo elétrico.



Fonte: SAMPAIO, 2011.

consumo elétrico durante o funcionamento, permitindo uma aumento na autonomia por carga (CORPORATION, 2011). A tecnologia das rodas motrizes cria um espaço vazio no veículo no local onde antes estavam os componentes mecânicos acima referidos. Isto permite que o veículo seja redesenhado, aumentando o espaço disponível, a segurança e conforto dos passageiros. O sistema de motorização *in-wheel* permite ainda que o centro de massa do veículo baixe, aumentando a sua segurança e estabilidade (FREITAS, 2015). A pesquisa e o desenvolvimento destes sistemas é algo crescente e algumas empresas estão se destacando no desenvolvimento desta tecnologia. Os principais sistemas já desenvolvidos são: Michelin com a sua *Active Wheel Drive*, Siemens com a eCorner VDO, Bridgestone com a *Dynamic-Damping In-Wheel Motor Drive System*, Mitsubishi Motors com o sistema MIEV, e Protean com o sistema *in-wheel motor technology*. O sistema da Michelin e da Siemens incorpora uma suspensão ativa ao sistema motor *In-Wheel*. Esta suspensão ativa é atuada por um segundo motor elétrico e diminui o efeito causado pelo acréscimo de peso à massa não amortecida. As Figuras 5 e 6 mostram respectivamente os sistemas da Michelin e Siemens (FREITAS, 2015).

Figura 5 – Michelin Active Wheel Drive.



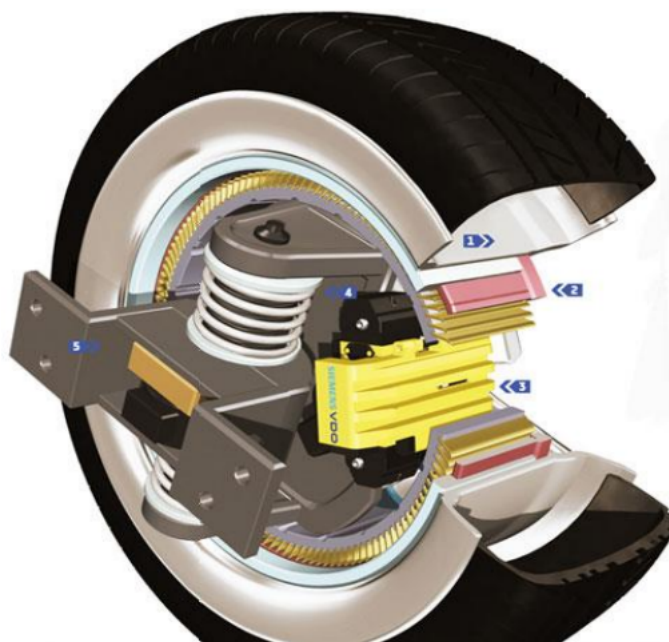
Fonte: Michelin, 2008.

Na Figura 6 está representado o sistema de tração *in wheel* da Siemens. Abaixo está descrito cada parte do sistema. 1. O conjunto: A parte externa da roda continua coberta por um pneu, mas com sensores para controlar a pressão. A revolução está dentro, onde o eCorner exige uma arquitetura padronizada, com módulos que podem ser trocados de forma simples. A Siemens VDO garante que o peso não será muito maior que o de um conjunto de roda comum.

2. Motor: Cada roda abriga um motor elétrico que trabalha sozinho ou em parceria com um motor a combustão, no caso de um carro híbrido. A prioridade, porém, é que seja 100% elétrico. Assim, o sistema de motores individuais elimina as conexões mecânicas, além de aproveitar 96% da energia.

3. Freios: Chamados de *Electronic Wedge Brakes* (EWB) são discos acionados por pequenos motores elétricos, em vez de pistões, reduzindo o peso e o espaço ocupado por dutos hidráulicos. Quando houver desaceleração, cada motor elétrico ainda funcionará como um gerador, ajudando a frear o carro, ao mesmo tempo em que aproveita a energia para recarregar as baterias.

Figura 6 – Siemens eCorner VDO.



Fonte: Siemens, 2007.

4. Suspensão: Cada roda possui um conjunto de suspensão ativa, com sensores eletrônicos aliados a amortecedores motorizados, para gerenciar o contato dos pneus com o asfalto. Todo o sistema é muito compacto, para caber dentro do aro da roda. Os sistemas auxiliares (ESP e ABS) trabalham integrados, para garantir a melhor aderência possível.

5. Direção: O sistema de direção é todo eletrônico e motorizado, abolindo as conexões mecânicas entre o volante e as rodas.

2.3 Máquina síncrona

Uma máquina síncrona é aquela na qual uma corrente alternada flui no enrolamento de armadura e um fluxo CC de rotor é produzido por uma excitação CC no enrolamento de campo ou por ímãs (UMANS, 2014). Os Motores Síncronos de Ímãs Permanentes representam uma classe de motores elétricos sem escovas que se destacam pela singularidade de seu rotor, composto por ímãs permanentes em vez de escovas mecânicas que conduzem corrente elétrica para os enrolamentos de campo no rotor. Essa configuração é distintiva e essencial nos MSIPs, pois os ímãs permanentes interagem com os enrolamentos no estator para induzir o movimento. Tal topologia não apenas garante uma operação mais silenciosa, sem a presença de escovas mecânicas, mas também promove uma maior eficiência energética, devido à minimização das perdas mecânicas e elétricas nos enrolamentos de campo. Além da construção com ímãs permanentes, os MSIPs englobam componentes adicionais como o estator e o controlador, sendo este último responsável pelo gerenciamento da corrente elétrica para o estator.

Motores síncronos de ímãs permanentes são utilizados em situações que requerem estabilidade de velocidade, possuindo eficiência e fator de potência maiores do que motores assíncronos (KRISHNA; RAO, 2011).

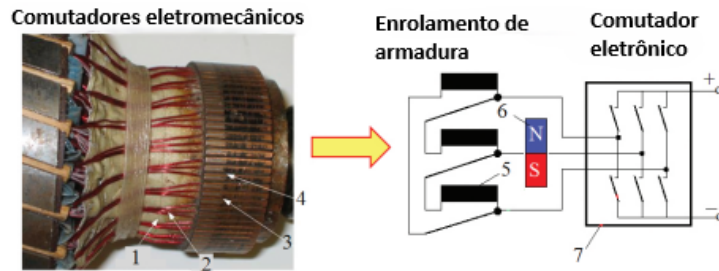
Motores síncronos de ímã permanente são usados onde altas exigências em relação à velocidade estabilidade e a operação síncrona de vários motores interligados (OZCIRA; BEKIROGLU; AYCICEK, 2008).

2.4 Máquina *Brushless* BLDC

O motor *brushless direct current* BLDC, em português, motor de corrente Contínua sem escovas, é um motor síncrono de ímãs permanentes. Por possuir estes ímãs, quando comparado a motores de indução (MI), apresenta maior eficiência, (HENDERSHOT; MILLER, 1994). O motor BLDC, não possui comutador, e por conta disto exige menor manutenção quando comparado a um motor de corrente contínua com escovas. Assim o motor BLDC se torna ideal para aplicações que exigem peso reduzido e pouco espaço para operação, pois possui elevada densidade de potência, quando comparado aos demais, (SCALCON, 2016). Os motores DC sem escova têm uma ampla gama de aplicações em áreas industriais e civis devido à alta densidade de potência, alta eficiência, acionamento simples e alta confiabilidade. A ondulação do conjugado eletromagnético é um importante indicador do desempenho do motor. Nos motores CC com escovas, 90% da manutenção está relacionada ao comutador e às escovas. O comutador eletromecânico e as escovas são as peças menos confiáveis das máquinas de escovas CC. O comutador eletromecânico pode ser substituído por um comutador eletrônico conforme mostrado na Fig. 7. O sistema de excitação PM de uma máquina de escovas CC é movido do estator para o rotor e o

enrolamento da armadura do rotor é movido para o estator. O enrolamento da armadura do estator, geralmente trifásico, é conectado a um conversor de estado sólido. No caso de um motor DC sem escovas, o conversor de estado sólido opera como um inversor (GIERAS, 2017).

Figura 7 – Comparação comutador eletromecânico e comutador eletrônico.



Fonte: GIERAS J.

- 1 – isolamento de mica,
- 2 – condutores de cobre do enrolamento do rotor (armadura)
- 3 – segmento do comutador
- 4 – isolamento de mica entre os segmentos
- 5 – enrolamento da armadura colocado no estator
- 6 – PM de alta energia colocado no rotor
- 7 – conversor de estado sólido

2.4.1 Topologia de BLDC

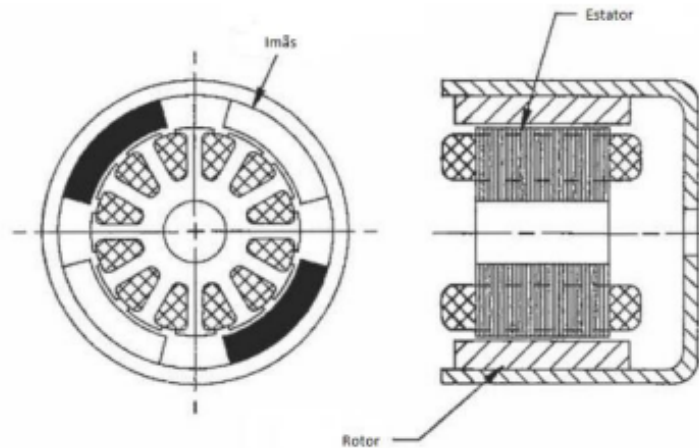
2.4.1.1 Rotor Externo

Em (HENDERSHOT; MILLER, 1994) vemos que o rotor externo é mais comum em aplicações que requerem velocidade constante. Por ser simples de produzir e ter um custo baixo, esse tipo de rotor é muito popular. O motor de rotor externo pode ser visto na Figura 8 (BICCA, 2018).

2.4.1.2 Máquina de fluxo radial com rotor Interno

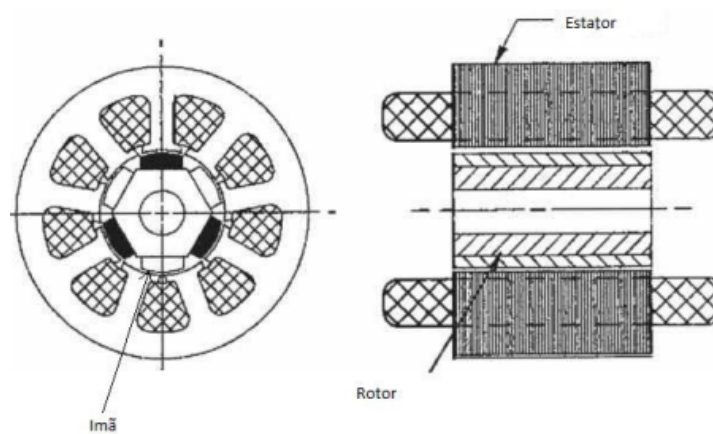
O rotor interno, Figura 9, é o mais próximo ao motor AC síncrono clássico ou a máquina de indução. O estator nessa configuração é similar ao de uma máquina de indução trifásica. Essa configuração é popular para aplicações que exigem alto conjugado e baixa rotação (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

Figura 8 – Topologia de BLDC - Rotor Externo.



Fonte: HENDERSHOT; MILLER, 1994.

Figura 9 – Topologia de BLDC - Rotor Interno.

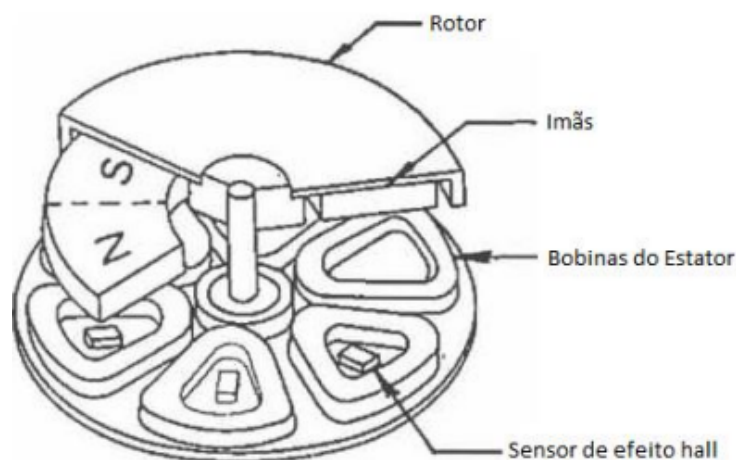


Fonte: HENDERSHOT; MILLER, 1994.

2.4.1.3 Máquina de fluxo Axial

O rotor axial, Figura 10, normalmente consiste em um rotor de disco de aço com um ímã cimentado de um lado do disco. Esse tipo de rotor é utilizado em aplicações que exigem velocidade baixa e constante. A maior vantagem desse tipo de rotor é seu baixo custo, sua forma plana e sua rotação suave (BICCA, 2018).

Figura 10 – Topologia de BLDC - Rotor Axial.



Fonte: HENDERSHOT; MILLER, 1994.

2.4.1.4 Número de fases

Máquinas multifásicas produzem menor ondulação de conjugado e apresentam maior tolerância a faltas. podemos ver na Tabela 2 que relaciona o número de fases e o desempenho dos motores (VIEIRO, 2013).

Tabela 2 – Desempenho do motor BLDC x número de fases (em %)

Número de fases	Utilização de Condutores (%)	Número de Comutadores	Oscilação de conjugado (%)
1	50	2	100
2	50	4 ou 8	30
3	67	6 ou 3	15
4	75	8	10
6	83	12	7
12	92	24	3

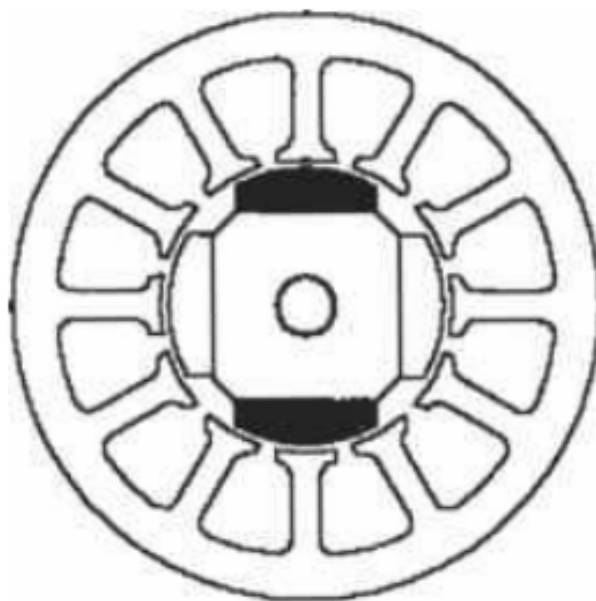
Fonte:(VIEIRO, 2014).

2.4.1.5 Número de polos

O tipo de material do ímã e o tipo de rotor utilizado influência no número de polos da máquina. Por sua vez, o número de polos influência diretamente na velocidade da máquina. Quanto maior o número de polos, mais lento se tornará o motor, em contrapartida terá um conjugado mais elevado, pois é proporcional ao número de polos. Sendo importante então considerar para a escolha do número de polos as características desejadas, tais como, velocidade, tipo do material do ímã e tipo de rotor. Conforme varia o número de polos da máquina, também varia o conceito chamado de passo elétrico. Um passo elétrico é dado quando o motor termina de passar por um polo norte e por um polo sul. Em máquinas

com somente dois polos, ou um par de polos, o motor termina o passo elétrico junto com o passo mecânico, que é dado quando o motor termina de dar uma volta completa, porém, quando aumentamos o número de polos para mais de dois polos por fase, isso deixa de ser verdade (BICCA, 2018). Na Figura 11 é possível ver a representação de um moto com dois pares de polos

Figura 11 – Topologia de BLDC - Motor com dois pares de polos.



Fonte: HENDERSHOT; MILLER, 1994.

2.4.1.6 Sensor Hall

Os sensores de efeito hall servem para determinar a posição do rotor, de modo a auxiliar o acionamento da máquina. A máquina BLDC pode ou não conter dentro dela sensores de efeito hall. Uma máquina BLDC normalmente possui três sensores de efeito hall, os quais podem ser dispostos de maneiras diferentes, porém operando da mesma maneira em todos os casos. O funcionamento do sensor de efeito hall em um motor BLDC é dado da seguinte maneira: quando o sensor detecta um polo magnético ele envia um sinal, por possuir três sensores, sempre serão gerados três sinais. Esses sinais, quando analisados juntos, fornecem a posição do rotor. Com a posição do rotor determinada o acionamento da máquina fica facilitado (BICCA, 2018).

Em cada comutação realizada, uma das fases é conectada ao terminal positivo da fonte (corrente entrando no enrolamento), outra ao terminal negativo (corrente saindo do enrolamento), e a terceira fase encontrar-se-á em aberto ou em alta impedância (não circula corrente). Um conjugado é produzido devido à interação entre o campo magnético gerado nas bobinas do estator e o rotor de imã permanente. O conjugado é máximo quando os dois campos estão a 90° um do outro, e cai conforme os campos se alinham, até tornar-se

nulo. Portanto, para o motor continuar em movimento, o campo magnético produzido no estator deve mudar de posição. Os sensores de efeito Hall realimentam o sistema de comutação eletrônica, que realiza a energização da bobinas na sequência correta para o funcionamento contínuo do motor (JANTSCH, 2021). Nas Figuras 12 e 13 é representada uma localização dos sensores Hall e dos sinais produzidos por esse tipo de sensor eletrônico.

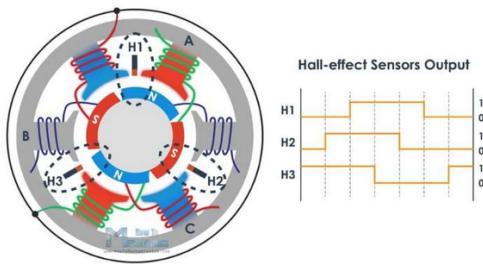


Figura 12 – Exemplos de localização dos Sensores Hall e formato de onda associado.

Fonte: (JANTSCH, 2021).

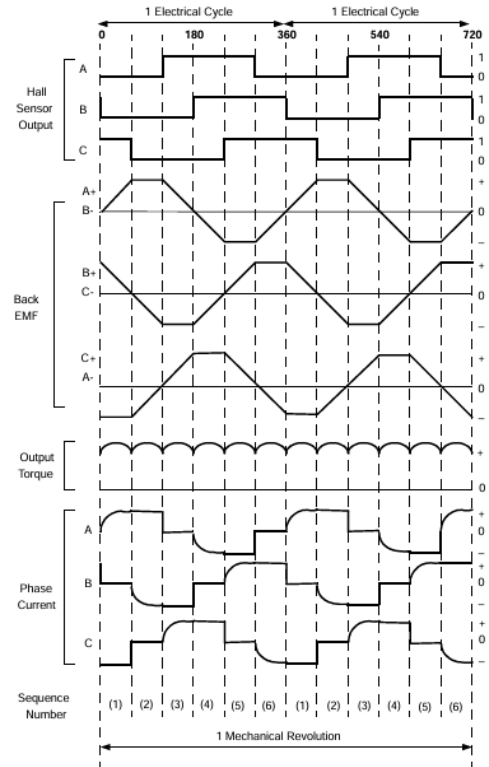


Figura 13 – Sinal do sensor Hall.

Fonte: (Microchip Technology Inc., 2004).

2.5 Tensão induzida

Na Figura 14 está representada uma vista transversal de uma máquina CA. Quando os polos do rotor estão alinhados com o eixo magnético de um enrolamento de fase do estator, o fluxo concatenado com esse enrolamento (de N_{fases} espiras em série por fase e fator de enrolamento k_{enr}) de uma fase do estator é $k_{enr}N_{fases}\Phi$, em que Φ é o fluxo de entreferro por polo. Para a densidade de fluxo senoidal de entreferro que foi assumida tem-se

$$B = B_{pico} \cos\left(\frac{polos}{2}\right)\theta_r \tag{1}$$

O valor de Φ pode ser obtido como a integral da densidade de fluxo sobre a área do polo

$$\Phi = l \int_{+\pi/polos}^{-\pi/polos} B_{pico} \cos\left(\frac{polos}{2}\theta_r\right) r d\theta \quad (2)$$

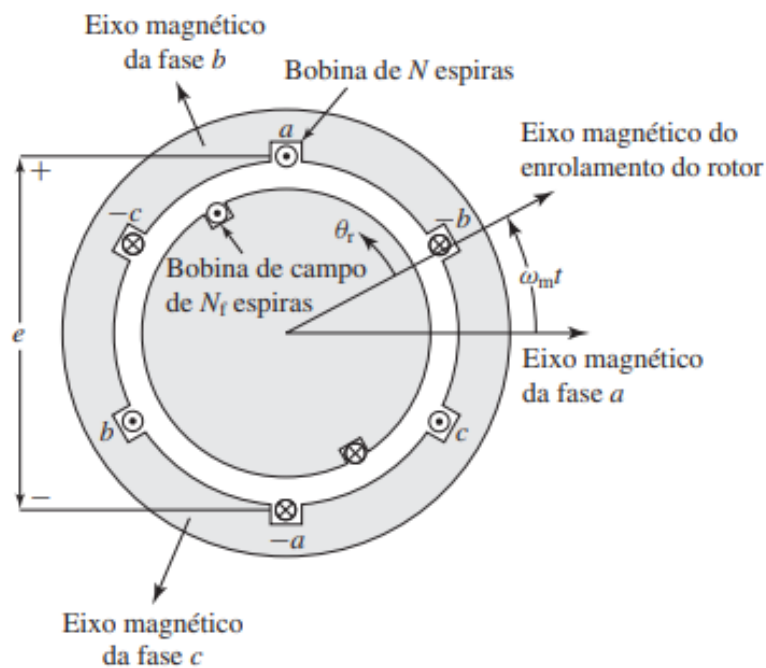
Em que,

θ_r = ângulo medido a partir do eixo magnético do rotor

r = raio até o entreferro

l = comprimento axial do ferro do estator/rotor

Figura 14 – Vista em seção transversal de uma máquina elementar CA trifásica.



Fonte: (UMANS, 2014).

À medida que o rotor gira, o fluxo concatenado de cada fase do estator varia cossenoidalmente com o ângulo entre os eixos magnéticos daquela fase e o do enrolamento de campo do rotor. Com o rotor girando na velocidade angular constante ω_m , $\theta_r = \omega_m t$.

Conforme Umans (2014), a equação do fluxo concatenado com o enrolamento da fase a do estator, levando em conta o fator de enrolamento e o cosseno do ângulo θ , é dada por:

$$\lambda_a = N k_w \Phi_a \cos\left(\left(\frac{Polos}{2}\right)\omega_m t\right) \quad (3)$$

onde:

- λ_a é o fluxo concatenado com o enrolamento da fase a do estator;

- N é o número de espiras no enrolamento da fase a ;
- k_{enr} é o fator de enrolamento;
- Φ_a é o fluxo magnético através da fase a ;
- $t =$ escolhido arbitrariamente sendo zero quando o eixo magnético do enrolamento de campo coincide com o eixo magnético da fase

Em uma máquina elétrica, o fluxo concatenado ajustado pelo fator de enrolamento e o cosseno do ângulo pode ser fundamental para determinar a tensão induzida no enrolamento da fase a usando a lei de Faraday, em que \mathcal{E}_a é a força eletromotriz (fem) induzida na fase a .

$$\mathcal{E}_a = -\frac{d\lambda_a}{dt} \quad (4)$$

2.6 Trabalho, Potência e Conjugado

No movimento retilíneo, uma força aplicada a um objeto altera sua velocidade. Na ausência de uma força líquida ou resultante, sua velocidade é constante. Quanto maior for a força aplicada ao objeto, tanto mais rapidamente será variada sua velocidade. Há um conceito similar para a rotação: quando um objeto está em rotação, sua velocidade angular é constante, a menos que um conjugado esteja presente atuando sobre si. Quanto maior for o conjugado aplicado ao objeto, tanto mais rapidamente irá variar a velocidade angular do objeto. O conjugado de um objeto é definido como o produto da força aplicada ao objeto vezes a menor distância entre a reta de ação da força e o eixo de rotação do objeto (CHAPMAN, 2013)

No movimento de rotação, o trabalho (W) é a aplicação de um conjugado τ por um ângulo. Aqui, a equação do trabalho é (CHAPMAN, 2013):

$$W = \int \tau d\theta \quad (5)$$

A potência é a taxa de produção de trabalho, ou o incremento de trabalho por unidade de tempo. A equação da potência é (CHAPMAN, 2013):

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (6)$$

De modo similar, assumindo um conjugado constante, a potência no movimento de rotação é dada por.

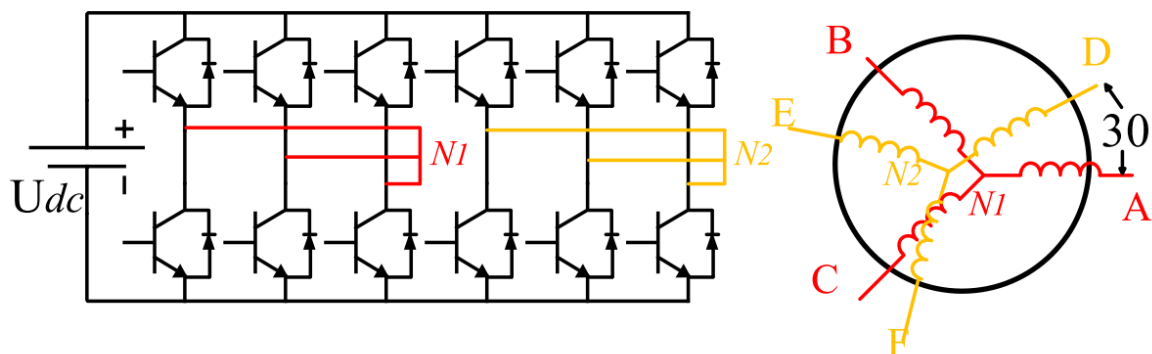
$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}(\tau\theta) = \tau\left(\frac{d\theta}{dt}\right) = \tau\omega \quad (7)$$

As unidades de conjugado são newton-metro (Nm) em unidades do SI e libra-pé no sistema inglês, para Trabalho a unidade é o joule (J) e para potência a unidade é o Watt (W) (CHAPMAN, 2013).

2.7 Sistema síncrono de ímã permanente trifásico duplo acionamentos de motor

Hoje em dia, máquinas multifásicas de ímãs permanentes atraem cada vez mais atenção em alta potência e aplicações de segurança, como veículos elétricos, navios elétricos propulsão e aeronaves elétricas (S. Che, E. Levi, et al.). A máquina síncrona de Imãs permanentes de duplo acionamento, do inglês, *DUAL 3-PHASE* PMSM têm recebido cada vez mais atenção em aplicações industriais em virtude da menor ondulação de conjugado, e melhor capacidade de tolerância a falhas em comparação com inversores trifásicos (YU *et al.*, 2021). Em vez de conversores de seis fases e controles vetoriais especiais, seria uma alternativa muito interessante fornecer essas máquinas por dois VSIs trifásicos convencionais, uma vez que eles estão prontamente disponíveis comercialmente (KARTTUNEN *et al.*, 2012). O motor trifásico duplo, que possui dois conjuntos de enrolamentos trifásicos independentes com fases deslocadas em trinta graus elétricos entre cada um dos sistemas, é mais preferido, uma vez que o controlador trifásico pode ser aplicado diretamente com a forma de transferência simples (LIU; LIU, 2021)). A topologia típica do sistema trifásico duplo é mostrada na Figura 15, onde a máquina trifásica dupla é alimentada por dois conjuntos de VSIs trifásicos simples, um conjunto é designado como ABC, o outro conjunto é designado como DEF, que é deslocado em 30° (GOPAKUMAR; RANGANTHAN; BHAT, 1993).

Figura 15 – Dual 3-phase PMSM drive system.



Fonte: (LIU; LIU, 2021).

2.8 Kasinski Prima Electra 2000

A Kasinski Prima Electra tem conjunto de baterias de 48 V e 36 Ah, que resulta em uma potência de 2.000 watts e comprimento axial de ímãs igual a 55 mm. Na hora de rodar, o piloto tem à disposição três modos de operação: Econômica, para percursos planos e sem pressa; Conforto, para trechos mais ondulados; e Esporte, para trechos mais íngremes ou que demandem maior velocidade. O peso a seco é de 128 kg e o painel completo. As rodas são de liga leve, com aros de 10 polegadas. A suspensão dianteira é convencional. O freio dianteiro é a disco e o traseiro, a tambor. O desenho é moderno e segue o padrão europeu, já que a Zongshen tem convênio de cooperação com a italiana Piaggio (Vrum, 2010). Nas medições, o Prima Electra, com seu motor de 2000 watts de potência, levou 4,3 segundos para acelerar de 0 a 30 km/h, atingindo a velocidade máxima de 43,8 km/h. Seu desempenho em declive, onde o pequeno *scooter* evoluiu até quase 70 km/h. Em subidas, onde a velocidade pode oscilar de 30 km/h a menos de 5 km/h, dependendo da angulação do aclave (RODAS, 2024).

Figura 16 – kasinski Prima Electra 2000.

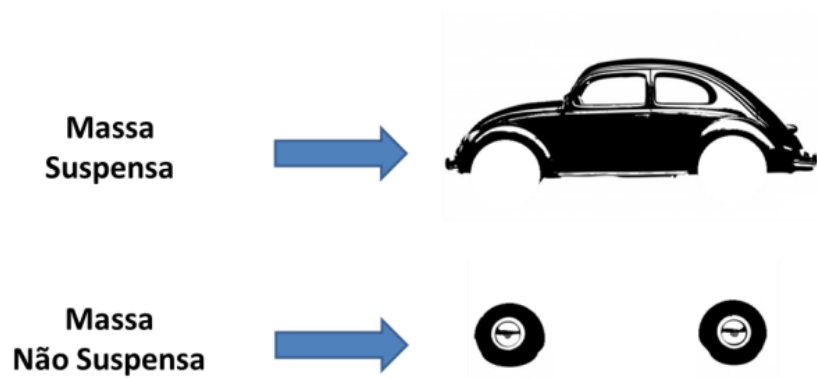


Fonte: Quatro Rodas.

2.9 Massa não Suspensa

O conforto de condução e a aderência à estrada são as principais preocupações no *design* da suspensão. No que diz respeito aos veículos elétricos *in wheel*, o motor interno introduz peso indesejado na massa não suspensa, o que afeta negativamente o desempenho da suspensão (NIE *et al.*, 2018). A massa não suspensa é o conjunto de peças que estão localizadas entre a carroceria e o solo Figura 17. Como exemplo, as rodas, pneus, amortecedores, molas, discos e pinças de freio, entre outros, fazem parte deste conjunto. Ao se adicionar mais um componente a este conjunto, o incremento de massa do mesmo é inevitável (TERRA, 2017). Para suprimir os efeitos negativos da massa não suspensa, peso leve *design*, transferência de massa, absorvedor de vibração dinâmico, vibração o isolamento e a suspensão ativa são os principais métodos (CHEN *et al.*, 2014).

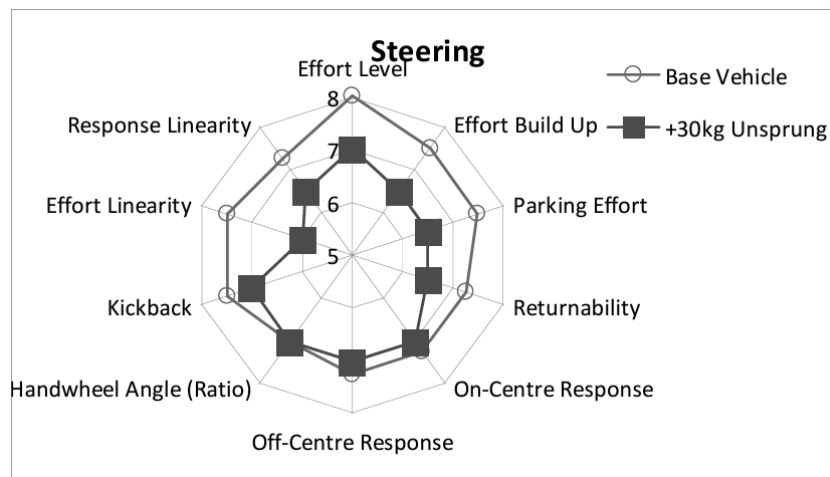
Figura 17 – Exemplo de massa não suspensa.



Fonte: TEDIM, RAFAEL, 2017.

A Figura 18 mostra os resultados do comportamento de direção do veículo padrão e modificado. Pode-se observar que normalmente existem pequenas deficiências no veículo modificado. A maior deficiência diz respeito ao esforço na direção, que se torna um pouco mais pesado sob uma ampla gama de circunstâncias. Pode-se esperar que a adição da massa não suspensa sem desenvolvimentos adicionais introduza alguma degradação (ANDERSON, 2010).

Figura 18 – Resultados para veículo base e +30 kg de massa não suspensa em cada extremidade – comportamento de direção.



Fonte:(ANDERSON, 2010).

Impacto óbvio da implementação de motores nas rodas de um veículo é aumentar a sua massa não suspensa. Efeitos um pouco menos óbvios são aumentar a inércia de guinada e melhorar a taxa de resposta de conjugado. As reservas populares em torno do aumento da massa não suspensa se baseiam na degradação do desempenho de condução e aderência (ANDERSON, 2010).

3 Metodologia

3.1 Hipótese de análise para o projeto

Nesta pesquisa, será adotada uma abordagem quantitativa descritiva. A análise será focada no desempenho e eficiência de um motor de motocicleta elétrica, utilizando resultados analíticos e numéricos obtidos por meio de testes e medições específicas. A abordagem quantitativa permite a obtenção de resultados objetivos e mensuráveis, essenciais para avaliar parâmetros técnicos como potência, conjugado, eficiência energética. Além disso, a pesquisa descritiva fornecerá uma visão detalhada das características e comportamento da máquina elétrica em diferentes condições operacionais, permitindo uma compreensão de seu desempenho geral.

3.2 Abordagem

Esta pesquisa adota uma abordagem quantitativa para analisar o desempenho de um motor elétrico *brushless* modificado utilizado em motocicletas elétricas do modelo Prima 2000 da fabricante Kazinski para ter 6 fases e pacote duplo, quando comparado com seu modelo comercial de 3 fases. A metodologia de análise é escolhida para permitir a avaliação de parâmetros técnicos, através de testes realizados em *software* computacionais. Esta abordagem visa não apenas descrever as características técnicas do motor de 6 fases, mas também identificar possíveis melhorias no projeto e na operação do sistema. O *software* de análise contribui para a obtenção de resultados robustos e confiáveis, essenciais para a validação das hipóteses levantadas no estudo.

3.3 Coleta de Dados

Os dados foram coletados em duas etapas principais: medições experimentais no Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia (LMEAE) e análise computacional no *software* Ansys.

3.3.1 Medições Experimentais

A primeira etapa da coleta de dados foi realizada no LMEAE, onde foram obtidas as dimensões e especificações técnicas da motor *brushless* de 6 fases. Foram utilizados instrumentos de medição de alta precisão. As seguintes medidas foram realizadas: .

- Diâmetro do rotor e do estator;

- Comprimento e diâmetro dos enrolamentos;
- Distâncias entre as fases;
- Tamanho do pacote dos Imãs, dimensão axial do motor.

As medições foram repetidas várias vezes para garantir a precisão e a confiabilidade dos dados coletados. Além disso, registros fotográficos e vídeos das medições foram feitos para documentação detalhada e referência futura.

3.3.2 Análise Computacional

Na segunda etapa, os dados dimensionais obtidos foram inseridos no *software* ANSYS para realizar simulações detalhadas do desempenho do motor. No ANSYS, os seguintes parâmetros foram analisados:

- Distribuição de campo magnético;
- Análise de fluxo de corrente em diferentes condições de carga;
- Estimativa de eficiência energética;
- Análise do conjugado resultante;
- Análise da tensão induzida nos enrolamentos do rotor.

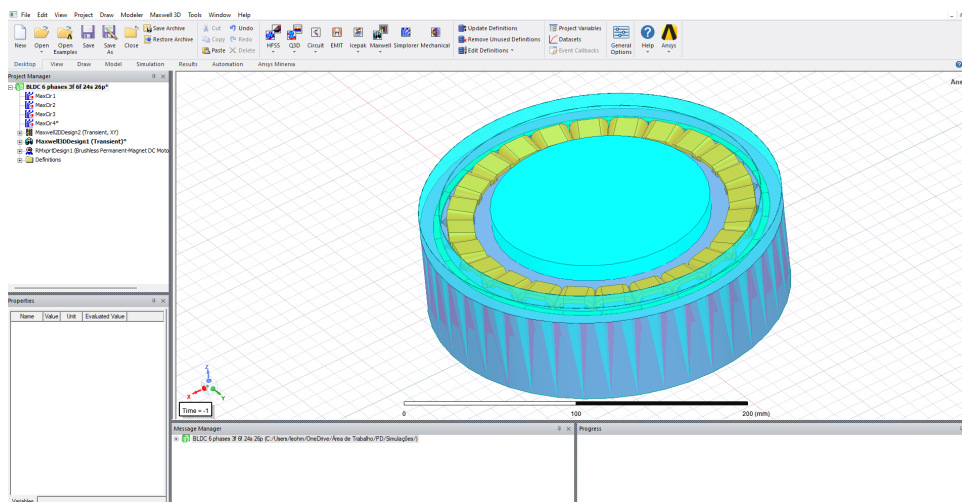
As simulações no ANSYS permitem a visualização e a análise dos resultados em diversas condições operacionais, facilitando a identificação de pontos críticos e possíveis áreas de melhoria.

Essa abordagem combinada de coleta de dados experimentais e análise computacional assegura uma compreensão abrangente e detalhada do desempenho da máquina elétrica de 6 fases

3.4 Análise da Máquina

3.4.1 Escolha do software

A modelagem computacional é fundamental pois permite simular e otimizar o motor elétrico antes mesmo de sua construção. Usando o método de elementos finitos, pode-se parametrizar a geometria e topologia da máquina a ser projetada buscando o resultado desejado. O modelo leva em conta vários aspectos do projeto, como a forma do rotor e do estator, o número de enrolamentos e a disposição dos ímãs. Essa abordagem detalhada permite entender e melhorar o comportamento do motor de maneira eficaz,

Figura 19 – software *Ansys Eletronic*.

Fonte: o Autor.

testando diferentes configurações de forma rápida e econômica. Em essência, a simulação computacional nos dá a chance de experimentar e aprimorar o motor virtualmente, garantindo que a versão final obtenha a maior performance possível.

O *software* escolhido para implementar o motor neste trabalho é o *Ansys Electronics*. Esta ferramenta permite não apenas projetar o motor configurando parâmetros essenciais, mas também realizar uma análise detalhada de diversas características elétricas e mecânicas. Com o *Ansys Electronics*, é possível simular a tensão induzida, o conjugado, a eficiência energética, Transformada Rápida de Fourier, do inglês *FFT*, bem como outras variáveis cruciais como perdas magnéticas e térmicas. O *software* oferece funcionalidades avançadas para otimização do projeto, análise de resposta em frequência, e avaliação de fenômenos transitórios e harmônicos. Além disso, permite a integração de diferentes materiais e configurações geométricas, possibilitando a criação de modelos precisos e realistas. A capacidade de realizar estudo de efeitos térmicos adicionais também são recursos valiosos que contribuem para a compreensão completa do comportamento do motor sob diversas condições operacionais. Assim, o *Ansys Electronics* se revela uma ferramenta abrangente e indispensável para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de motores elétricos eficientes e de alto desempenho. Na figura 19 esta representada a modelagem 3D da máquina no *software Ansys Eletronic*.

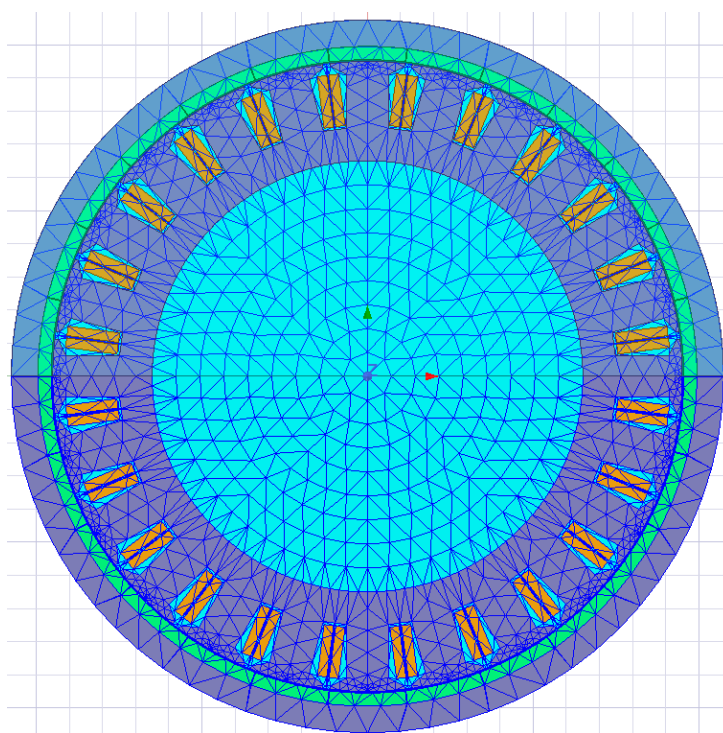
3.4.2 Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica amplamente utilizada para resolver problemas de engenharia e ciências aplicadas. Ele é especialmente útil para a análise de estruturas complexas, como motores elétricos, onde é necessário modelar o comportamento físico de diferentes materiais e interações entre componentes.

No contexto da modelagem de motores elétricos, o MEF é utilizado para dividir o sistema em elementos finitos, como pequenos blocos ou volumes, nos quais os cálculos matemáticos que descrevem o comportamento do motor são discretizadas. Essa abordagem permite a representação detalhada das propriedades físicas, como a distribuição de campos magnéticos, correntes elétricas e fluxos de calor.

O *software Ansys Electronics* utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) como método de resolução das simulações, possibilitando uma análise abrangente do comportamento eletromagnético, térmico e mecânico do motor em diversas condições de operação. Isso engloba a determinação de características cruciais, como a distribuição do fluxo magnético, a temperatura dos componentes, a distribuição de tensões e as deformações mecânicas, fornecendo uma compreensão completa do desempenho do motor. Na Figura 20 esta representada a malha traçada pelo *software* para o método dos elementos finitos

Figura 20 – Malha do método dos elementos finitos aplicado na máquina.



Fonte: o Autor.

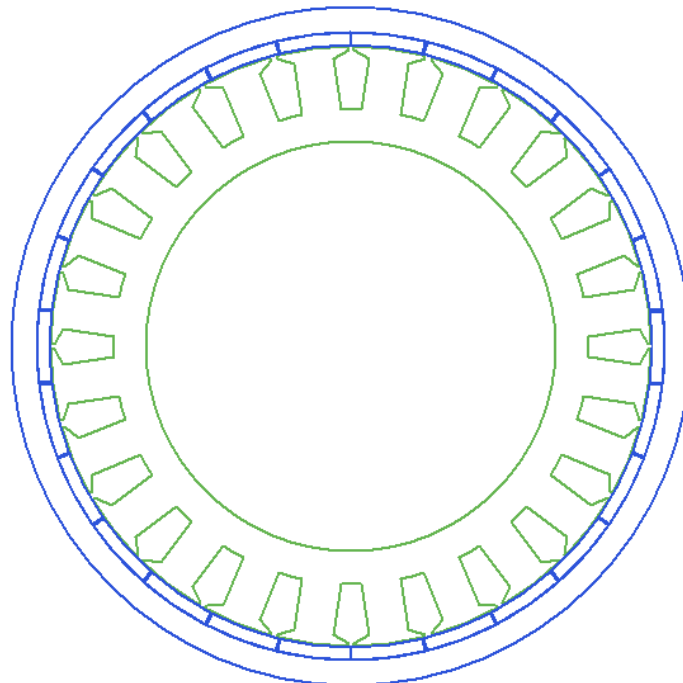
3.4.3 Início da análise

Para complementar a análise experimental, a modelagem da máquina elétrica de 6 fases foi realizada utilizando o *software Ansys Electronics* no módulo Maxwell. Este módulo é especificamente projetado para a análise e projeto de máquinas elétricas, permitindo a criação de modelos precisos e detalhados com base nas dimensões e especificações coletadas experimentalmente. No Maxwell, o motor foi modelado para simular seu desempenho em condições variadas, permitindo a avaliação de parâmetros como distribuição de campo

magnético, perdas elétricas, e eficiência energética. A modelagem também possibilitou a realização de otimizações no projeto do motor, como ajustes nas configurações dos enrolamentos e materiais utilizados, visando melhorar o desempenho geral da máquina. Os resultados obtidos a partir das simulações no RMXprt forneceram uma compreensão aprofundada do comportamento do motor, complementando e validando os dados experimentais coletados em laboratório. O RMXprt é um ambiente onde é possível, a partir de bibliotecas incluídas *software*, modelar máquinas elétricas selecionando *presets* e materiais.

Para os ímãs dos polos, foi escolhido o material NdFeB (Neodímio-Ferro-Boro). Este material é amplamente reconhecido por suas propriedades magnéticas, incluindo alta densidade de fluxo magnético e alta coercitividade, que são essenciais para a eficiência e potência do motor. O NdFeB permite a criação de campos magnéticos fortes e estáveis, que são necessários para o desempenho eficaz dos motores de alta eficiência. Além disso, a robustez do NdFeB garante a manutenção das propriedades magnéticas mesmo em altas temperaturas de operação, tornando-o ideal para aplicações em motores elétricos que exigem alto desempenho e confiabilidade. Os materiais utilizados na simulação computacional foram retirados da biblioteca do *Ansys Electronics*. Na Figura 21 está representado o modelo gerado a partir do módulo RMprt.

Figura 21 – Modelo do motor gerado no módulo RMXprt.



Fonte: o Autor.

Os parâmetros para modelagem estão listados abaixo:

- Potência nominal: 8000 W;

- Tensão nominal: 96 V;
- Velocidade nominal: 650 RPM;
- Temperatura de operação: 40° celsius;
- Material dos Imãs: NdFe35;
- Material do rotor: M19_24G;
- Diâmetro externo do rotor: 215 mm;
- Diâmetro interno do rotor: 191 mm;
- Comprimento axial: 110 mm;
- Diâmetro externo do estator: 190 mm;
- Diâmetro interno estator: 130 mm;
- Número de polos: 26 polos;
- Número de Slots: 24 Slots;
- Corrente máxima: 80 A;
- Corrente nominal: 50 A.

3.5 Análise analítica

A validação analítica comparada com simulações em *software* é um componente crucial na metodologia de projetos de engenharia, especialmente no desenvolvimento de motores elétricos. A análise analítica permite obter uma compreensão teórica dos comportamentos e características do sistema, fundamentada em princípios e equações físicas bem estabelecidas. Por outro lado, as simulações em software, como aquelas realizadas no ANSYS Maxwell, permitem modelar o comportamento do motor sob condições variadas, proporcionando uma visão detalhada e prática de seu desempenho. A comparação entre os resultados analíticos e as simulações assegura que a modelagem realizada no *software* são precisas, rápidas e refletem corretamente os fenômenos físicos envolvidos. Esta validação cruzada é essencial para identificar e corrigir possíveis discrepâncias, aumentar a confiabilidade dos resultados e garantir que o motor desenvolvido atenderá às especificações de desempenho esperadas sempre comparando com modelo analítico para garantir a acurácia do *software*. Além disso, a correlação entre os métodos analíticos e as simulações fortalece a base teórica do projeto, oferecendo uma abordagem robusta para a otimização e inovação tecnológica.

Na equação (8), definimos a tensão tangencial σ_{Ftan} no entreferro. O valor local da tensão tangencial depende da densidade de corrente linear local $A(x)$ e da densidade de fluxo local $B(x)$, $\sigma_{\text{Ftan}}(x) = A(x)B(x)$. Se uma densidade de fluxo no entreferro senoidal com valor de pico \hat{B}_δ for assumida, e uma densidade de corrente linear senoidal com valor de pico \hat{A} e valor eficaz A for aplicada, obtemos para a tensão tangencial. média:(PYRHÖNEN; JOKINEN; HRABOVCOVÁ, 2009).

$$\sigma_{\text{Ftan}} = \frac{\hat{A}\hat{B}_\delta \cos \varphi}{2} \quad (8)$$

A equação (9) fornece uma fórmula analítica para o conjugado τ que a máquina é projetada para gerar, medido em Newton-metro (Nm). V_r representa o volume do rotor, expresso em metros cúbicos (m^3), enquanto σ_{Ftan} denota a tensão tangencial média, expressa em Pascal (Pa)(PYRHÖNEN; JOKINEN; HRABOVCOVÁ, 2009).

$$\tau = 2\sigma_{\text{Ftan}}V_r \quad (9)$$

O valor eficaz da densidade linear de corrente em máquinas sem escova com alimentação retangular é calculado com a equação (10) (WILTUSCHNIG, 2016).

$$A_r = \sqrt{\frac{3}{2}}A_{ef} \quad (10)$$

As dimensões básicas da máquina são determinadas a partir da escolha de carregamentos específicos e de dados empíricos de fluxo e densidade linear de corrente no entreferro. A potência aparente da máquina pode ser calculada pela equação (11) (WILTUSCHNIG, 2016).

$$S = \frac{P_{mec}}{\eta \cos(\phi)} \quad (11)$$

A potência interna da máquina para o regime de operação como motor é dada pela equação (12) (WILTUSCHNIG, 2016).

$$S_i = [1 + 0,12 \text{sen}(\text{arcseno}(\phi)).S] \quad (12)$$

O conjugado interno é um conjugado somente para fim de dimensionamento do volume ativo da máquina (PYRHÖNEN; JOKINEN; HRABOVCOVÁ, 2009).

$$T_i = \frac{S_i}{\omega_m} \quad (13)$$

O volume ativo da máquina que se relaciona com o conjugado interno da máquina é obtido pela da equação (14). Os valores de densidade linear de corrente A_r e de fluxo

magnético no entreferro B_δ são definidos com base em tabelas empíricas e nos dados de ímãs permanentes disponíveis (WILTUSCHNIG, 2016).

$$V_A = \frac{T_i}{1,33A_r B_\delta} \quad (14)$$

As equações explicitadas acima serão de suma importância para a validação das simulações realizadas no *Software* ANSYS. Nesta etapa do projeto, será possível analisar, investigar e comparar a viabilidade e aplicação dos dados coletados por meio de medições experimentais e testados no ANSYS. A correlação entre os resultados das equações teóricas e as simulações computacionais fornecerá uma base sólida para garantir a precisão e confiabilidade do modelo simulado. Essa análise comparativa permitirá identificar discrepâncias, ajustar parâmetros e validar a eficácia do modelo, contribuindo assim para o aprimoramento e aperfeiçoamento do projeto do motor elétrico de 6 fases.

4 Resultados

4.1 Estudo Analítico

Em (PYRHÖNEN; JOKINEN; HRABOVCOVÁ, 2009) é apresentado valores típicos de densidade de corrente linear A_r e densidade de fluxo no entreferro \hat{B}_δ determinados de forma empírica, esses valores podem ser verificados abaixo na tabela 3.

Tabela 3 – Valores de densidade de corrente linear A_r e densidade de fluxo no entreferro \hat{B}_δ

	Intervalos das grandezas de Densidade de corrente linear RMS e de Densidade de fluxo no entreferro para máquinas síncronas
$A_r/\text{kA/m, RMS}$	35-65
\hat{B}_δ/T	0,85-1,05
$\sigma_{Ftan}/\text{Pa mínimo}$	21.000
$\sigma_{Ftan}/\text{Pa médio}$	33.500
$\sigma_{Ftan}/\text{Pa máximo}$	48.000

Fonte: Pyrhonen.

Com os dados referentes as dimensões físicas da máquina é possível determinar, de forma analítica, valores de conjugado que são esperados que a máquina alcance. Utilizando as equações (8) (9) e (10) e ajustando a equação considerando que a máquina vai receber uma alimentação de forma senoidal, obtemos a equação (15).

$$\tau = \frac{A\hat{B}_\delta V_r}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

Utilizando os valores mínimos e máximos de densidade de corrente e densidade de fluxo no entreferro, respectivamente, obtemos os seguintes valores de conjugado;

$$\tau_{mín} = 84,01Nm$$

Valor para o conjugado mínimo considerando fator de potencia igual a 1.

$$\tau_{máx} = 192,72Nm$$

Valor para o conjugado máximo considerando fator de potencia igual a 1.

Para o projeto deve-se levar em consideração suas características construtivas para calcular o conjugado. Como diâmetro interno do rotor, D , Numero de ranhuras, N_s , número

de espiras por bobina m e considerando que há duas bobinas em cada ranhura da máquina, com essas grandezas podemos obter o valor de densidade linear de corrente.

$$A_{Teórico} = \frac{2I_s N_s m}{\pi D} \quad (16)$$

$$A_{Teórico} = 17766,14$$

kA/m

Valor da densidade de corrente teórico

Utilizando a equação (14) podemos definir o conjugado interno teórico, equação (17), para a máquina do projeto, para fins de cálculo foi utilizado um valor de \hat{B} indicado em Pyrhonen (2009), $\hat{B} = 0,85T$.

$$\tau_{Teórico} = Va1,33A\hat{B} \quad (17)$$

$$\tau_{Teórico} = 80,20$$

Nm

Valor do conjugado teórico

Com o valor de Conjugado calculado anteriormente e a velocidade nominal informada na seção anterior, 650 RPM, é possível determinar a potência mecânica que essa máquina deve atingir.

$$P_{Teórico} = \tau_{Teórico}\omega = \frac{\pi}{30}\tau_{Teórico}N \quad (18)$$

$$P_{Teórico} = 5459,04W$$

Valor da potência teórica

O valor obtido analiticamente a partir do cálculo da densidade linear de corrente teórica, $\tau_{Teórico}$, aproximou-se do valor de conjugado τ calculado com base nos valores normativos retirados da literatura de Pyrhonen.

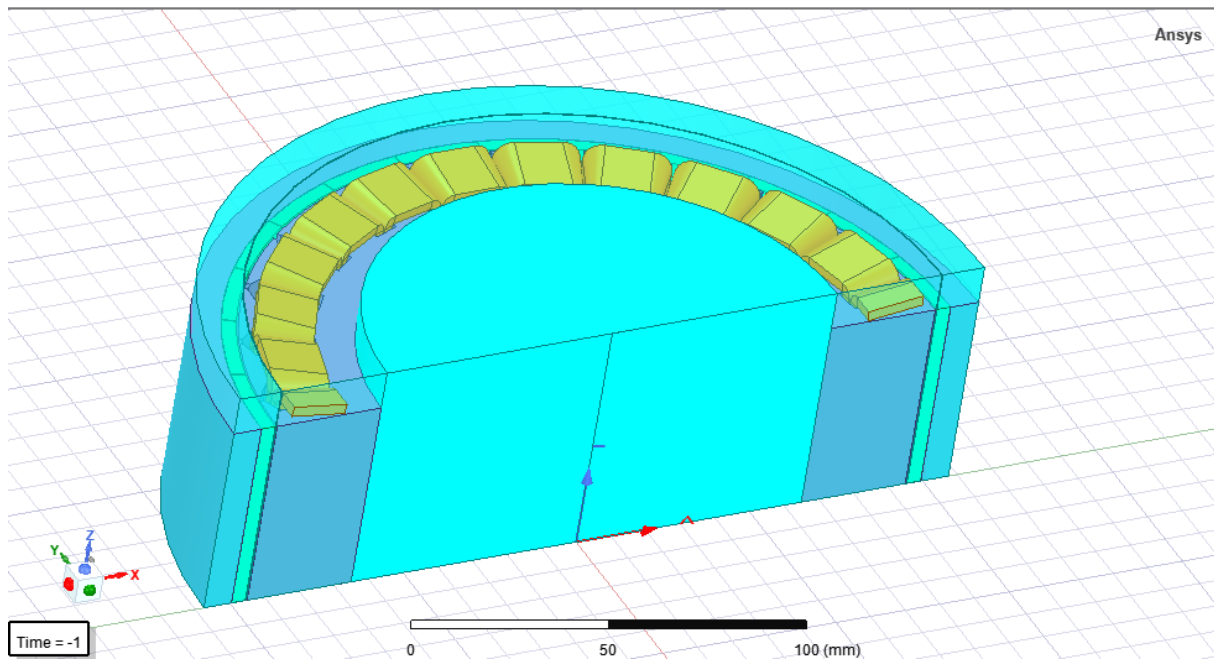
4.1.1 Simulação do Modelo

A modelagem da máquina no *software* Ansys Electronics foi realizada utilizando o ambiente Maxwell, o qual é especializado em simulações eletromagnéticas. A modelagem iniciou-se com o uso do módulo RMXprt, que permitiu a criação automatizada de um

modelo preliminar da máquina com base nas especificações fornecidas. Esse modelo foi então refinado e validado através de uma análise detalhada utilizando o módulo Maxwell, que emprega o método dos elementos finitos (FEM) para resolver problemas de campos eletromagnéticos.

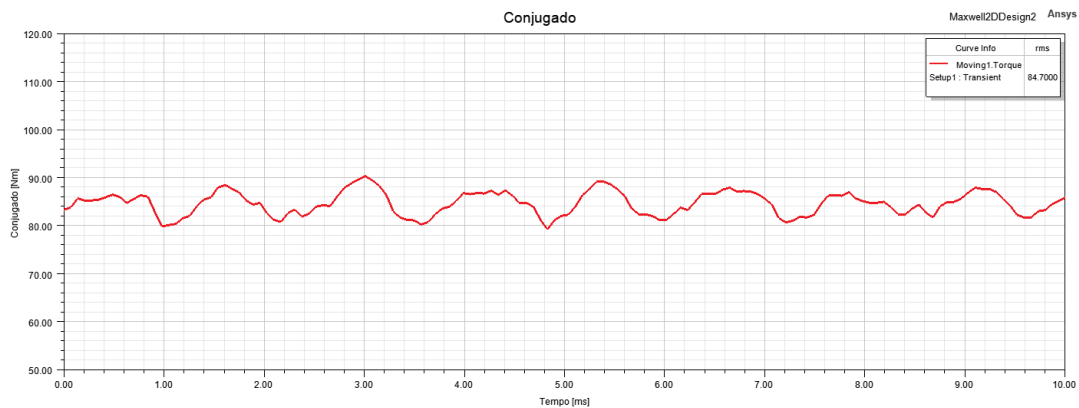
No ambiente Maxwell, foram gerados tanto modelos 2D quanto 3D, possibilitando a avaliação das interações eletromagnéticas e a identificação de possíveis cenários de falhas. Na 22 esta representada o modelo 3D da máquina projetada no *software*.

Figura 22 – Simetria do modelo 3D da máquina.



Fonte: o Autor.

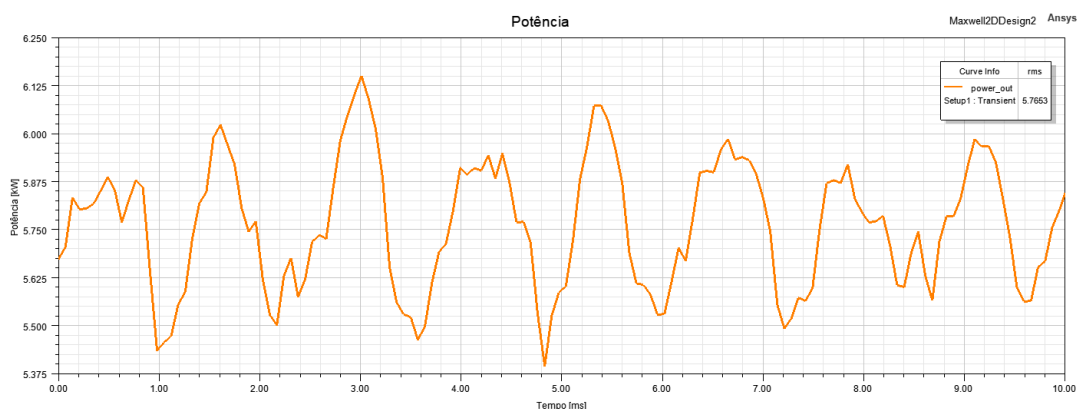
Uma das limitações do *software* é a impossibilidade de controlar de forma precisa o acionamento da máquina, uma vez que o *software* gerencia automaticamente o processo de acionamento. Dessa forma, a posição inicial de acionamento do motor será de $9,81^\circ$. A Figura 23 apresenta o conjugado gerado pelo modelo no *software*, com um valor de $84,7 \text{ Nm}$. Este valor está dentro da faixa especulada com base nos valores apresentados por Pyrhonen em sua bibliografia e corresponde ao valor obtido teoricamente através do cálculo da densidade de corrente linear para as características deste modelo de máquina.

Figura 23 – Conjugado gerado pela máquina no *software*.

Fonte: o Autor.

Fazendo um paralelo com o motor que serviu de inspiração para este projeto, que equipa a motocicleta kasinski Prima Electra 2000, houve um aumento de 44% no conjugado do motor considerando o *redesign* feito no motor e que o motor original tenha 4 kW. É importante deixar claro que o projeto incrementou o tamanho do pacote de 55 mm para 110 mm.

A potência encontrado no modelo simulado foi de 5,76 kW e esta de acordo com o que foi calculado analiticamente. Como a potencia é uma grandeza que esta relacionada diretamente proporcional com o conjugado é possível identificar uma forma de onda similar a curva de conjugado

Figura 24 – Potência gerada pela máquina no *software*.

Fonte: o Autor.

Por facilidade de encontrar no mercado controladores que sejam capazes de acionar essa tipo de de máquina levando em consideração sua topologia foi utilizado no estudo o acionamento de forma senoidal, não havendo mudança da disposição no *layout* de enrolamento das bobinas. Na figura 25 esta representada a disposição das fases na máquina projetada.

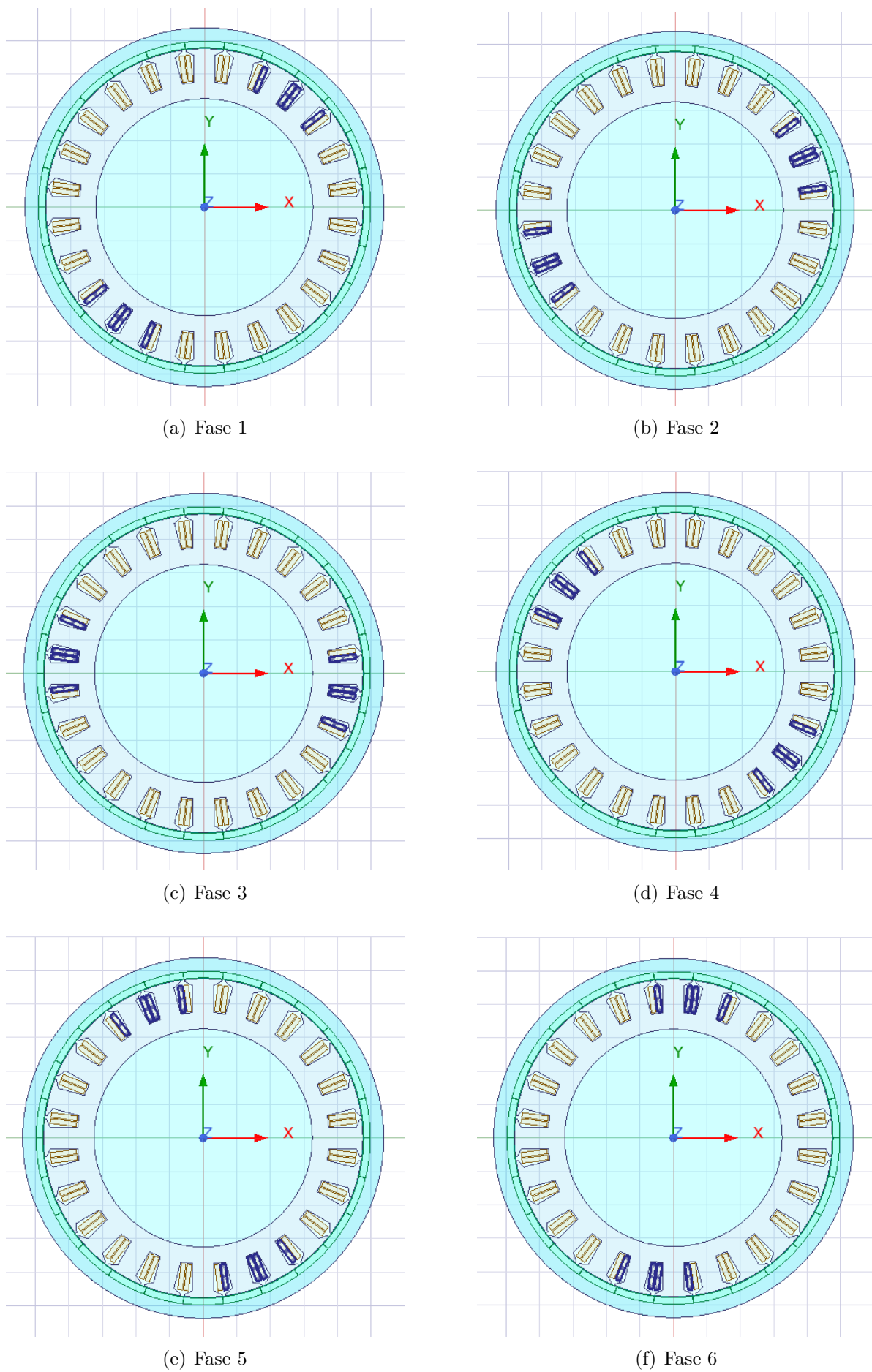
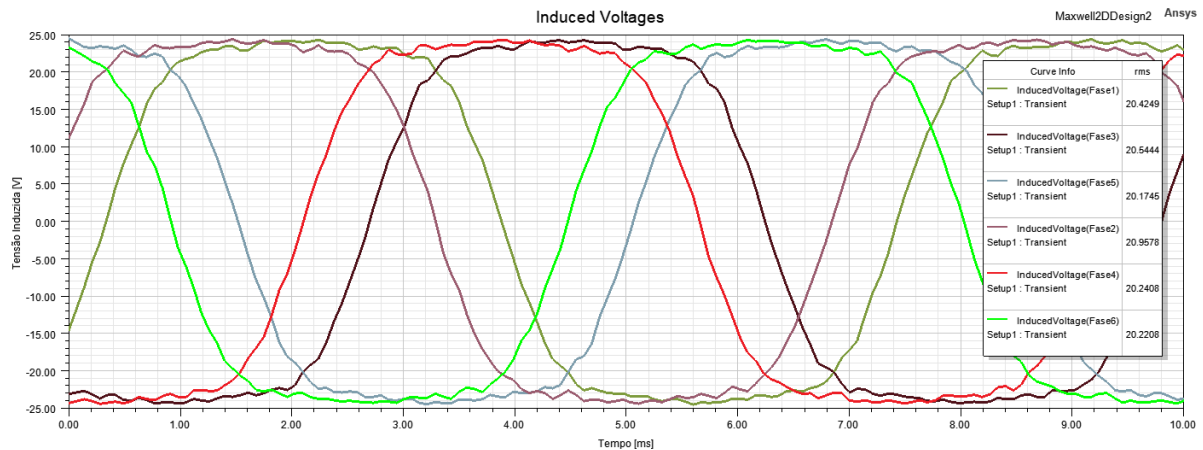


Figura 25 – Disposição das Fases Da Máquina.

Na Figura 26, esta representado a tensão induzida na máquina, é possível observar um pequeno *ripple* nos picos e vales da forma de onda. Esse comportamento da forma de onda leva a crer que a disposição dos enrolamentos da máquina deveriam ser rearranjados de outra forma, de maneira a atenuar esse *ripple*.

Figura 26 – Tensão induzida pela máquina no *software*.

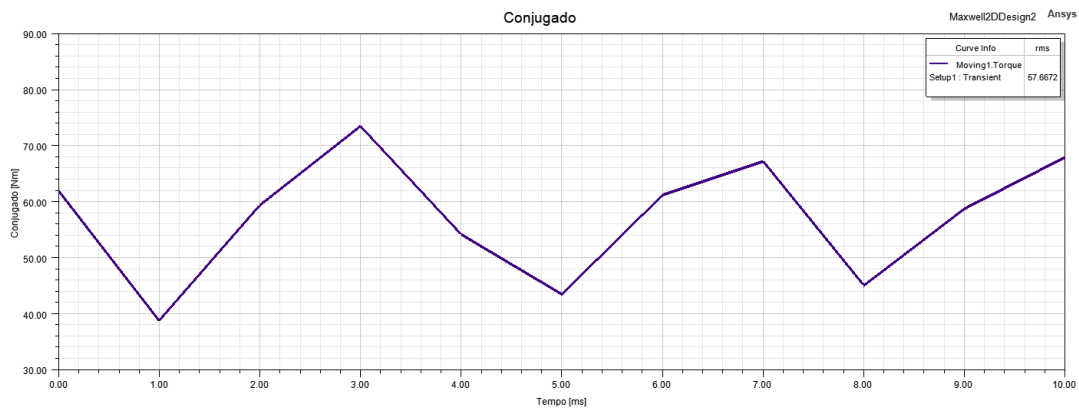


Fonte: o Autor.

O acionamento senoidal, com sua forma de onda suave e contínua, resulta em transições mais graduais e menos variações abruptas no torque, além de possuir menos harmônicos, o que reduz ainda mais o *ripple* de conjugado. Em contraste, o acionamento retangular, com suas transições bruscas, gera variações rápidas e significativas na corrente e no conjugado, contendo mais harmônicos que contribuem para variações adicionais. Além disso, nos motores BLDC, a comutação das bobinas é menos suave com correntes retangulares, aumentando o *ripple* de conjugado. Sistemas de controle de corrente senoidal, geralmente mais sofisticados, permitem um controle mais preciso do conjugado, minimizando as variações indesejadas.

Um possível cenário de falha é a perda de umas ou mais fases da máquina, uma máquina de 6 fases possibilita redundâncias caso isso ocorra. Na Figura 27 é mostrado o conjugado da máquina com perda de fases.

Figura 27 – Conjugado com perda de duas fases.

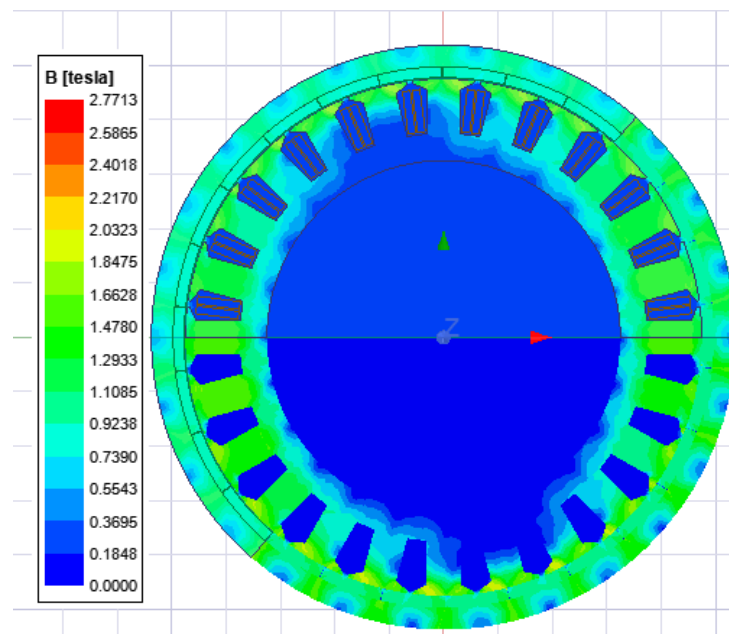


Fonte: o Autor.

Para simular a perda de fase, a alimentação das fases 1 e 4 foram retirada, representando um evento em que ocorre a perda de uma fase de cada sistema trifásico. Mesmo com essa perda, o conjugado resultante foi de 57,67 Nm, e a máquina continuou operando, mantendo seu movimento de rotação.

A análise da densidade de fluxo magnético no motor projetado foi realizada utilizando o *software*, conforme representado na Figura 28.

Figura 28 – Densidade de fluxo magnético simulada.



Fonte: o Autor.

Observa-se que o valor escolhido para a densidade de fluxo no entreferro, $\hat{B} = 0,85T$, utilizado no cálculo do conjugado teórico ($\tau_{T\text{eórico}}$), está próximo do valor obtido na simulação realizada no *software*.

5 Conclusão

Foi desenvolvido e analisado um motor síncrono de ímã permanente para acionamento trifásico duplo (*Dual Three-Phase PMSM*) para aplicações em veículos elétricos, com um foco específico em motocicletas. A partir de uma abordagem analítica e computacional, utilizando o método dos elementos finitos (FEM), foi possível simular diferentes cenários operacionais e identificar os principais parâmetros de desempenho da máquina.

Os resultados da simulação revelaram que o motor projetado alcançou uma potência de 5,76 kW, alinhando-se perfeitamente com os cálculos analíticos preliminares. Em termos de conjugado, o motor apresentou um conjugado de 84,7 Nm, o que representa um aumento substancial de 338,8% em comparação com o motor de referência da Kasinski Prima Electra 2000. Este aumento significativo em torque demonstra a capacidade do motor projetado de fornecer maior força motriz, essencial para o desempenho dinâmico de veículos elétricos.

Um dos pontos mais relevantes do estudo foi a análise do acionamento senoidal. Este tipo de acionamento mostrou-se altamente eficaz na redução do *ripple* de conjugado, que é uma variação indesejada no torque gerado pelo motor. A redução do *ripple* contribui para um funcionamento mais suave e eficiente da máquina, melhorando a experiência de condução e a eficiência energética do veículo. A robustez do motor também foi testada em cenários de falha, como a perda de uma ou mais fases do sistema. Mesmo em tais condições adversas, o motor manteve um desempenho operacional aceitável, evidenciando a confiabilidade e a redundância inerente à configuração de seis fases. Esta característica é crucial para aplicações práticas, onde a segurança e a continuidade de operação são fundamentais.

Além dos estudos técnicos realizados, a principal vantagem econômica de utilizar um projeto de máquina *Dual Three phase PMSM* é a maior facilidade em encontrar inversores trifásicos no mercado, em comparação com inversores que controlam mais de três fases. Os inversores de frequência hexafásicos tendem a ser significativamente mais caros, pois geralmente são considerados projetos especiais pelos fabricantes, o que eleva o custo da aplicação.

Em suma, a pesquisa realizada valida a viabilidade e a eficiência do motor síncrono de ímã permanente trifásico duplo como uma solução promissora para veículos elétricos. Os resultados obtidos não apenas superam as capacidades dos motores tradicionais, mas também oferecem vantagens significativas em termos de desempenho, eficiência energética, confiabilidade e custo-benefício. Com o desenvolvimento contínuo e a superação dos desafios tecnológicos, esta configuração de motor pode revolucionar a indústria automotiva, contribuindo para um futuro mais limpo, sustentável e eficiente.

6 Trabalhos Futuros

Abaixo estão citadas as principais propostas para trabalhos futuros, com o intuito de melhorar o *design* e o entendimento do projeto proposto nesse projeto de diplomação.

- Projeto do terminal de conexão para alimentação da máquina, expandindo sua versatilidade para suportar tanto acionamento senoidal quanto retangular.
- Análise comparativa da aplicação de dois inversores trifásicos em relação a um inversor hexafásico, focando no aspecto econômico.
- Concluir a montagem da máquina e realizar testes em bancada afim de validar resultados obtidos nesse projeto de diplomação.
- Análise térmica para avaliar elevação de temperatura para evitar a desmagnetização dos Imãs.

Referências Bibliográficas

- ANDERSON, M. J. Unsprung mass with in-wheel motors-myths and realities. In: . [s.n.], 2010. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:197867400>>.
- ANDRESEN, E.; BIENIEK, K. 6 - phase induction motors for current - source inverter drives. In: *1981 Annual Meeting Industry Applications Society*. [S.l.: s.n.], 1981. p. 607–618.
- Associação Brasileira do Veículo Elétrico. *Vendas de eletrificados em 2024 já ultrapassam total de 2023*. 2024. Acesso em: 26 ago. 2024. Disponível em: <<https://abve.org.br/vendas-de-eletrificados-em-2024-ja-ultrapassam-total-de-2023/>>.
- BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no brasil. *BNDES Setorial*, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, Rio de Janeiro, v. 33, p. 207–224, mar 2011.
- BARASSA, E. *Trajectoria tecnológica do veículo elétrico: atores, políticas e esforços tecnológicos no Brasil*. Tese (Doutorado) — [sn], 2015.
- BICCA, P. F. *Desenvolvimento de uma bicicleta elétrica com motor BLDC*. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Maria.
- BOTELHO, P. J. F. *A expansão do veículo elétrico em Portugal*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Lisboa (Portugal), 2015.
- BRAJTERMAN, O. Introdução de veículos elétricos e impactos sobre o setor energético brasileiro. *Rio de Janeiro-RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ*, 2016.
- BRASIL, M. Ministério de minas e energia, empresa de pesquisa energética. *MME/EPE: Plano Decenal de Expansão de Energia 2021*, 2012.
- CAMPELO, D. R. Condições para o desenvolvimento do mercado de veículos elétricos no brasil. 2019.
- CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. 5. ed.. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. Editado também como livro impresso em 2013. ISBN 978-85-8055-207-2.
- CHEN, X.; YIN, J.; GU, C.; TANG, F.; WANG, X. The research and development of direct wheel drive system with reducer for suppressing unsprung mass negative effects. In: *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.
- COALITION, E. Electrification roadmap: Revolutionizing transportation and achieving energy security. *Electrification Coalition, Washington, DC*, 2009.
- CORPORATION, N. Ntn technical review no. 79. Japão, 2011.
- COSTA, I. M. d. *et al.* Automóveis híbridos na indústria 4.0 e no brasil. In: UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS. *Anais do Simpósio de Engenharia de Produção*. Catalão: SIENPRO, 2018. v. 2.
- FAN, L.; YANG, T.; RASHED, M.; BOZHKO, S. Sensorless control of dual-three phase pmsm based aircraft electric starter/generator system using model reference adaptive system method. In: *CSAA/IET International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS 2018)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 787–794.

- FREITAS, D. Z. *Análise de Eficiência e Controle de um Sistema Integrado Roda-Motor Elétrico*. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Pontifícia Universidade . . . , 2015.
- GIERAS, J. F. *Electrical Machines: Fundamentals of Electromechanical Energy Conversion*. Boca Raton: CRC Press, 2017. ISBN 9781498708838.
- GOPAKUMAR, K.; RANGANTHAN, V. T.; BHAT, S. R. Split-phase induction motor operation from pwm voltage source inverter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, v. 29, n. 5, p. 927–932, 1993.
- HAUCH, B. d. C.; FERREIRA, T. *Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades*. [S.l.]: Veículos, 2010.
- HENDERSHOT, R. J.; MILLER, T. J. E. *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*. [S.l.]: Oxford University Press, 1994. 582 p.
- HUSAIN, I.; OZPINECI, B.; ISLAM, M. S.; GURPINAR, E.; SU, G.-J.; YU, W.; CHOWDHURY, S.; XUE, L.; RAHMAN, D.; SAHU, R. Electric drive technology trends, challenges, and opportunities for future electric vehicles. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 109, n. 6, p. 1039–1059, 2021.
- JANTSCH, L. C. *Desenvolvimento de um controlador de motores Brushless DC baseado em FPGA para uso em veículos elétricos*. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021. Acesso em: 14 ago. 2024. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/222462>>.
- JÚNIOR, A. A. d. M.; IKEDA, A. H.; FILHO, R. S. R. C. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Administração e Economia), *Veículos Elétricos: O Futuro da Indústria Automobilística*. São Paulo: [s.n.], 2018.
- KARTTUNEN, J.; KALLIO, S.; PELTONIEMI, P.; SILVENTOINEN, P.; PYRHÖNEN, O. Dual three-phase permanent magnet synchronous machine supplied by two independent voltage source inverters. In: *International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 741–747.
- KRISHNA, D. S.; RAO, C. S. Speed control of permanent magnet synchronous motor based on direct torque control method. *International Journal of Advances in Science and Technology*, v. 3, n. 2, 2011.
- LIU, S.; LIU, C. Virtual-vector-based robust predictive current control for dual three-phase pmsm. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 68, n. 3, p. 2048–2058, 2021.
- Microchip Technology Inc. *Understanding and using the PIC16F84*. [S.l.], 2004. Disponível em: <<https://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>>.
- MIGUEZ, J. D. G.; OLIVEIRA, A. S. d.; MENDES, T. d. A. O desafio das novas tecnologias de mitigação da mudança do clima no contexto do desenvolvimento sustentável. *Parcerias Estratégicas*, v. 15, n. 31, p. 211–234, 2012.
- MOHAPATRA, K.; BAIJU, M.; GOPAKUMAR, K. Independent speed control of two six-phase induction motors using a single six-phase inverter. *EPE Journal*, v. 14, p. 49–62, 08 2004.
- MOTONLINE. *Teste Kasinski Prima Electra 2000*. 2024. Disponível em: <<https://www.motonline.com.br/noticia/teste-kasinski-prima-electra-2000/>>.

- NIE, S.; ZHUANG, Y.; CHEN, F.; WANG, Y.; LIU, S. A method to eliminate unsprung adverse effect of in-wheel motor-driven vehicles. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 37, n. 4, p. 955–976, 2018.
- OZCIRA, S.; BEKIROGLU, N.; AYCICEK, E. Speed control of permanent magnet synchronous motor based on direct torque control method. In: *2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 268–272.
- PYRHÖNEN, J.; JOKINEN, T.; HRABOVCOVÁ, V. *Design of Rotating Electrical Machines*. Hoboken, NJ: Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-69516-6.
- RODAS, Q. *Kasinski Prima Electra*. 2024. <<https://quatorrodas.abril.com.br/testes/kasinski-prima-electra>>. Acesso em: 16 de Abril de 2024.
- SCALCON, P. F. *Estudo e Desenvolvimento de Estratégias de Controle de Velocidade Aplicados à Máquina BLDC Hexafásica*. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- TERRA, R. T. *Avaliação do desempenho dinâmico de veículo, devido ao incremento de massa não suspensa, decorrente de sistema de propulsão elétrica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Controle e Automação Mecânica) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Acesso em: 2024-08-17.
- UMANS, S. *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. 7. ed.. ed. AMGH Editora, 2014. ISBN 9788580553741. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=3Fa2AAQBAJ>>.
- URIONA-MALDONADO, M. Panorama do estado atual da difusão de veículos elétricos no brasil tainara volan caroline rodrigues vaz. 2019.
- VIEIRO, J. S. *Modelagem Matemática e Controle do Motor Brushless DC*. Trabalho de Conclusão de Curso — Unipampa, 2013.
- WILTUSCHNIG, I. P. *Texto completo*. Dissertação (Mestrado) — Instituição não mencionada, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/149350>>.
- YU, K.; WANG, Z.; LIU, P.; CHEN, Y. Modeling and compensation of nonlinearity in voltage-source-inverters fed dual three-phase pmsm drives. In: *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 4676–4681.
- ZERAOUlia, M.; BENBOUZID, M. E. H.; DIALLO, D. Electric motor drive selection issues for hev propulsion systems: A comparative study. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 55, n. 6, p. 1756–1764, 2006.