

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL - UCS
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA MECÂNICA

LETICIA GONÇALVES TOBIAS DOS SANTOS

AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO DE TOPOLOGIAS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS
PARA TRAÇÃO VEICULAR

CAXIAS DO SUL

2025

LETICIA GONÇALVES TOBIAS DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO DE TOPOLOGIAS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS
PARA TRAÇÃO VEICULAR**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção de título de Mestra em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul.

Área de concentração: Projeto e Fabricação.

Linha de pesquisa: Desempenho e Controle de Sistemas Energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Holsbach Costa.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert.

CAXIAS DO SUL

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

S237a Santos, Leticia Gonçalves Tobias dos
Avaliação multicritério de topologias de máquinas elétricas para tração
veicular [recurso eletrônico] / Leticia Gonçalves Tobias dos Santos. – 2025.
Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.

Orientação: Guilherme Holsbach Costa.

Coorientação: Paulo Roberto Eckert.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Máquinas elétricas. 2. Motores elétricos. 3. Propulsão elétrica. 4.
Processo decisório por critério múltiplo. 5. Engenharia mecânica. I. Costa,
Guilherme Holsbach, orient. II. Eckert, Paulo Roberto, coorient. III. Título.

CDU 2. ed.: 621.313

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Ana Guimarães Pereira - CRB 10/1460

LETICIA GONÇALVES TOBIAS DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO DE TOPOLOGIAS DE MÁQUINAS
ELÉTRICAS PARA TRAÇÃO VEICULAR**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção de título de Mestra em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul. Área de concentração: Projeto e Fabricação.

Linha de pesquisa: Desempenho e Controle de Sistemas Energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Holsbach Costa.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert.

Aprovada em 09/06/2025.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Guilherme Holsbach Costa
Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Dr. Leandro Luis Corso
Universidade de Caxias do Sul (UCS)

Prof. Dr. Igor Pasa Wiltuschnig/Convidado Externo
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Acionamento de motor em VEs e em aplicações industriais	23
Figura 2 – Diagrama das principais topologias de motores para tração elétrica.....	25
Figura 3 – Máquinas de propulsão elétrica consideradas para o estudo de caso	26
Figura 4 – Geometrias dos rotores com ímãs permanentes.....	32
Figura 5 – Resultados globais da classificação dos tipos de motor.....	42
Figura 6 – Desempenho das máquinas elétricas em sistemas de propulsão elétrica.....	43
Figura 7 – Etapas de aplicação do AHP	48
Figura 8 – Estrutura hierárquica genérica para problemas de decisão	49
Figura 9 – Fluxograma para o método AHP	56
Figura 10 – Representação gráfica do método TOPSIS	58
Figura 11 – Etapas de aplicação do TOPSIS.....	60
Figura 12 – Etapas integradas do AHP e do TOPSIS	65
Figura 13 – Etapas da metodologia proposta	66
Figura 14 – Estrutura hierárquica para a seleção de máquina elétrica	80
Figura 15 – Prioridades relativas dos critérios para cada cenário	83
Figura 16 – Desempenho das alternativas frente aos critérios de interesse.....	87
Figura 17 – Classificação das alternativas para cada cenário pelo método AHP	89
Figura 18 – Classificação das alternativas pelo método AHP-TOPSIS	94
Figura 19 – Variação do critério C1 para o cenário de veículos leves.....	104
Figura 20 – Impacto da variação do peso do critério rendimento (C1) na preferência de máquinas elétricas para veículos leves.....	105
Figura 21 – Variação do critério C6 para o cenário de veículos leves.....	106
Figura 22 – Impacto da variação do peso do critério densidade de potência (C6) na preferência de máquinas elétricas para veículos leves	106
Figura 23 – Impacto da variação do peso do critério rendimento (C1) na preferência de máquinas elétricas para veículos pesados.....	107
Figura 24 – Impacto da variação do peso do critério fator de potência (C2) na preferência de máquinas elétricas para veículos pesados.....	108
Figura 25 – Impacto da variação do peso do critério rendimento (C1) na preferência de máquinas elétricas para aplicação <i>in-wheel</i>	109
Figura 26 – Impacto da variação do peso da densidade de potência (C6) na preferência de máquinas elétricas para aplicação <i>in-wheel</i>	110

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparação do estator e rotor de diferentes topologias de MEs.....	27
Quadro 2 – Escala fundamental de Saaty	50
Quadro 3 – Comparação entre os métodos AHP e TOPSIS	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índices de consistência randômicos	54
Tabela 2 – Matriz de comparação pareada para cada cenário	81
Tabela 3 – Matriz normalizada para cada cenário	82
Tabela 4 – Vetor de prioridade dos critérios para cada cenário	83
Tabela 5 – Produto da matriz de comparações pelos autovetores em cada cenário	85
Tabela 6 – Autovalor dos critérios para cada cenário	85
Tabela 7 – Verificação da coerência do modelo para cada cenário	86
Tabela 8 – Desempenho das alternativas em relação a cada critério	87
Tabela 9 – Matriz normalizada de desempenho das alternativas	88
Tabela 10 – Autovetor para cada cenário	89
Tabela 11 – Normalização da matriz das alternativas conforme TOPSIS	91
Tabela 12 – Matriz de decisão normalizada do modelo TOPSIS	91
Tabela 13 – Soluções ideais positivas e negativas	92
Tabela 14 – Distâncias Euclidianas e Coeficientes de Similaridade das Alternativas	93
Tabela 15 – Comparação AHP <i>versus</i> AHP-TOPSIS para cada cenário	95

LISTA DE SIGLAS

ABVE	Associação Brasileira do Veículo Elétrico
AFPM	<i>Axial Flux Permanent Magnet Machine</i> (Máquina de Fluxo Axial com Imãs Pemanentes)
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> (Processo Analítico Hierárquico)
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i> (Veículo Elétrico a Bateria)
BLDC	<i>Brushless Direct Current Motor</i> (Motor de Corrente Contínua sem Escovas)
AC	<i>Alternating current</i> (Corrente Alternada)
CAGR	Taxa de Crescimento Anual Composta
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
DC	<i>Direct current</i> (Corrente Contínua)
DSSR	<i>Double Stator Single Rotor</i> (Rotor Único e Estator Duplo)
EIA	<i>Energy Information Administration</i> (Administração de Informações de Energia)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESG	<i>Environmental, Social, and Governance</i> (Ambiental, Social e Governança)
EUA	Estados Unidos da América
FENABRAVE	Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores
FUNDEP	Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa
GEE	Gases de Efeito Estufa
ICCT	<i>International Council on Clean Transportation</i>
IM	<i>Induction Machine</i> (Máquina de Indução)
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPMSM	<i>Interior Permanent Magnet Synchronous Motor</i> (Motor Síncrono de Ímãs Permanentes Montados no Interior)
MCDM	<i>Multiple Criteria Decision Making</i> (Tomada de Decisão com Múltiplos Critérios)
MCI	Motor de Combustão Interna

ME	Máquina Elétrica
MOVER	Programa Nacional de Mobilidade Verde e Inovação
NdFeB	Neodímio-Ferro-Boro
NEDC	<i>New European Driving Cycle</i> (Novo Ciclo de Condução Europeu)
NIS	<i>Negative Ideal Solution</i> (Solução Ideal Negativa)
ONU	Organização das Nações Unidas
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PBT	Peso Bruto Total
PIS	<i>Positive Ideal Solution</i> (Solução Ideal Positiva)
PMa-SynRM	<i>Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor</i> (Motor Síncrono de Relutância Assistido por Imãs Permanentes)
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i> (Motor Síncrono de Imãs Permanentes)
PNME	Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica
SmCo	Samário-Cobalto
SM-PMSM	<i>Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor</i> (Motor Síncrono de Ímãs Permanentes Montados na Superfície)
SRM	<i>Switched Reluctance Motor</i> (Motor de Relutância Chaveada)
SSDR	<i>Single Stator Double Rotor</i> (Rotor Duplo e Estator Único)
SSSR	<i>Single Stator Single Rotor</i> (Rotor Único e Estator Único)
SUV	<i>Sport Utility Vehicles</i> (Veículo Utilitário Esportivo)
SynRM	<i>Synchronous Reluctance Motor</i> (Motor Síncrono de Relutância)
TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i> (Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade à Solução Ideal)
VE	Veículo Elétrico
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
WLTP	<i>Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure</i> (Procedimento de Teste Global Harmonizado para Veículos Leves)

LISTA DE SÍMBOLOS

Ld	Eixo direto
Lq	Eixo em quadratura
N	Número de elementos comparados ou quantidade de critérios
i	Linha da matriz de julgamento
j	Coluna da matriz de julgamento
A	Matriz de julgamentos
a_{ij}	Elemento da matriz de julgamento na linha i e coluna j
c	Número de comparações
A_n	Matriz de comparação normalizada
w	Vetor de prioridades ou autovetor
Aw	Componentes do vetor de prioridades
λ	Autovalor de cada critério
$\lambda_{m\acute{a}x}$	Autovalor máximo
γ	<i>Consistency Index</i> (Índice de Consistência)
r	<i>Consistency Ratio</i> (Razão de Consistência)
t_j	Somatório da coluna j da matriz de julgamento
p_j	Prioridade calculada para o critério localizado na linha j
v	<i>Random Index</i> (Índice Randômico)
A^+	Solução ideal positiva
A^-	Solução ideal negativa
X	Matriz de decisão
n	Número de alternativas
m	Número de critérios
x_{ij}	Elemento da matriz de decisão na linha i e coluna j
V	Matriz de decisão normalizada
v_{ij}	Valor normalizado ponderado
w_j	Peso j -ésimo critério

n_{ij}	Valor normalizado
J^+	Critérios positivos
J^-	Critérios negativos
D_i^+	Distância ideal positiva
D_i^-	Distância ideal negativa
CC_i	<i>Closeness Coefficient</i> (Coeficiente de Similaridade)
η	Rendimento da máquina elétrica em porcentual [%]
$P_{mec.saída}$	Potência mecânica na saída da máquina elétrica em Watt [W]
$P_{elét.entrada}$	Potência elétrica na entrada da máquina elétrica em Watt [W]
FP	Fator de potência (adimensional)
S	Potência aparente em Volt-Ampère [VA]
RE	Faixa de operação com enfraquecimento de campo
$n_{máx}$	Velocidade máxima em rotações por minuto [rpm]
n_{base}	Velocidade base em rotações por minuto [rpm]
DP	Densidade de potência em Watt por metro cúbico [W/m ³]
V_{maq}	Volume da máquina elétrica em metro cúbico [m ³]
$T_{ondulação}$	Ondulação de conjugado em porcentual [%]
$T_{máx}$	Torque máximo em newton-metro [N·m]
$T_{mín}$	Torque mínimo em newton-metro [N·m]
$T_{méd}$	Torque médio em newton-metro [N·m]
NP	Nova ponderação para critério escolhido
Cn	Peso original do critério
$C_{i(novo)}$	Nova ponderação do critério i
C_i	Ponderação original do critério i

RESUMO

A crescente demanda por soluções sustentáveis vem impulsionando o desenvolvimento de tecnologias de propulsão elétrica mais eficientes. Nesse contexto, a máquina elétrica de tração constitui um elemento crítico em veículos elétricos e híbridos, sendo sua seleção influenciada por fatores técnicos, econômicos e ambientais. Tradicionalmente, as máquinas síncronas de ímãs permanentes (PMSM), de fluxo radial, destacam-se pela elevada eficiência e densidade de potência, justificando sua ampla adoção pelas montadoras. Entretanto, a dependência de materiais de terras raras suscita preocupações quanto à volatilidade de preços e à segurança no suprimento, estimulando a busca por alternativas. Este trabalho propõe uma abordagem multicritério para a avaliação comparativa de topologias de máquinas elétricas para tração veicular, mediante a aplicação combinada do Processo Analítico Hierárquico (AHP) e da Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade à Solução Ideal (TOPSIS). A metodologia contempla a definição de sete critérios de avaliação (rendimento, densidade de potência, operação com enfraquecimento de campo, fator de potência, custo de fabricação e outros), a atribuição de pesos de importância e a classificação sistemática das alternativas. Foram analisadas cinco topologias: motor de indução (IM), motor síncrono de ímãs permanentes de fluxo radial (PMSM), motor síncrono de relutância (SynRM), motor síncrono de relutância assistido por ímãs permanentes (PMA-SynRM) e motor síncrono de ímãs permanentes de fluxo axial (AFPM). Os resultados indicaram preferência pela topologia PMA-SynRM para veículos leves (57%), pela topologia SynRM para veículos pesados (61%) e pela topologia AFPM para aplicações *in-wheel* (62%). A análise evidencia o potencial competitivo de alternativas menos dependentes de terras raras em cenários específicos, confirmando a eficácia da abordagem AHP-TOPSIS como instrumento para seleção fundamentada de topologias de máquinas elétricas no contexto da mobilidade elétrica.

Palavras-chave: AHP-TOPSIS; análise multicritério; máquinas elétricas de tração; mobilidade elétrica; motor de propulsão elétrica.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable solutions has been driving the development of more efficient electric propulsion technologies. In this context, the electric traction machine constitutes a critical component in electric and hybrid vehicles, with its selection influenced by technical, economic, and environmental factors. Traditionally, permanent magnet synchronous machines (PMSM), with radial flux configuration, stand out for their high efficiency and power density, justifying their widespread adoption by automakers. However, the dependence on rare earth materials raises concerns regarding price volatility and supply security, encouraging the search for alternatives. This work proposes a multi-criteria approach for the comparative evaluation of electric machine topologies for vehicle traction, through the combined application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). The methodology involves the definition of seven evaluation criteria (efficiency, power density, field-weakening operation, power factor, manufacturing cost, among others), the assignment of importance weights, and the systematic ranking of alternatives. Five topologies were analyzed: induction motor (IM), permanent magnet synchronous motor with radial flux (PMSM), synchronous reluctance motor (SynRM), permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor (PMA-SynRM), and permanent magnet synchronous motor with axial flux (AFPM). The results indicated a preference for the PMA-SynRM topology for light vehicles (57%), for the SynRM topology for heavy vehicles (61%), and for the AFPM topology for in-wheel applications (62%). The analysis highlights the competitive potential of alternatives less dependent on rare earth materials in specific scenarios, confirming the effectiveness of the AHP-TOPSIS approach as a tool for the informed selection of electric machine topologies in the context of electric mobility.

Keywords: AHP-TOPSIS; multicriteria analysis; traction electric machines; electric Mobility; electric propulsion motor.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	18
1.3	DELIMITAÇÃO DO TEMA	18
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	MÁQUINAS DE PROPULSÃO ELÉTRICA PARA VEÍCULOS	21
2.1.1	Máquina de Indução	29
2.1.2	Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes	31
2.1.3	Máquina Síncrona de Relutância	33
2.1.4	Máquina Síncrona de Relutância Assistida por Ímãs Permanentes	35
2.1.5	Máquina de Fluxo Axial	37
2.2	O ESTADO DA ARTE	39
2.3	REQUISITOS DE DESEMPENHO	43
2.4	METODOLOGIAS PARA TOMADA DE DECISÃO	46
2.4.1	Método AHP – Processo Analítico Hierárquico	47
2.4.1.1	Etapas de aplicação do método AHP	48
2.4.2	TOPSIS – Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade à Solução Ideal	57
2.4.2.1	Etapas de aplicação do método TOPSIS	60
2.4.3	O método combinado: AHP-TOPSIS	62
3	METODOLOGIA	65
3.1	ABORDAGEM METODOLOGICA	67
4	ESTUDO DE CASO	69
4.1	MODELAGEM DO PROBLEMA	69
4.2	DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS DE ESTUDO	70
4.2.1	Caracterização dos cenários	70
4.3	SELEÇÃO E DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS	74
4.3.1	Identificação dos critérios relevantes	74
4.3.2	Definição dos critérios e suas unidades de medida	75
4.4	APLICAÇÃO DO AHP-TOPSIS NO ESTUDO DE CASO	78
4.4.1	Construção da hierarquia	79
4.4.2	Criação e normalização das matrizes	80
4.4.3	Cálculo dos autovetores	82
4.4.4	Análise da consistência dos dados	84

4.4.5	Classificação pelo método AHP	86
4.4.6	Matriz normalizada AHP-TOPSIS	90
4.4.7	Solução ideal positiva e negativa.....	92
4.4.8	Medidas de separação e coeficiente de similaridade	92
4.4.9	Classificação pelo método AHP-TOPSIS	93
5	DISCUSSÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	95
5.1	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	96
5.1.1	Análise da inversão de <i>ranking</i> entre o AHP e AHP-TOPSIS	98
5.2	SENSIBILIDADE E ROBUSTEZ DA ANÁLISE	102
5.2.1	Análise de sensibilidade para o cenário de veículos leves.....	103
5.2.2	Análise de sensibilidade para o cenário de veículos pesados	107
5.2.3	Análise de sensibilidade para o cenário de aplicação <i>in-wheel</i>	108
6	CONCLUSÃO	111
	REFERÊNCIAS.....	113
	APÊNDICE A – METAS DE ELETRIFICAÇÃO DAS PRINCIPAIS MONTADORAS	130
	APÊNDICE B – TOPOLOGIAS ADOTADAS EM VEs COMERCIAIS	131
	APÊNDICE C – QUESTIONÁRIOS DE COLETA DE DADOS.....	133
	APÊNDICE D – DESEMPENHO DAS ALTERNATIVAS	138

1 INTRODUÇÃO

Segundo o relatório "*World Population Prospects 2024*", da Organização das Nações Unidas (ONU), a população mundial deve continuar crescendo pelos próximos 50 a 60 anos, passando de 8,2 bilhões de pessoas em 2024 para um pico de aproximadamente 10,3 bilhões em meados da década de 2080 (UNITED NATIONS, 2024). Uma pesquisa realizada pela *Energy Information Administration* (EIA), agência de planejamento energético dos Estados Unidos da América (EUA), indica que o número de veículos em circulação, incluindo elétricos e a combustão interna, deve aumentar significativamente, passando de 1,31 bilhão em 2020 para 2,21 bilhões em 2050 (NALLEY; LAROSE, 2021). Nesse cenário, as máquinas elétricas aplicadas à tração tornam-se essenciais para atender à demanda crescente do setor de transportes e, simultaneamente, contribuem para mitigar os impactos ambientais associados à expansão da frota de veículos.

Estudos recentes reforçam a viabilidade ambiental dos veículos elétricos (VEs). Um deles, publicado na revista científica *Nature Sustainability* (KNOBLOCH *et al.*, 2020), demonstra que os carros elétricos emitem menos gases poluentes na maior parte do mundo, mesmo em regiões onde a matriz energética ainda não é tão limpa e renovável. Outro relatório, do *International Council on Clean Transportation* (ICCT), mostra que VEs geram até 68% menos emissões ao longo de todo o ciclo de vida (BIEKER, 2021). Isso significa que o relatório não considera apenas a rodagem, mas todas as emissões desde a produção até o descarte dos componentes.

A máquina elétrica¹ (ME) aplicada na tração veicular é um componente essencial para a eletrificação do setor de transportes. No entanto, a transição de veículos a combustão para os veículos elétricos e híbridos traz consigo desafios técnicos relevantes, especialmente no que se refere à escolha e ao projeto da topologia da ME. Questões como eficiência, desempenho, custos produtivos e dependência de materiais críticos, como ímãs de terras raras, têm direcionado a pesquisa e o desenvolvimento de novas soluções.

Entre os fatores técnicos cada vez mais discutidos no setor automotivo, destacam-se a busca por redução de peso (com o uso de materiais como alumínio e compósitos), o aprimoramento da eficiência energética e o redesenho estrutural de

¹ Uma máquina elétrica é um dispositivo responsável pela conversão bidirecional de energia eletromecânica, transformando energia mecânica em energia elétrica ou o processo inverso.

componentes. A definição da topologia adequada da máquina elétrica é, portanto, um fator chave nesse processo de otimização.

Dentre as alternativas tecnológicas mais empregadas na tração elétrica, destacam-se as máquinas elétricas de fluxo radial, como as de indução, as síncronas de ímãs permanentes e as síncronas de relutância, além das máquinas síncronas de ímãs permanentes de fluxo axial. Cada uma apresenta características próprias, que oferecem vantagens específicas conforme a aplicação, mas também apresentam limitações que precisam ser cuidadosamente analisadas. Isso justifica a necessidade de uma avaliação comparativa criteriosa entre essas topologias, considerando diferentes requisitos técnicos e cenários de aplicação específicos.

Esta dissertação propõe uma contribuição técnica e metodológica ao setor de mobilidade elétrica, com foco na avaliação comparativa de topologias de MEs voltadas à tração veicular. Com base em uma revisão da literatura existente, apresenta uma visão abrangente das principais topologias, seus critérios de desempenho e aplicações. Além disso, propõe uma abordagem sistemática, fundamentada em métodos multicritério, para a comparação entre as alternativas, justificando suas escolhas conforme o contexto de aplicação. Além disso, este estudo oferece uma contribuição metodológica ao detalhar, exemplificar e orientar sobre o uso de métodos multicritério escolhidos, ao mesmo tempo em que colabora para as decisões estratégicas ao avaliar topologias de MEs candidatas a tração, caracterizado como um problema de decisão.

1.1 JUSTIFICATIVA

O futuro da mobilidade está diretamente associado à popularização dos VEs, e as principais montadoras globais vêm direcionando investimentos para essa transição energética. Vários países já estabeleceram prazos para encerrar a produção de veículos com motores a combustão interna, o que tem pressionado o setor automotivo a acelerar o desenvolvimento de tecnologias com zero emissão de poluentes.

Incentivos governamentais têm desempenhado um papel fundamental na promoção da mobilidade elétrica. Políticas como subsídios diretos para aquisição de VEs, isenções fiscais, redução de tributos sobre propriedade, taxas de estacionamento diferenciadas e a criação de áreas de circulação exclusivas têm

buscado tornar os veículos elétricos mais competitivos, além de estimular a indústria automotiva a investir em tecnologias mais limpas.

O investimento em pesquisas e novas tecnologias colabora com o desenvolvimento de produtos que contribuem para a mobilidade elétrica. No Brasil, um exemplo de incentivo é o Programa Rota 2030, que, em uma de suas linhas de pesquisa, visa fomentar o setor automotivo brasileiro por meio do investimento em novas tecnologias de propulsão alternativas à combustão (FUNDEP, 2022). Mais recentemente, em dezembro de 2023, o Governo Federal lançou o programa nacional de Mobilidade Verde e Inovação (MOVER), que substitui o antigo Rota 2030. O MOVER tem como objetivo apoiar o setor automotivo para melhorar a qualidade dos automóveis por meio de tecnologia, inovação e eficiência energética.

Apesar desses avanços, o cenário nacional ainda apresenta desafios significativos. Segundo Andrade (2024), do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), a ausência de políticas públicas consistentes e de incentivos financeiros específicos, como subsídios diretos e estímulos fiscais, compromete o acesso da população aos veículos elétricos e dificulta a adoção em larga escala. Esse panorama reforça a necessidade de estratégias governamentais mais robustas para fomentar a transição energética e garantir competitividade no mercado global.

A crescente preocupação ambiental, aliada a combinação entre desempenho e maior autonomia, tem tornado cada vez mais viável a utilização de veículos totalmente elétricos em todo o mundo (MEDEIROS *et al.*, 2019). Nesse contexto, a densidade de potência das MEs torna-se um fator crítico de desempenho. Segundo Ramesh e Lenin (2019), os materiais utilizados na fabricação das MEs exercem influência direta sobre esse atributo.

Diante do cenário global de transição energética e da busca por uma economia de baixo carbono, a eletrificação dos sistemas de transporte desponta como uma das principais estratégias a serem adotadas por diversos países. No caso brasileiro, o contexto é particularmente promissor, considerando seu vasto potencial para a geração de bioenergia, sua posição como segundo maior produtor de energia hidrelétrica do mundo e as perspectivas favoráveis de expansão das fontes eólica e solar (EPE, 2024a).

Diversas montadoras têm anunciado metas ambiciosas para a eletrificação de suas frotas, com prazos definidos para o encerramento da produção de veículos a combustão e a adoção total ou parcial de veículos elétricos. Essas metas refletem o

alinhamento estratégico da indústria automotiva com os objetivos de globais de descarbonização e reforçam a relevância da eletromobilidade no cenário atual. Uma síntese dessas metas encontra-se na Tabela A1, apresentada no Apêndice A.

Diante dessa realidade, uma indústria nacional de médio porte do setor metalmeccânico, especializada em motores industriais, decidiu investir em uma área dedicada à eletromobilidade com o objetivo de fornecer máquinas elétricas para VEs. Para viabilizar essa transição, a equipe responsável identificou diversas topologias de MEs com potencial para aplicação automotiva a fim de determinar a melhor topologia para iniciar a produção e entrar efetivamente nesse mercado.

A escolha da topologia da máquina de tração representa uma decisão estratégica de grande impacto nos projetos de eletrificação veicular. Dada sua importância, justifica-se a adoção de um modelo de referência que auxilie na tomada de decisão, estruturando o processo com base em dados objetivos e metodologias consolidadas. Sendo assim, pode ser necessário implementar uma série de abordagens estratégicas, que incluem procedimentos padronizados, estudo de mercado e metodologias comprovadas, todos visando facilitar a definição clara das metas e diretrizes que são fundamentais para o sucesso do desenvolvimento do novo produto.

Nesse sentido, esta dissertação parte da seguinte questão: *é possível aplicar uma metodologia de análise comparativa entre topologias de máquinas elétricas, capaz de organizar, analisar e justificar, com base em critérios técnicos, a escolha mais adequada para diferentes aplicações de tração veicular?* A resposta afirmativa a essa pergunta é o que fundamenta a realização deste estudo, como será detalhado na subseção de objetivo geral.

Diferentemente de outros trabalhos, esta pesquisa propõe não apenas a comparação de desempenho entre diferentes MEs, mas também a aplicação de ferramentas multicritério que auxiliam a tomada de decisão de forma estruturada. A metodologia adotada permite avaliar as alternativas com base em múltiplos critérios de relevância para o setor automotivo, oferecendo um suporte robusto à seleção da topologia ideal.

Ao aplicar essa abordagem sistemática, espera-se que a empresa possa se posicionar de maneira mais competitiva, atendendo às exigências de desempenho, sustentabilidade e inovação tecnológica. Assim, a metodologia desenvolvida nesta

dissertação pode servir como um referencial técnico e estratégico para projetos de eletrificação veicular.

Em suma, esta pesquisa busca contribuir para o avanço da mobilidade elétrica, especialmente no desenvolvimento e na seleção de máquinas elétricas para tração. A aplicação da metodologia proposta visa fornecer uma base confiável para decisões técnicas e gerenciais, incentivando soluções mais sustentáveis e eficientes no setor automotivo.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é propor a aplicação combinada dos métodos AHP e TOPSIS para a avaliação comparativa de topologias de máquinas elétricas destinadas à tração veicular, alinhando-se à proposta metodológica descrita e aplicada nesta dissertação. A metodologia visa orientar e aprimorar o processo de tomada de decisão, considerando múltiplos requisitos e ponderações relacionados ao uso dessas máquinas em sistemas de propulsão elétrica.

Os objetivos específicos determinantes para alcançar o objetivo geral consistem nos seguintes itens:

- a) Realizar uma investigação aprofundada, por meio de pesquisa bibliográfica, das principais topologias de máquinas elétricas atualmente aplicadas em veículos elétricos;
- b) Identificar e selecionar os critérios de avaliação mais relevantes para essas topologias, considerando sua aplicação em sistemas de tração;
- c) Aplicar a metodologia AHP-TOPSIS para conduzir a análise comparativa entre as alternativas, considerando diferentes cenários de aplicação veicular;
- d) Avaliar e discutir os resultados obtidos, destacando os desafios e oportunidades no contexto da mobilidade elétrica.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Esta dissertação de mestrado tem como base a coleta e análise de informações sobre topologias de máquinas elétricas de propulsão aplicáveis à tração veicular, restringindo-se à avaliação comparativa de cinco alternativas de MEs diante das opções disponíveis.

Foram abordadas, na comparação, tanto máquinas de fluxo radial quanto máquinas de fluxo axial. As máquinas de fluxo radial, podem ser bastante competitivas em relação às de fluxo axial, levando-se em consideração aspectos como custo de fabricação e complexidade construtiva.

Com base no estado da arte e nas aplicações atuais, a seleção das topologias foi orientada para atender à demanda de produção de uma unidade fabril nacional em processo de transição para a eletromobilidade. As alternativas analisadas foram: máquina de indução (IM), máquina síncrona de ímãs permanentes (PMSM), máquina síncrona de relutância (SynRM), máquina síncrona de relutância assistida por ímãs permanentes (PMA-SynRM) e máquina de fluxo axial (AFM). Para fins deste trabalho, a PMSM refere-se especificamente à máquina síncrona de ímãs permanentes de fluxo radial, enquanto a AFPM corresponde à máquina síncrona de ímãs permanentes de fluxo axial. Embora tecnicamente ambas sejam PMSMs, a distinção entre fluxo radial e axial é fundamental para a clareza da análise.

Para a análise comparativa, optou-se pela aplicação combinada de dois métodos multicritério: o Processo Analítico Hierárquico (*Analytic Hierarchy Process – AHP*) e a Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade à Solução Ideal (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution – TOPSIS*). O AHP foi escolhido por sua capacidade de estruturar problemas complexos e hierarquizar critérios de forma lógica e sistemática. O TOPSIS, por sua vez, permite avaliar as alternativas com base em sua proximidade em relação à solução ideal, evidenciando a classificação final.

Embora outros métodos multicritério possam ser aplicáveis ao problema em questão, eles não integram o escopo deste trabalho. O foco está na demonstração e exemplificação da aplicação integrada do AHP-TOPSIS como ferramenta de apoio à decisão na seleção da topologia de máquina elétrica mais adequada para sistemas de tração veicular.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para atender aos objetivos propostos, esta dissertação está estruturada em seis capítulos, conforme descrito a seguir.

O primeiro capítulo é introdutório e apresenta a motivação como justificativa do tema, os objetivos da pesquisa, a delimitação do escopo e a organização do trabalho.

No segundo capítulo, a fundamentação teórica é abordada, incluindo o contexto da pesquisa, a revisão bibliográfica sobre máquinas elétricas para tração veicular, o estado da arte, os requisitos de desempenho e as metodologias para apoio à decisão, com ênfase nos métodos AHP e TOPSIS.

O terceiro capítulo descreve a metodologia adotada, detalhando a abordagem metodológica e a estratégia de pesquisa utilizada para a aplicação dos métodos multicritério.

No quarto capítulo, é apresentado o estudo de caso, incluindo a modelagem do problema, a descrição dos cenários, a seleção e definição dos critérios e a aplicação do método AHP-TOPSIS. Esse capítulo tem como objetivo validar e ilustrar a metodologia proposta.

O quinto capítulo aborda a discussão e avaliação dos resultados obtidos, incluindo a interpretação dos resultados, bem como a avaliação de sensibilidade e robustez do modelo adotado.

Por fim, no sexto capítulo, são apresentadas as conclusões do estudo, destacando os principais achados, as contribuições teóricas e práticas, as limitações da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta o referencial teórico necessário para contextualizar os principais conceitos relacionados ao estudo. São abordados o contexto da pesquisa, a revisão bibliográfica sobre máquinas elétricas aplicadas à tração veicular, o levantamento do estado da arte, os requisitos de desempenho e as metodologias utilizadas como apoio à decisão.

Inicialmente, são analisadas as topologias de máquinas elétricas de interesse, com potencial de aplicação em veículos elétricos, destacando suas características, vantagens, limitações e os principais fabricantes. Em seguida, o estado da arte apresenta os esforços realizados por outros pesquisadores na comparação de diferentes topologias voltadas à tração veicular. Na sequência, são evidenciadas as características mais relevantes para a seleção de uma topologia adequada de máquina elétrica.

Por fim, o capítulo introduz os métodos multicritério AHP e TOPSIS, com exemplos de uso na literatura, suas etapas de implementação, e a relevância da combinação entre eles como ferramenta de suporte à tomada de decisão.

2.1 MÁQUINAS DE PROPULSÃO ELÉTRICA PARA VEÍCULOS

Além da produção dos próprios veículos elétricos, Ramesh e Lenin (2019) apontam que novas oportunidades estão na fabricação de baterias, motores de tração, eletrônica de potência, entre outros produtos. Nesse contexto, o motor de tração é o componente essencial que viabiliza a transição de um veículo a combustão convencional para um veículo elétrico. Contudo, conforme Agamloh; Von Jouanne e Yokochi (2020), são raros os fabricantes que divulgam detalhes técnicos sobre os motores utilizados, sendo grande parte do conhecimento derivada de pesquisas acadêmicas e engenharia reversa.

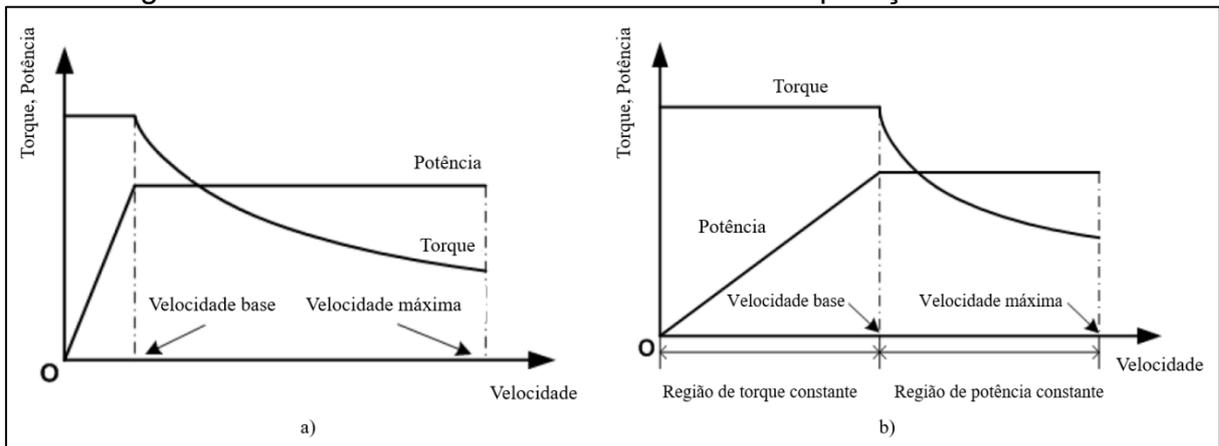
Os motores de tração apresentam requisitos distintos dos motores industriais tradicionais. De acordo com Patil e Dhamal (2019), esses motores devem lidar com perfis de carga variáveis, rápidas mudanças de velocidade, aceleração em aclives e frenagens regenerativas. Enquanto a maioria das aplicações industriais trabalha com cargas constantes e controladas, onde o motor opera em frequências mais baixas, geralmente em torno de 60 Hz, os motores empregados em VEs operam em frequências mais altas, como 120 Hz, 180 Hz, 200 Hz ou mais, dependendo da

aplicação e do fabricante. Por exemplo, motores da WEG operam nessas faixas intermediárias, enquanto máquinas de fluxo axial produzidas por fabricantes como YASA ou Magnax podem alcançar frequências de até 500 Hz ou mesmo 1000 Hz. Com a evolução no campo dos conversores de eletrônica de potência, os problemas de fontes de alimentação de alta frequência, necessárias para operação em alta velocidade, não são mais uma restrição. O desenvolvimento de máquinas elétricas de alta velocidade também é apoiado pelo desenvolvimento de sistemas de rolamentos de alta velocidade com robustez elevada, menos perdas e maior vida útil (HE *et al.*, 2022).

Existe uma relação diretamente proporcional entre a frequência de alimentação e a velocidade de rotação das máquinas elétricas, de modo que frequências mais elevadas permitem alcançar maiores velocidades. Acima da velocidade base, na faixa de operação em que a potência se mantém constante, o aumento da velocidade implica na redução do torque. Assim, ao otimizar a estrutura do motor para operar em altas rotações, torna-se possível concentrar uma maior quantidade de potência em um mesmo volume físico, elevando a densidade de potência da máquina. No entanto, esse aumento na frequência acarreta maiores perdas magnéticas, já que possuem relação quadrática com a frequência, o que exige o uso de materiais especiais para minimizá-las. Materiais como aços de grão orientado com 0,23 mm de espessura são empregados em máquinas axiais a fim de melhorar o rendimento e elevar o desempenho. A escolha desses materiais e as diferenças nas frequências de operação são fatores que diferenciam as máquinas de tração veicular das máquinas elétricas voltadas a aplicações industriais.

A Figura 1 ilustra os perfis de torque e potência em função da velocidade para motores em VEs (gráfico à esquerda) e aplicações industriais (gráfico à direita).

Figura 1 – Acionamento de motor em VEs e em aplicações industriais



Fonte: adaptado de Xue, Cheng e Cheung (2008).

Para VEs, o motor deve fornecer um alto torque em baixas velocidades para facilitar a partida e a aceleração. À medida que a velocidade aumenta, a potência deve se manter constante, enquanto o torque começa a diminuir após a velocidade base. Essa característica permite que o veículo atinja velocidades de cruzeiro mais altas. A faixa de potência constante é desejada o mais ampla possível, o que otimiza o desempenho em alta velocidade. Já nas aplicações industriais, o motor opera com torque constante até a velocidade base, com aumento progressivo da potência. Esse perfil é ideal para operações industriais onde a carga é constante e previsível.

Além disso, a caracterização do ciclo de condução constitui etapa essencial na análise de sistemas de tração veicular, pois permite reproduzir condições reais de operação, incluindo acelerações, desacelerações, frenagens regenerativas e variações de velocidade ao longo do tempo. A consideração desses perfis de uso influencia diretamente o dimensionamento do motor elétrico, a definição de seus parâmetros de potência e torque, bem como as estratégias de controle adotadas, assegurando que o projeto atenda requisitos de eficiência energética e desempenho sob condições reais de rodagem (EHSANI *et al.*, 2018).

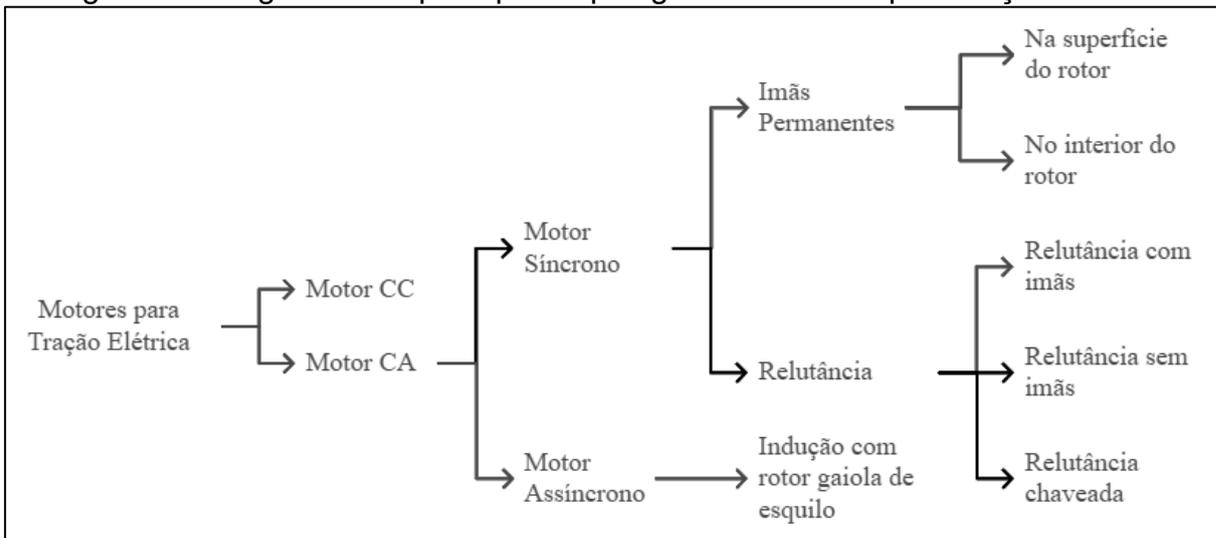
Ademais, diversos estudos reforçam que a caracterização detalhada de ciclos de condução é fundamental para projetar sistemas de tração eficientes. Por exemplo, Sanjarbek, Mavlonov e Mukhitdinov (2022) demonstram que diferentes perfis de condução impactam diretamente o dimensionamento dos componentes do *powertrain*. Borgia e Samuel (2023) destacam a evolução dos ciclos padronizados para refletir condições de uso mais realistas, como no caso do WLTP (*Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure*). Outros trabalhos, como Velayudham e

Carounagarane (2023), evidenciam que a eficiência média ao longo de todo o ciclo é mais relevante do que o desempenho em pontos de operação isolados, o que foi verificado, por exemplo, em análises com o ciclo NEDC (*New European Driving Cycle*). Além disso, Prasad e Gudipalli (2025) mostram que diferentes perfis de uso (urbano e rodoviário) afetam significativamente as estimativas de consumo, autonomia e a própria seleção da bateria. Em abordagens mais avançadas, ciclos de condução têm sido empregados inclusive em cenários de veículos autônomos, a fim de avaliar alcance e consumo em condições realista (DUAN; SCHOCKENHOFF; KOCH, 2022). Finalmente, Bagheri *et al.*, (2025) destacam que padrões de condução e condições variáveis de tráfego como acelerações, velocidades instantâneas e congestionamentos, impactam diretamente o consumo de energia, reforçando a necessidade de perfis detalhados para calibração e controle eficaz dos sistemas de tração veicular.

Os avanços na eletrônica de potência permitiram a implementação de sistemas de controle para máquinas de corrente alternada (CA), tornando-as mais robustas, com menor manutenção e custos. Por esses motivos, as máquinas CA tornaram-se preferíveis às de corrente contínua (CC). Assim, após o estabelecimento do controle vetorial para máquinas CA, a atratividade das máquinas CC em aplicações de tração diminuiu (HASHEMNIA; ASAEI, 2008).

A Figura 2 apresenta as principais topologias de motores utilizados na tração elétrica. Esses motores podem ser classificados de acordo com a direção do fluxo magnético em relação ao eixo de rotação, sendo divididos em fluxo axial e fluxo radial. As topologias mostradas na Figura 2 referem-se a máquinas de fluxo radial.

Figura 2 – Diagrama das principais topologias de motores para tração elétrica



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Os motores de fluxo radial são mais conhecidos e utilizados do que os motores de fluxo axial, devido ao processo de fabricação simples e bem estabelecido (NEETHU *et al.*, 2018). Essa simplicidade decorre do fato de que tais motores são construídos a partir de laminações do estator idênticas ao longo de todo o pacote, o que facilita a fabricação e a montagem.

Em contrapartida, as máquinas de fluxo axial apresentam maior densidade de potência e eficiência, porém com maior complexidade construtiva. Embora já existam tecnologias para simplificar sua fabricação, como as estampadoras chinesas de passo variável, elas ainda não são difundidas e acessíveis.

As pesquisas sobre motores de indução e motores de ímãs permanentes são mais frequentes, enquanto o interesse pelos motores CC diminui e os motores síncronos de relutância chaveada ganham relevância (CHAN, 2002, *apud* ZERAOULIA; BENBOUZID; DIALLO, 2006).

De acordo com El Hadraoui *et al.*, (2022), os motores de indução são amplamente utilizados na indústria devido à sua robustez e custo-benefício, sendo frequentemente uma escolha para tração elétrica. Já os motores com ímãs permanentes, especialmente aqueles que utilizam ímãs de terras raras, são preferidos por sua eficiência e alta densidade de potência, mas seu custo elevado e questões de sustentabilidade têm impulsionado a busca por alternativas, como os motores síncronos de relutância. Os motores síncronos de relutância, se bem projetados, apresentam uma alternativa econômica e promissora, especialmente com o avanço em pesquisas voltadas para VEs.

Apesar de a máquina de relutância chaveada (SRM) apresentar vantagens relevantes em termos de custo de material, essa topologia não foi considerada nesta avaliação por ainda apresentar limitações significativas para aplicações veiculares de tração. Entre os principais desafios estão o elevado nível de ruído acústico, ondulação de conjugado significativa e a baixa densidade de torque (IBRAHIM; NASSER B. ALSAMMAK, 2023) em comparação com outras tecnologias mais consolidadas no mercado automotivo. Embora avanços recentes em estratégias de controle e design tenham contribuído para mitigar parte dessas limitações, a adoção da SRM em veículos elétricos comerciais ainda é restrita.

Para este estudo, são consideradas cinco topologias (M1 a M5), representadas na Figura 3. Essas topologias diferem especialmente em relação ao rotor.

Figura 3 – Máquinas de propulsão elétrica consideradas para o estudo de caso

M1 - Máquina de Indução

IM (*Induction Machine*)

M2 - Máquina Síncrona de Relutância

SynRM (*Synchronous Reluctance Machine*)

M3 - Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes

PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Machine*)

M4 - Máquina Síncrona de Relutância Assistida por Ímãs Permanentes

PMA-SynRM (*Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine*)

M5 - Máquina de Fluxo Axial com Ímãs Permanentes

AFPM (*Axial Flux Permanent Magnet Machine*)

Fonte: elaborado pela autora (2024).

O Quadro 1 apresenta aspectos comparativos entre elas.

Quadro 1 – Comparação do estator e rotor de diferentes topologias de MEs

Tipo	Estrutura do estator e rotor	Características
IM		Rotor de cobre/alumínio Rotor do tipo bobinado ou gaiola de esquilo
PMSM		Ímãs montados na superfície (<i>Surface-mounted PMSM</i>) ou ímãs internos (<i>Interior PMSM</i>)
SynRM		Rotor inclinado com barreiras de fluxo assimétricas
PMSynRM		Rotor inclinado com barreiras de fluxo assimétricas e com ímãs nas barreiras ou na superfície

Fonte: adaptado de Heidari *et al.* (2021).

A adição da AFPM à análise é interessante, pois essa topologia apresenta características distintas, como uma alta densidade de potência e maior eficiência em comparação as outras topologias. No entanto, a AFPM possui uma complexidade de fabricação e custo mais elevado, o que pode limitar sua aplicação em determinados cenários.

A escolha dessas topologias é motivada pela combinação entre desempenho e relevância no mercado de sistemas de tração elétrica. Vale destacar que cada topologia apresenta particularidades, com vantagens e desvantagens, conforme será abordado mais adiante.

As PMSMs têm ganhado popularidade entre os fabricantes de sistemas de tração elétrica devido ao seu alto rendimento, densidade de potência elevada e ampla faixa de operação (YANG *et al.*, 2015). Essas características as tornam predominantes no mercado de veículos elétricos (WU *et al.*, 2020). Além disso, as PMSMs também apresentam um alto fator de potência, o que as tornam particularmente atraentes para aplicações em VEs.

O fator de potência é uma medida da eficiência na conversão de energia elétrica em trabalho mecânico. Um fator de potência mais próximo de 1 indica uma conversão mais eficiente, resultando em menor consumo de energia e maior eficiência geral do sistema. Nas PMSMs, o fator de potência geralmente é alto, devido ao controle preciso da corrente e à operação com desempenho mais próximo ao ideal.

Conforme Bostanci *et al.* (2017), os fabricantes têm grande interesse em encontrar soluções alternativas sem ímãs permanentes devido ao custo instável dos metais de terras raras e aos problemas de tolerância a falhas associados à excitação constante do ímã permanente. Fornecedores de motores elétricos estabelecidos, como a MAHLE, e empresas menores, como a *Advanced Electric Machines*, já estão focando em alternativas sem ímãs (EDMONDSON, 2022).

Chen e Zhao (2024) destacam que os problemas de tolerância a falhas relacionados à excitação constante do ímã permanente envolvem a dificuldade de gerir e controlar a excitação magnética do motor. Devido ao campo magnético constante gerado pelos ímãs permanentes, esses motores podem apresentar desafios em termos de controle e proteção durante falhas.

Assim, a busca por alternativas sem ímãs não se deve apenas à instabilidade do custo dos materiais de terras raras, mas também aos desafios de tolerância a falhas associados à excitação constante dos ímãs permanentes, que podem afetar a confiabilidade e a segurança do sistema de tração elétrica.

Diante da crescente demanda por motores de tração que não utilizem terras raras ou que contenham quantidades reduzidas desses materiais, a IM e a SynRM são de interesse, uma vez que atendem a esses requisitos. A preocupação com a dependência de terras raras deve-se ao fato de que a produção de ímãs feitos desses materiais está concentrada na China, resultando em uma quase exclusiva dependência do mercado global em relação a esse único fornecedor. Essa concentração geográfica da produção representa uma vulnerabilidade significativa, que se torna ainda mais crítica diante de tensões comerciais recentes, como as tarifas impostas pelos Estados Unidos à China, que impactaram diretamente a cadeia de suprimentos de terras raras.

Um exemplo notável de fabricante que utiliza essa tecnologia é a ABB, líder global em tecnologia nas áreas de eletrificação e automação, que desenvolveu SynRMs capazes de atingir a classe de eficiência IE6, sem o uso de ímãs permanentes, portanto livres de elementos de terras raras (ABB, 2024a). Esse avanço

representa uma solução sustentável e de alto desempenho para aplicações industriais.

Nesse contexto, alternativas híbridas também ganham destaque. De acordo com Wu *et al.* (2018), a PMA-SynRM pode ser uma excelente candidata como solução de propulsão, pois essa topologia é frequentemente projetada com ímãs de ferrite ou pequena quantidade de ímãs de terras raras no núcleo do rotor.

Conforme destacado por Bolvashenkov, Kammermann e Herzog (2018), a crescente demanda por acionamentos elétricos requer a seleção criteriosa de MEs que atendam aos requisitos específicos da aplicação em questão. A escolha de uma máquina adequada depende em grande parte do contexto da aplicação e, em muitos casos, não há uma única opção ideal, já que o foco estabelecido previamente é determinante para a comparação entre os diferentes tipos de máquinas elétricas disponíveis.

No Apêndice B, é apresentado um *benchmarking* com exemplos de topologias adotadas em veículos comerciais, com base em levantamento bibliográfico. A seguir, serão detalhadas as cinco topologias selecionadas neste estudo, incluindo suas características, vantagens, limitações e os principais fabricantes.

2.1.1 Máquina de Indução

Com base na teoria do campo magnético rotativo, desenvolvida por Nikola Tesla em 1882, a máquina de indução (IM) consolidou-se como a ME de maior popularidade ao longo de mais de um século. O motor de indução CA é reconhecido como uma das maiores invenções da humanidade (CHAU, 2016). Em um motor de indução, o campo magnético gerado pelas correntes do estator induz uma tensão nos condutores do rotor, e as correntes do rotor criam torque. O rotor é feito de barras condutoras que são fundidas sob pressão nas ranhuras (BILGIN *et al.*, 2015).

As IMs se destacam por não utilizarem ímãs permanentes e apresentarem elevada robustez e simplicidade, com custos mais baixos em comparação às PMSMs. A principal limitação dessa topologia envolve o uso de barras no rotor e o sistema de refrigeração, uma vez que o calor é gerado tanto no lado do rotor quanto no lado do estator (YANG *et al.*, 2015). Contudo, em aplicações com demandas de potência e torque menos exigentes, as máquinas de indução podem ser a escolha preferida (MOGHADDAM *et al.*, 2020).

O motor elétrico assíncrono trifásico com rotor de gaiola de esquilo é amplamente estudado e difundido (CHERNYSHEV; LISOVSKAYA; LISOVSKIY, 2017). De acordo com Moghaddam *et al.* (2020), devido ao seu projeto simples, baixo custo e tecnologia madura, os motores de indução têm sido a topologia de motor de tração predominante em outros segmentos de transporte elétrico, como o ferroviário, nas últimas quatro décadas.

Segundo Yilmaz (2015), tanto os motores elétricos assíncronos quanto os síncronos utilizam o campo eletromagnético gerado entre o estator e o rotor para gerar propulsão. A principal diferença reside na interação entre o campo magnético girante e o rotor: nos motores síncronos, a velocidade angular do rotor coincide exatamente com a velocidade do campo, de forma sincronizada. Já nos motores assíncronos, não há essa correspondência, caracterizando-se uma diferença relativa denominado escorregamento, a qual quantifica o quanto a velocidade do rotor se encontra abaixo da velocidade do campo girante produzido no estator.

As IMs apresentam três regimes operacionais distintos: regiões de torque constante, potência constante e potência reduzida. Esses regimes são determinados pelas definições relacionadas ao projeto da máquina e ao controle eletrônico de potência. Tais motores podem exigir correntes de partida elevadas, o que é considerado uma desvantagem, pois afetam negativamente a vida útil da bateria (ZERAOUZIA; BENBOUZID; DIALLO, 2006).

A tecnologia da máquina de indução é bastante consolidada e inclui um estator com enrolamento distribuído e um rotor de gaiola de esquilo fundido ou, menos frequentemente, um rotor bobinado (AGAMLOH; VON JOUANNE; YOKOCHI, 2020).

Embora operem com refrigeração forçada, os motores de indução apresentam baixo fator de potência em condições de carga reduzida e densidade de potência moderada. Contudo, considerando aspectos como custo de aquisição, robustez e menor necessidade de manutenção, o motor de indução com rotor em gaiola de esquilo se apresenta como uma alternativa viável para aplicações em VEs.

A ZF Friedrichshafen AG é uma das fabricantes que comercializam motores de indução para aplicações em tração veicular. Um exemplo é o sistema CeTrax, desenvolvido para veículos comerciais, como ônibus, caminhões e veículos especiais. Trata-se de uma solução de tração elétrica que integra motor de indução trifásico, inversor e redutor mecânico em um único módulo compacto. O CeTrax é adequado

tanto para substituir motores de combustão interna em veículos convencionais quanto para modernizar plataformas já existentes com eixo de transmissão (ZF, 2021).

Além disso, há no mercado outras soluções baseadas em motores de indução trifásicos voltadas para veículos leves, como carros de golfe, empilhadeiras, rebocadores e veículos utilitários. A empresa Rawsun Power Co. Ltd. também disponibiliza *kits* de conversão para veículos elétricos, incluindo o uso de motores de indução trifásicos com potência máxima entre 7 kW e 55 kW (RAWSUN, 2018). Embora também ofereça PMSMs para aplicações de maior desempenho, os motores de indução são utilizados em determinados nichos da mobilidade elétrica, especialmente em projetos que priorizam simplicidade, custo reduzido e confiabilidade.

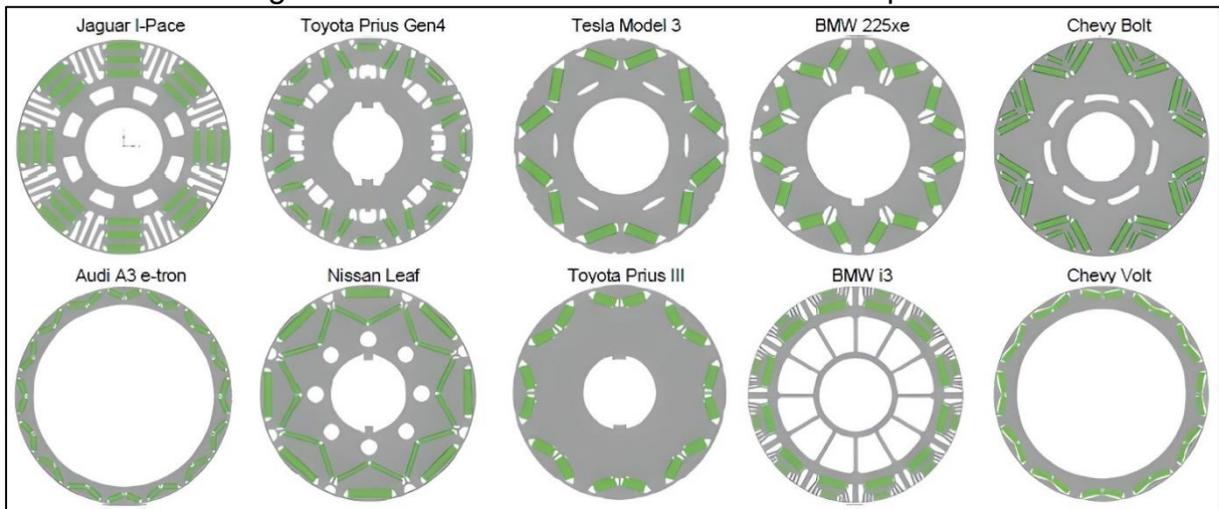
2.1.2 Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes

As máquinas síncronas de ímã permanente (PMSMs), são projetadas para operar em uma ampla faixa de velocidade e oferecem densidade de potência superior às máquinas de indução. Entretanto, essa topologia enfrenta limitações relacionadas ao custo e à disponibilidade de materiais de terras raras utilizados nos ímãs permanentes (YANG *et al.*, 2015).

Atualmente, as PMSMs são amplamente utilizadas em sistemas de tração veicular devido ao seu alto rendimento e densidade de torque (WU *et al.*, 2020). Como resultado, essa topologia tornou-se uma das mais populares entre os fabricantes de sistemas de propulsão elétrica (KONG; LIN; JIA, 2020).

As PMSMs podem ser projetadas de diferentes maneiras, utilizando ímãs de terras raras para alcançar alto desempenho (WON *et al.*, 2018). Frequentemente, os ímãs são montados internamente no rotor, sendo os mais comuns os de Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB) e Samário-Cobalto (SmCo), devido ao seu elevado produto energético. Os rotores das máquinas mostradas na Figura 4 utilizam ímãs de NdFeB.

Figura 4 – Geometrias dos rotores com ímãs permanentes



Fonte: adaptado de Krings e Monissen (2020).

A Figura 4 ilustra diferentes projetos de rotor em motores de tração, que apresentam ímãs internos e características específicas para a orientação dos caminhos magnéticos no rotor, também conhecidas como barreiras de fluxo. Essas características contribuem para a redução do uso de material magnético e oferecem uma ampla faixa de operação, com velocidades máximas de 3 a 6 vezes a velocidade base.

Veículos que circulam tanto em áreas urbanas quanto em rodovias precisam operar na região de enfraquecimento de campo, permitindo que o motor ajuste sua velocidade de forma dinâmica conforme as condições de tráfego e as exigências de desempenho. A presença de saliências no eixo direto (L_d) e de quadratura (L_q) nos motores de tração proporciona maior flexibilidade e controle nessa faixa ampla de operação, contribuindo para melhorar a eficiência e o desempenho do veículo elétrico. Entretanto, essa flexibilidade se mantém vantajosa apenas até certo ponto, pois operações prolongadas em velocidades muito elevadas podem implicar aumento de perdas magnéticas e térmicas, além de possíveis limitações de saturação magnética, restringindo o aproveitamento máximo do motor nessa região.

Apesar das vantagens, as PMSMs enfrentam desafios no mercado (RAMESH; LENIN, 2019). Os principais deles estão relacionados aos aspectos ambientais da mineração de terras raras e as incertezas relacionadas aos preços desses materiais, que representam um fator de custo significativo (MOGHADDAM *et al.*, 2020). Outro aspecto crítico é a confiabilidade, pois a desmagnetização pode ocorrer em condições de sobreaquecimento durante a operação, afetando a capacidade magnética dos ímãs e, conseqüentemente, comprometendo o desempenho e a eficiência da máquina.

Adicionalmente, a manutenção das PMSMs é mais complexa devido à presença dos ímãs permanentes no rotor e às tolerâncias mais restritas no projeto, o que torna os processos de montagem e desmontagem mais delicados. Como consequência, isso pode resultar em maiores custos de manutenção e no tempo de inatividade do veículo, impactando diretamente na disponibilidade operacional.

Diversos fabricantes de máquinas elétricas têm incluído essa topologia em seus portfólios voltados para sistemas de tração elétrica, como a ABB, com sua série de motores AMXE (ABB, 2024b); a Robert Bosch GmbH, com o SMG220 OHW (BOSCH, 2021); a Dana Incorporated (DANA, 2019); a Mahle GmbH (MAHLE, 2019); a Parker Hannifin Corporation (PARKER, 2022); e a Rawsun Power Co., Ltd., que utiliza PMSMs em algumas de suas soluções de conversão veicular elétrica (RAWSUN, 2018), entre outros fabricantes.

Embora as PMSMs ofereçam alta eficiência e densidade de potência, o seu custo ainda é elevado. Segundo Boldea *et al.* (2014), fabricantes têm buscado alternativas em relação à tecnologia do produto de terras raras, uma vez que a China é praticamente a única produtora, resultando na volatilidade dos preços. Esse cenário tem motivado o desenvolvimento de novas topologias de máquinas elétricas para substituição das PMSMs, especialmente em aplicações sensíveis ao custo e à sustentabilidade.

Em resumo, as PMSMs apresentam vantagens significativas, como alta eficiência, densidade de torque e potência, além da flexibilidade de operação em ampla faixa de velocidade. No entanto, enfrentam desafios relacionados ao custo, disponibilidade e aspectos ambientais dos materiais de terras raras, além de complexidades na manutenção. Esses fatores impulsionam a busca por alternativas no desenvolvimento de topologias de máquinas elétricas mais sustentáveis e economicamente viáveis para aplicações em VEs.

2.1.3 Máquina Síncrona de Relutância

A máquina síncrona de relutância (SynRM) é conhecida por sua construção robusta, baixo custo de fabricação e ausência de ímãs permanentes (KHUDE; HARUN SHAIKH; UGALE, 2024). Seu rotor é formado apenas por chapas ferromagnéticas laminadas com barreiras de fluxo, geralmente preenchidas com material não magnético, sem enrolamentos ou elementos ativos. Essa configuração resulta em

perdas rotóricas praticamente inexistentes, proporcionando um rendimento elevado (CAVALEIRO, 2015).

Além disso, as SynRMs podem operar com maior rendimento na mesma faixa de potência e com dimensões de carcaça equivalentes às das máquinas de indução (ALMEIDA; FERREIRA; BAOMING, 2014). Um benefício adicional dessas máquinas é a economia de material. De acordo com Kolehmainen (2010), elas podem ser fabricadas utilizando métodos semelhantes aos empregados em motores de indução e motores síncronos de ímãs permanentes. No entanto, sua produção envolve desafios específicos, como estruturas rotóricas mais complexas e exigência de usinagens de alta precisão.

As SynRMs também se destacam por sua confiabilidade térmica, alta eficiência e boa densidade de potência. São compatíveis com estratégias modernas de controle, como o controle vetorial, o que as torna adequadas para aplicações em sistemas de acionamento de velocidade variável (KHUDE; HARUN SHAIKH; UGALE, 2024). Conforme destacado por Riba *et al.* (2016), o ressurgimento do interesse pelas SynRMs deve-se ao progresso na eletrônica de potência, permitindo a criação e o desenvolvimento de novas estratégias de controle.

O desempenho dessas máquinas depende fortemente do projeto eletromagnético do rotor. O número, a geometria e a disposição das barreiras de fluxo influenciam diretamente na relação de saliência, na densidade e ondulação de torque (TAGHAVI; PILLAY, 2014). Quando bem projetadas, as SynRMs podem oferecer desempenho competitivo sem o uso de materiais de terras raras, sendo consideradas uma solução técnica e economicamente viável.

Embora ofereça vantagens significativas, essa tecnologia ainda apresenta algumas limitações, entre as quais se pode-se citar o fator de potência reduzido e uma faixa de operação em potência constante mais limitada em comparação às máquinas de ímãs permanentes, a depender do projeto do rotor e da estratégia de controle adotada (EL HADRAOUI *et al.*, 2022; RIBA *et al.*, 2016). Tais restrições impõem desafios adicionais ao dimensionamento do inversor e à gestão térmica do sistema de tração, sobretudo em aplicações automotivas que demandam ampla variação de carga e velocidade.

De acordo com El Hadraoui *et al.* (2022), o fator de potência mais baixo pode impactar diretamente o custo e o dimensionamento do sistema eletrônico de potência.

Mesmo assim, quando projetadas cuidadosamente, essas máquinas sem ímãs permanentes representam uma opção de baixo custo com alto potencial de aplicação.

No contexto industrial, a tecnologia SynRM já está consolidada. Fabricantes como ABB, Kaiser-Motoren, KBS e Siemens comercializam motores SynRM para aplicações industriais, alguns dos quais operam em faixas de potência entre 0,55 a 315 kW (MURATALIYEV *et al.*, 2022; RIBA *et al.*, 2016). Avanços recentes incluem o desenvolvimento de motores classificados como *ultra premium*, que atendem à classe de eficiência IE5, em conformidade com a norma IEC TS 60034-30-2, o que reforça sua competitividade frente às máquinas de indução e aos motores de ímãs permanentes (FANNING, 2020).

Pesquisadores e engenheiros têm se concentrado no desenvolvimento dessa topologia para aplicações em VEs. Em abril de 2025, a empresa Ricardo anunciou a conclusão do desenvolvimento do Alumotor, um motor SynRM para propulsão elétrica. O protótipo utiliza enrolamentos de alumínio em formato de *hairpin* e sistema de resfriamento a óleo, alcançando uma potência de 214 kW e rendimento superior a 92%. Essas características tornam o motor adequado para veículos comerciais leves e aplicações fora de estrada, com potencial de escalabilidade para outras aplicações (RICARDO, 2025).

Em resumo, a SynRM apresenta características promissoras para a eletromobilidade. Para consolidar sua viabilidade técnica e econômica em VEs, são necessárias pesquisas contínuas voltadas à otimização do projeto eletromagnético, à mitigação da ondulação de torque e ao desenvolvimento de estratégias de controle avançadas que explorem ao máximo seu potencial.

2.1.4 Máquina Síncrona de Relutância Assistida por Ímãs Permanentes

Por atender aos requisitos de alta densidade de conjugado, ampla faixa de velocidade e uso reduzido de ímãs permanentes, a máquina síncrona de relutância assistida por ímãs permanentes (PMA-SynRM), tem atraído a atenção da indústria e da academia em aplicações veiculares (BIANCHI *et al.*, 2016; JAHNS, 2017 *apud* LU *et al.*, 2021).

Uma das principais características dessa topologia é a possibilidade de utilizar quantidades menores de material de terras raras ou, alternativamente, substituir os ímãs de neodímio por ímãs de ferrite inseridos no núcleo do rotor. Essa configuração

melhora o fator de potência e a densidade de conjugado em comparação com a SynRM, tornando-se uma opção mais atraente para a eletromobilidade (YADAV; MANISHA, 2022).

Um exemplo prático da aplicação dessa tecnologia é o motor adotado pela Tesla Inc. no carro elétrico Tesla Model 3. Segundo a empresa, o motor PMa-SynRM utilizado apresenta baixas perdas por correntes parasitas e menor superaquecimento dos ímãs, o que se traduz em maior eficiência e melhor desempenho do motor (YADAV; MANISHA, 2022).

A competitividade dessa tecnologia também está associada à viabilidade de utilização de ímãs de ferrite, o que contribui para a redução de custos e segurança em relação a disponibilidade (AMIN; AZIZ, 2019 *apud* SON *et al.*, 2021). Por esse motivo, as PMa-SynRMs são incluídas no escopo de máquinas elétricas livres de terras raras, diferenciando-se das PMSMs, que ainda dominam o mercado automotivo, mas dependem fortemente de ímãs como o de neodímio.

Fabricantes como a Dana TM4 e a Danfoss já incorporam a PMa-SynRM em seus portfólios. A Dana TM4, por exemplo, desenvolveu a série SRI 200, classificada como um motor híbrido, que oferece até 30% mais torque e potência nominal em comparação com motores assíncronos de mesma dimensão. Além disso, apresenta uma razão de velocidade máxima para velocidade nominal de até 6, indicando uma ampla faixa operacional (DANA TM4, 2020).

Por sua vez, a Danfoss desenvolveu o motor EM-PMI300-T310, com estrutura compacta e robusta, em alumínio. O motor alcança rendimento superior (~96%) ao longo de toda a faixa de operação. É resfriado por líquido, através da mistura de água e glicol, e possui grau de proteção IP65, sendo apropriado para aplicações como motor de tração/propulsão elétrica e outras (DANFOSS, 2024).

Portanto, a PMa-SynRM é uma alternativa atraente à SynRM e à PMSM. Sua presença em produtos comerciais de grandes fabricantes demonstra seu potencial para atender às demandas da mobilidade elétrica. No entanto, desafios relacionados à complexidade do projeto magnético e ao escalonamento de produção ainda exigem atenção contínua da comunidade técnica e científica.

2.1.5 Máquina de Fluxo Axial

Com o avanço na tecnologia de ímã permanente, a máquina de fluxo axial (AFPM) despertou interesse entre os pesquisadores na área de máquinas elétricas. As máquinas com entreferro axial fizeram com que os projetistas passassem a considerar essa solução como viável.

As AFPMs são uma classe de máquinas elétricas em que o fluxo magnético circula na direção axial, paralelo ao eixo de rotação do motor. Essa topologia contrasta com as máquinas de fluxo radial, nas quais o fluxo magnético percorre radialmente o núcleo do estator e do rotor (KAHOURZADE *et al.*, 2014). Devido à sua estrutura compacta e plana, as AFPMs oferecem vantagens como alta densidade de potência, menor peso e volume em comparação às máquinas de fluxo radial (AMIN; KHAN; HUSSAIN BUKHARI, 2019). Além disso, o torque gerado nessas máquinas aumenta proporcionalmente ao cubo do diâmetro externo, o que representa um benefício importante para aplicações que permitam grandes diâmetros, aumentando o desempenho de torque de forma expressiva (KIM *et al.*, 2025).

As AFPMs têm atraído a atenção da indústria automobilística, especialmente no desenvolvimento de VEs. Esses motores são adequados para aplicações que requerem alta eficiência, alta densidade de conjugado e potência, como na integração direta às rodas dos veículos elétricos (MLOT; LUKANISZYN, 2019). A alta eficiência e densidade de potência são proporcionadas pela presença de ímãs permanentes. No entanto, o emprego de materiais de terras raras nos ímãs pode elevar os custos (WANG *et al.*, 2019) e gerar impactos ambientais negativos (KOBLENER *et al.*, 2015).

Conforme Amin; Khan e Hussain Bukhari (2019), as AFPMs podem ser categorizadas com base na estrutura do rotor e estator, ou ainda, de acordo com a quantidade de estatores e rotores presentes nas máquinas. O desempenho dessas máquinas é fortemente influenciado por suas características geométricas, que levam em conta a construção, o projeto e a disposição dos rotores e estatores.

As máquinas de fluxo axial com ímãs permanentes podem ser classificadas quanto à sua topologia estrutural, principalmente de acordo com a combinação de estatores e rotores. Segundo Kang, Lee e Lee (2022), destacam-se quatro configurações principais: a SSSR (*Single Stator Single Rotor*), composta por um único estator e um único rotor, caracteriza-se pela estrutura mais simples e menor espessura, mas pode apresentar dificuldades para manter o entreferro constante

devido às forças de atração axial, exigindo o uso de mancais de empuxo ou estatores sem núcleo; a DSSR (*Double Stator Single Rotor*), formada por dois estatores e um rotor intermediário, consegue balancear as forças de atração magnética, dispensando soluções mecânicas adicionais para compensar forças axiais, embora apresente maior comprimento axial; a SSSR (*Single Stator Double Rotor*), com um estator central entre dois rotores, aumenta a potência ao dispor de mais ímãs permanentes e, em algumas configurações, pode até eliminar o jugo do estator, reduzindo massa e perdas; e, por fim, a *multistage* AFPM, que envolve múltiplos conjuntos de estatores e rotores, viabilizando a maior potência entre as topologias AFPM, porém à custa de um comprimento axial elevado, o que dificulta seu uso em aplicações que demandem dimensões compactas.

Diversos fabricantes têm investido nessa tecnologia para aplicações VEs, visando alta densidade de potência e rendimento. A renomada empresa britânica YASA, subsidiária da Mercedes-Benz, tem se dedicado à pesquisa e ao desenvolvimento de motores AFPM desde sua fundação em 2009, sendo esses motores geralmente aplicados em carros esportivos de alto desempenho (YASA, 2023). A Traxial, empresa belga subsidiária da Magnax, desenvolve motores AFPM sem núcleo de ferro no estator (*Yokeless Axial Flux Motors*), visando aplicações em VEs que exigem elevado desempenho com dimensões reduzidas (TRAXIAL, 2024). A Saietta Group é especializada em motores AFPM voltados principalmente para veículos leves de três e quatro rodas, além de soluções para o segmento de duas rodas e pequenos veículos marítimos (SAIETTA GROUP, 2023). Já a Emrax oferece uma linha versátil desses motores, aplicáveis em veículos automotivos, fora de estrada, aeroespeciais, marítimos e industriais, com a possibilidade de personalização do produto (EMRAX, 2020). Esses fabricantes demonstram o potencial dos motores AFPM como soluções eficientes e compactas para a propulsão elétrica, contribuindo para o avanço da mobilidade elétrica.

Contudo, é importante ressaltar que nem todas essas características são exclusivas das máquinas de fluxo axial. Dessa forma, a seleção de um motor para uma aplicação específica deve ser fundamentada em uma análise comparativa entre diferentes topologias, a fim de determinar a solução mais adequada ao contexto do projeto.

2.2 O ESTADO DA ARTE

Esta seção aborda o estado da arte relacionado à comparação de MEs em aplicações veiculares. Esta revisão da literatura visa identificar as pesquisas já realizadas, lacunas existentes e tendências emergentes no campo das MEs relacionadas à mobilidade elétrica. Ao analisar os estudos disponíveis, busca-se compreender as metodologias adotadas, os resultados alcançados e as contribuições dessas pesquisas para o avanço do conhecimento sobre MEs aplicadas à mobilidade elétrica.

Com base em busca na literatura, observa-se que várias topologias de MEs foram introduzidas e investigadas para aplicações de tração. A comparação entre diferentes MEs representa um desafio significativo. De acordo com Pop *et al.* (2013), muitos pesquisadores tentam estabelecer parâmetros de igualdade, frequentemente através de restrições subjetivas. O resultado geralmente é que as próprias restrições favorecem uma geometria em detrimento da outra, levando a resultados inconclusivos.

Diversos estudos comparativos foram realizados para analisar o desempenho de várias MEs aplicadas a sistemas de tração em veículos puramente elétricos e/ou híbridos. Zeraoulia, Benbouzid e Diallo (2006) conduziram uma análise comparativa focada em determinar o sistema de propulsão elétrica ideal para um VEH. A partir de uma revisão detalhada, o estudo avaliou o desempenho de quatro topologias. A conclusão destacada foi a de que o motor de indução (IM) atende melhor aos requisitos da propulsão elétrica para VEHs. Embora o artigo demonstre que esse motor seja a escolha predominante, observa-se uma competição acirrada com os motores de ímã permanente.

Hashemnia e Asaei (2008) compararam cinco motores elétricos para determinar os benefícios de cada um e identificar o mais adequado para aplicações veiculares. Concluíram que, embora a tecnologia dos motores de indução seja mais madura, os motores de corrente contínua sem escovas (*brushless* DC) e de ímã permanente são mais adequados para VEs, devido à maior eficiência energética, menor peso e tamanho, e menor necessidade de manutenção.

Xue, Cheng e Cheung (2008) conduziram uma análise comparativa abordando critérios como eficiência, peso e custo em quatro motores distintos. O estudo apontou os motores de relutância chaveada (*Switched Reluctance Motor* – SRM) como

superiores em diversas categorias, tornando-os a opção prioritária para aplicações em VEs.

Yang *et al.* (2015) propuseram comparações para destacar o mérito de cada topologia de motor para aplicação em VEs e VEHs. No estudo, é apresentado o projeto de quatro topologias típicas de motores de tração selecionadas para comparação, considerando critérios como desempenho, rendimento e vibração. A simulação e os resultados analíticos revelaram que cada topologia de motor possui características próprias e a região de maior rendimento de cada motor está localizada em diferentes regiões do gráfico conjugado-velocidade para os critérios estabelecidos.

Bostanci *et al.* (2017) investigaram as especificações ideais para uma ME de tração, selecionando parâmetros de desempenho como densidade de potência, rendimento, ondulação de conjugado, vibração, ruído e tolerância a falhas. O estudo comparativo explorou os principais desafios enfrentados pelas máquinas síncronas de relutância e apresentou uma revisão abrangente, comparando o desempenho de sete MEs com densidade de corrente de 6 A/mm², comprimento axial de 84 mm e refrigeração a ar.

Rind *et al.* (2017) apresentaram uma avaliação de desempenho incluindo quatro topologias, com classificações em uma escala de 1 a 5 em 14 critérios. A PMSM obteve as melhores avaliações em aspectos como densidade de potência, rendimento e torque, sendo considerada com desempenho mais equilibrado e elevado (total de 60 pontos). A IM se destacou pela facilidade de controle, robustez, confiabilidade e custo alcançando o maior escore total (62 pontos), sendo amplamente utilizada na indústria automobilística. O SRM demonstrou bons resultados em confiabilidade e robustez, com potencial competitivo devido ao seu baixo custo e tolerância a falhas, embora apresente desafios relacionados ao controle e níveis de ruído. Já o motor DC, apresentou desempenho inferior, sobretudo em aspectos como densidade de potência e rendimento, refletindo sua progressiva substituição por alternativas mais modernas.

Bolvashenkov, Kammermann e Herzog (2018) propuseram uma metodologia de análise multicritério para determinar a ME mais adequada para carros elétricos, aeronaves, navios e trens. Considerando aspectos como rendimento, densidade de potência, custo, entre outros, o estudo visou identificar o motor de tração mais adequado. Concluíram que, em muitos casos, não há um único tipo adequado. Para carros, qualquer máquina analisada pode ser utilizada, dependendo das exigências

específicas, enquanto para aeronaves, o PMSM é preferível devido aos requisitos do sistema.

Bilatiu *et al.* (2019) realizaram uma análise das opções de sistemas de propulsão disponíveis no mercado, identificando suas características e determinando os requisitos essenciais do sistema. Um estudo comparativo foi conduzido entre os sistemas avaliados, descrevendo quatro tipos de máquinas elétricas, cujas características foram classificadas por meio de pontuação. No entanto, os autores sugerem que uma análise mais precisa demandaria um modelo virtual do sistema de propulsão usando *software* especializado, sendo os resultados apresentados uma base para pesquisas futuras em propulsão elétrica e híbrida.

De forma complementar, Ramesh e Lenin (2019) apresentaram uma comparação qualitativa entre quatro topologias, considerando critérios como densidade de potência, rendimento, facilidade de controle, simplicidade de fabricação e custo. Os resultados evidenciam que a PMSM e a PMS-SynRM possuem vantagens superiores em termos de densidade de potência e eficiência. A IM continua sendo uma opção robusta e economicamente viável, enquanto o SRM destaca-se pelo baixo custo e simplicidade. Enquanto os motores de corrente contínua mostraram o menor desempenho.

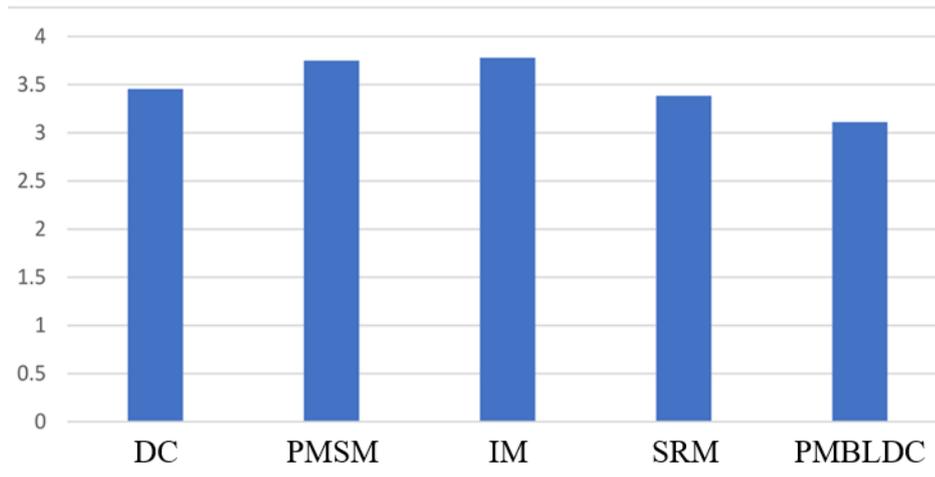
Em seu artigo, El-Refaie e Osama (2019) discutem a crescente demanda por MEs de alta potência específica em aplicações como tração híbrida/elétrica e aeroespaciais. O estudo fornece uma revisão abrangente dessas máquinas, especialmente aquelas que já foram construídas e testadas, sendo consideradas as principais candidatas a definir o estado da arte. O trabalho também evidencia a necessidade emergente de máquinas elétricas inovadoras, particularmente para aplicações aeroespaciais, enfatizando a importância de uma "perspectiva de sistema" na avaliação dessas tecnologias.

Nos últimos anos, a maioria dos sistemas de acionamento de tração tem evoluído para incluir algum tipo de máquina com ímã permanente. Entretanto, existe uma tendência crescente pela busca de melhorias na densidade de potência e eficiência das máquinas de tração, resultando em projetos inovadores e aprimoramentos nas topologias básicas de máquinas, bem como no surgimento de novas topologias (AGAMLOH; VON JOUANNE; YOKOCHI, 2020).

No estudo conduzido por El Hadraoui *et al.* (2022), os autores realizaram uma análise multicritério comparando cinco tipos de máquinas elétricas empregadas em

sistemas de tração elétrica. Os autores utilizaram critérios como desempenho, confiabilidade e rendimento. Os resultados da avaliação através do método escolhido são mostrados na Figura 5.

Figura 5 – Resultados globais da classificação dos tipos de motor



Fonte: adaptado de El Hadraoui *et al.* (2022).

Ainda de acordo com os autores, a análise comparativa proposta mostra que o motor de indução e o motor síncrono de ímã permanente são os mais adequados, conforme os critérios que foram considerados, sendo as IMs de baixo custo de manutenção e alta confiabilidade, enquanto as PMSMs oferecem maior rendimento e desempenho superior. Em contraste, os motores de corrente contínua (DC) vêm sendo progressivamente substituídos no contexto da mobilidade elétrica devido aos altos custos de manutenção e menor competitividade para aplicações em VEs modernos. Os motores síncronos de relutância chaveada (SRM) são uma opção interessante devido ao baixo custo do conjunto motor/controlador em comparação com outras soluções, aliado a boa confiabilidade, rendimento e capacidade de tolerância a falhas. Já os motores de corrente contínua sem escovas (*Brushless DC* – BLDC), embora ofereçam alta densidade de potência, apresentam custos elevados de controle e manutenção.

Com base na Figura 5, observa-se que os valores globais de desempenho atribuídos às diferentes máquinas são relativamente próximos entre si. Essa proximidade reduz a distinção clara entre as topologias e pode limitar a confiabilidade na escolha do motor mais adequado para determinadas aplicações. Essa constatação sugere que ainda há margem para avanços em pesquisas no campo das máquinas elétricas, com foco em soluções que atendam às demandas específicas de diferentes

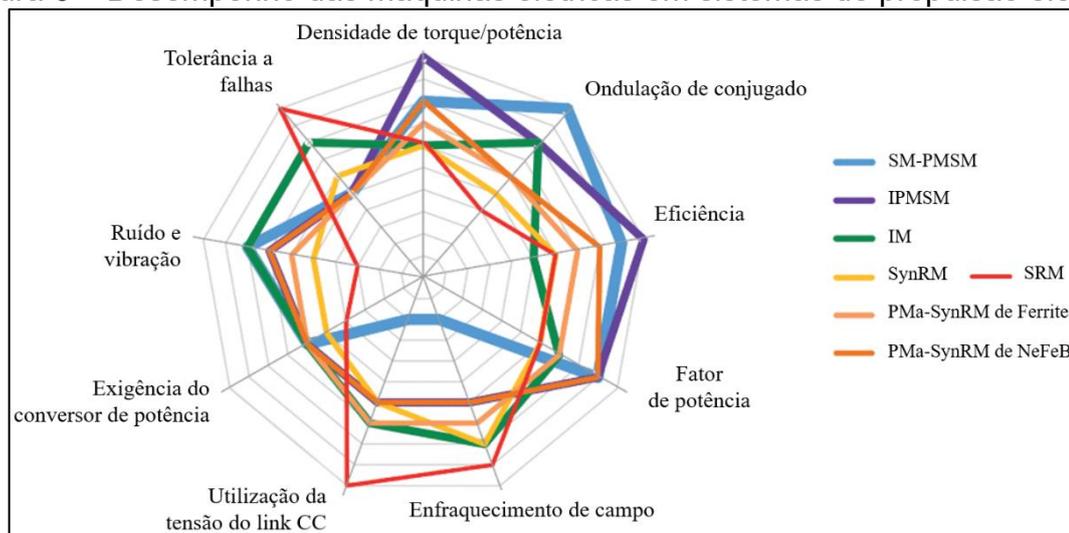
contextos de tração veicular. A ausência de cenários distintos na análise limita a capacidade do modelo de capturar as exigências reais de operação associadas a cada topologia. Esse panorama reforça a necessidade de utilizar métodos multicritério mais sensíveis e refinados, capazes de lidar com múltiplas variáveis. Avanços nessa direção podem aprimorar a seleção de sistemas de propulsão elétrica e, conseqüentemente, contribuir com a mobilidade elétrica.

2.3 REQUISITOS DE DESEMPENHO

A identificação e priorização de requisitos que atendam a objetivos específicos são fundamentais para otimizar as decisões estratégicas no planejamento de lançamento de um novo produto no mercado, como na escolha de uma topologia de ME voltada à propulsão de veículos.

Segundo Bostanci *et al.* (2017), na eletrificação dos transportes, embora a maior parte dos avanços tenha ocorrido em áreas como eletrônica de potência, sistemas de controle e armazenamento de energia, há uma demanda crescente por motores de tração inovadores e aprimorados para atender aos requisitos de desempenho exigidos em um trem de força elétrico. Ao comparar as máquinas com base nas especificações definidas, os autores apresentam nove índices de desempenho conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Desempenho das máquinas elétricas em sistemas de propulsão elétrica



Fonte: adaptado de Bostanci *et al.*, (2017).

O diagrama de radar exibido na Figura 6 ilustra uma comparação entre as MEs por meio de parâmetros multivariados. Na representação, cada cor corresponde

a uma topologia de máquina elétrica analisada: máquina de indução (IM), máquina síncrona de ímãs permanentes montados na superfície (SM-PMSM) e no interior do rotor (IPMSM), máquina síncrona de relutância (SynRel), máquina de relutância comutada (SRM) e máquinas síncronas de relutância assistida por ímãs permanentes (PMSM-SynRM), avaliadas com diferentes tipos de ímã (NeFeB e ferrite). Essa visualização permite comparar os parâmetros de forma integrada, destacando as vantagens e limitações relativas de cada topologia.

Ainda de acordo com os autores, as pesquisas em motores de tração avançados se concentram principalmente em requisitos como maior rendimento, maior densidade de potência, maior conjugado específico, menor custo e ruído. Zhu e Howe (2007) afirmam que as máquinas elétricas e os acionamentos elétricos são tecnologias-chave para os VEs. Para aplicações de tração, destacam-se como características desejáveis em uma ME os seguintes requisitos (BOSTANCI *et al.*, 2017; CHAN, 2007; CHAU, 2016; EL HADRAOUI *et al.*, 2022; SHAO *et al.*, 2020; ZERAOULIA; BENBOUZID; DIALLO, 2006; ZHU; CHU; GUAN, 2017; ZHU; HOWE, 2007):

1. Elevado conjugado e densidade de potência;
2. Alto conjugado em baixas velocidades para partida, aceleração e acíves;
3. Alta potência em altas velocidades para cruzeiro;
4. Ampla faixa de velocidade, com uma faixa de operação de potência constante de 3 a 4 vezes a velocidade base;
5. Alto rendimento em ampla faixa de velocidade e conjugado, incluindo operação de baixo conjugado;
6. Capacidade de sobrecarga intermitente, geralmente o dobro da potência nominal;
7. Alta confiabilidade (tolerância a falhas e segurança);
8. Robustez adequadas ao ambiente do veículo;
9. Custo aceitável.
10. Resposta dinâmica rápida;
11. Operação em condições exigentes como partidas/paradas frequentes;
12. Funcionamento em condições ambientais adversas, como poeira, água, temperaturas baixas e altas;

13. Manutenção e serviços de baixa frequência;
14. Conforto (acústica adequada);
15. Baixa ondulação de conjugado;
16. Durabilidade (resistência ao desgaste);
17. Facilidade de controle.

Os requisitos de desempenho identificados na literatura podem ser considerados, modificados e/ou agrupados para análise comparativa. Além disso, outros atributos sob o ponto de vista de fabricação podem ser levados em conta como critérios, como a ausência de ímãs de terras raras e o custo de fabricação. Com a crescente eletrificação dos transportes, torna-se cada vez mais importante ter uma compreensão abrangente dos critérios relevantes na seleção da ME. Portanto, é necessário compreender o significado de cada requisito listado como figura de mérito na avaliação. Dessa forma, considerando as exigências de desempenho e as características desejáveis mencionadas na literatura, foram definidos sete critérios essenciais para a comparação entre as topologias de máquinas elétricas.

Assim, na Seção 4.3 é apresentada uma análise detalhada dos critérios selecionados, bem como a descrição de cada critério escolhido. A seleção desses critérios busca garantir uma avaliação abrangente das diferentes topologias, permitindo uma comparação embasada em aspectos técnicos, financeiros e ambientais.

Em alguns estudos já realizados, foram obtidos resultados e pontuações a partir do projeto e simulação do funcionamento de diversas máquinas elétricas aplicadas na tração elétrica, conforme levantamento destacado no Apêndice D. Alguns autores já exploraram o uso de métodos multicritério para seleção de topologias de motores, definindo critérios de interesse específicos para avaliar o desempenho de diferentes configurações. No entanto, uma comparação abrangente que considere a perspectiva do fabricante, e não apenas os parâmetros de desempenho de máquinas elétricas em sistemas de propulsão veicular, ainda é pouco abordada na literatura. Portanto, para obter resultados sólidos e fundamentados, é necessário aplicar um método multicritério que valide a seleção de uma topologia de motor elétrico ideal para determinadas aplicações.

2.4 METODOLOGIAS PARA TOMADA DE DECISÃO

Tomar decisões é uma tarefa recorrente em todos os níveis da gestão, implicando na escolha entre alternativas viáveis diante de restrições, objetivos e recursos disponíveis. No entanto, problemas reais raramente podem ser resolvidos com base em um único parâmetro. Em geral, as decisões exigem a consideração simultânea de múltiplos fatores, muitas vezes conflitantes entre si, o que torna o processo decisório mais complexo e sujeito a incertezas.

Os métodos de Tomada de Decisão com Múltiplos Critérios (*Multiple Criteria Decision Making* – MCDM) oferecem uma estrutura sistemática para apoiar decisões complexas. Essa abordagem é particularmente útil quando há incertezas elevadas, objetivos conflitantes e múltiplas perspectivas envolvidas (KAHRAMAN, 2008). A aplicação de metodologias estruturadas possibilita reduzir o número de alternativas, incorporar preferências dos decisores e orientar a escolha final com base em critérios objetivos e consistentes. Os métodos MCDM têm se mostrado eficazes nesse processo, permitindo a seleção de soluções mais adequadas às necessidades e prioridades de cada contexto decisório.

O setor industrial, caracterizado por um processo dinâmico e elevada competitividade, demanda de decisões eficazes para aperfeiçoar os resultados do conjunto e não das partes isoladamente. Estabelecer uma correlação entre alternativas e critérios técnicos relevantes é essencial para identificar a solução mais apropriada. Nesse cenário, a abordagem combinada AHP-TOPSIS configura-se como uma ferramenta eficaz para conduzir decisões de forma racional e estruturada, conforme demonstrado por Liu *et al.* (2024) em seu estudo sobre um *framework* de tomada de decisão multicritério para manutenção preventiva de pavimentos, onde destacam que o modelo de decisão utilizado permite uma análise multidimensional, reduzindo a subjetividade e facilitando a identificação da estratégia mais adequada.

A combinação entre o AHP, com sua abordagem hierárquica, e o TOPSIS, com sua avaliação de similaridade com a solução ideal, oferece um meio robusto de avaliar e comparar diferentes alternativas. Esse enfoque complementar dos dois métodos contribui para uma análise integrada que considera múltiplos critérios, tornando-se uma ferramenta valiosa para a tomada de decisões mais coerentes e justificadas, alinhadas com os objetivos estratégicos no ambiente industrial.

2.4.1 Método AHP – Processo Analítico Hierárquico

Dentre os métodos multicritérios, o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) ou Processo Analítico Hierárquico é um dos mais populares e foi aplicado para resolver vários problemas complexos de decisão (JAGANATHAN; ERINJERI; KER, 2007). Sua vantagem principal é a capacidade inerente de incorporar fatores intangíveis e subjetivos no processo decisório, aspecto relevante para esta dissertação.

O AHP foi desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1970, na *Wharton School of Business* da Universidade da Pensilvânia, localizada na Filadélfia, Estados Unidos, motivado pelas dificuldades de comunicação observadas durante seu trabalho. Havia uma lacuna quanto à ausência de um enfoque sistêmico prático para a determinação de prioridades na tomada de decisão (SAATY, 1991). O método foi descrito no livro "*The Analytic Hierarchy Process*", publicado em 1980.

Gomes, Araya e Carignano (2004) destacam que, na aplicação desse método, o problema de decisão é estruturado em níveis hierárquicos, o que facilita sua compreensão e avaliação. A síntese dos julgamentos dos agentes de decisão, fornece uma medida global de prioridade entre as alternativas.

Segundo Tortorella e Fogliatto (2008), o AHP é considerado uma das ferramentas de apoio ao processo decisório de múltiplos critérios em maior quantidade de aplicações práticas reportadas na literatura e cujo âmbito de aplicação abrange as áreas de engenharia, da manufatura, da educação, da indústria, médica, agrícola, do setor governamental, entre outros. Shimizu (2010) aponta sua utilização em tarefas como definição de prioridades, avaliação de custos e benefícios, alocação de recursos, análise sob risco, *benchmarking* e previsões políticas ou sociais. Silva *et al.* (2020) constataram que, no cenário brasileiro de pesquisa, o método AHP se encontra em estágio embrionário, entretanto apresenta tendência de crescimento acelerado nos próximos anos.

Para Saaty (1994), o benefício do método está na integração entre os valores dos julgamentos das comparações paritárias (baseados em experiência), na intuição e em dados físicos e, por este motivo, o AHP pode lidar com aspectos qualitativos e quantitativos para tratar de um problema de decisão.

Dessa forma, o AHP apresenta-se como uma ferramenta capaz de apoiar a tomada de decisões complexas ao oferecer um modelo estruturado, lógico e replicável para a definição de prioridades. Suas aplicações em diferentes setores demonstram

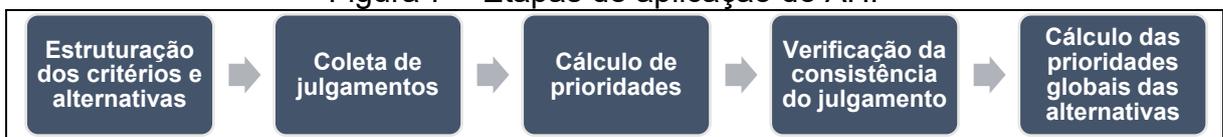
sua relevância prática e potencial de contribuição em contextos como o da eletromobilidade, foco deste trabalho.

2.4.1.1 Etapas de aplicação do método AHP

A metodologia AHP permite decompor um problema em uma hierarquia de subproblemas, de maneira que possam ser mais facilmente compreendidos e avaliados (BHUSHAN; RAI, 2004). As avaliações subjetivas, que podem ser dados, experiências, percepções e intuições, são convertidas para valores numéricos e processados classificando cada alternativa em uma escala numérica. Em outras palavras, o AHP permite a formalização e o registro do racional utilizado na escolha da alternativa.

Para facilitar o entendimento sobre a aplicação do método, de um ponto de vista processual, fundamentada em Saaty (1991), a Figura 7 apresenta a aplicação do modelo que consiste em cinco etapas.

Figura 7 – Etapas de aplicação do AHP



Fonte: elaborado pela autora em base em Saaty (1991).

Saaty (1991) menciona não haver um procedimento padrão para levantar os critérios e objetivos. Destarte, o autor sugere a utilização de *brainstorming* com especialistas e/ou que sejam realizadas consultas bibliográficas para ajudar na elucidação dos critérios e dos objetivos.

De forma complementar, abaixo se tem o passo a passo para implementação do método AHP. Para se fazer compreender, mais adiante serão explanadas detalhadamente cada uma das etapas.

- a) Definir o problema a ser resolvido;
- b) Estruturar as hierarquias;
- c) Definir as prioridades;
- d) Construir a matriz pareada;
- e) Obter o autovetor da matriz;
- f) Verificar a consistência lógica de comparações de pares;
- g) Avaliar as alternativas.

Para Chaves (2011) a definição do problema diz respeito ao reconhecimento do objetivo a ser alcançado, que envolve as alternativas de decisão e restrições pertinentes. Em outras palavras, significa entender com clareza o objetivo final da decisão a ser tomada. A solução do problema envolve aspectos que devem representar, da melhor forma possível, as preferências do tomador de decisão. Uma vez tendo-se reconhecido a problemática de decisão, o passo seguinte é a aplicação do método.

Segundo Colin (2007) a hierarquia de um problema é representada por um objetivo central, por seus fatores de decisão e pelas alternativas de decisão. Saaty (1991) faz a afirmação de que hierarquia é uma abstração da estrutura de um sistema para estudar as interações funcionais de seus componentes e seus impactos no sistema total.

De modo a garantir que a modelagem seja bem feita, devem ser incluídos todos os detalhes relevantes para a representação do problema na construção das hierarquias. O início da hierarquia, se constitui em um objetivo global, enquanto nos níveis sucessivamente inferiores colocam-se os critérios que apresentam algum impacto no critério do nível superior, conforme representado na Figura 8.

Figura 8 – Estrutura hierárquica genérica para problemas de decisão



Fonte: elaborado pela autora com base em Ribeiro; Passos e Teixeira (2011).

A respeito de cada nível da estrutura hierárquica exposta na Figura 8, Wolff (2008) explica que o objetivo global ou problema decisório se refere ao que se deseja alcançar ou à decisão que se pretende tomar. Devido ao seu alto grau de complexidade, o objetivo é representado no nível mais elevado da decisão. Já os critérios são fatores que exercem influência no objetivo global com diferentes níveis

de relevância e são definidos pelos tomadores de decisão, enquanto as alternativas correspondem às ações possíveis de serem adotadas para atingir o objetivo ou solucionar problema decisório. A depender do modelo de decisão, é possível ainda que se tenha subcritérios.

De acordo com Saaty (1984), a partir do momento em que essa hierarquia lógica está estruturada, os tomadores de decisão devem avaliar sistematicamente as alternativas através da comparação, de duas em duas, dentro de cada um dos critérios. Segundo Passos (2010), imediatamente após a definição da estrutura hierárquica que compõe a situação, é preciso determinar quem serão os decisores responsáveis por eleger os critérios. Peinado (2016), afirma que a quantidade de decisores designados, bem como suas qualificações, deve ser determinada a fim de garantir que os resultados tenham maior confiabilidade, variando, assim, de acordo com o objeto de pesquisa.

Para a definição das prioridades, o idealizador da metodologia, Saaty (1991), propõe uma escala fundamental de julgamento para que seja realizada a comparação par a par, em que cada comparação tem seu nível de intensidade ou importância, conforme o Quadro 2.

Quadro 2 – Escala fundamental de Saaty

Escala Numérica	Definição	Explicação
1	Igual importância	Ambas as atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorecendo uma atividade em relação à outra com ordem de afirmação a mais alta possível
2,4,6,8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição entre duas definições

Fonte: adaptado de Saaty (1991).

A escala fundamental de Saaty, exibida no Quadro 2, define e explica os valores atribuídos que vão de 1 a 9. Segundo Rivas (2016), a tabela serve como base para auxiliar nas decisões em comparação por pares de elementos de cada nível em relação a um critério no nível superior seguinte.

A próxima etapa é a priorização das alternativas, com os cálculos das prioridades locais e globais. Em resumo, trata-se de calcular a contribuição relativa de cada elemento da estrutura hierárquica em relação ao objetivo imediato e em relação ao objetivo principal.

Em concordância com Passos (2010), primeiramente é realizado o cálculo das prioridades de cada elemento em relação ao seu elemento imediatamente superior, encontrando-se então a prioridade média local. Em seguida, calcula-se a prioridade global (relacionada ao objetivo principal) do respectivo elemento e multiplica-se sua prioridade média local pelas prioridades médias locais dos elementos hierarquicamente superiores.

Na priorização das alternativas, pode-se fazer perguntas do tipo: “Qual a importância do critério 1 em relação ao critério 2?” Esse procedimento é conhecido por comparação par a par (*pairwise comparison*), que, de acordo com Cardoso (2022), é utilizado para estimar a escala em que os elementos de cada nível da hierarquia são medidos e avaliar, no final, a performance de cada alternativa em relação aos critérios.

Segundo Saaty (1991), as prioridades médias locais dos elementos comparados na matriz de julgamento podem ser obtidas por meio de operações matriciais, nas quais calcula-se o principal autovetor da matriz de julgamento, normalizando-o em seguida. O julgamento é realizado por meio da comparação que vai gerar matrizes quadradas, com dimensões ($N \times N$), onde o número na linha i e na coluna j dá a importância do i -ésimo critério C_i em relação ao j -ésimo critério C_j , como se observa a seguir.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1N} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2N} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \dots & a_{3N} \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ 1/a_{1N} & 1/a_{2N} & 1/a_{3N} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Os elementos da diagonal de \mathbf{A} , $a_{11}, a_{22}, a_{33}, \dots, a_{NN}$, assumirão sempre valores unitários, ($a_{ij} = 1$ se $i = j$), porque um critério não pode ter nem maior nem menor importância quando comparado com ele mesmo. Assim, para cada julgamento

registrado na posição de linha i e coluna j , representado por a_{ij} , há um valor igual a $1/a_{ij}$ na posição recíproca, isto é, na posição de linha j e coluna i .

A matriz de julgamento, \mathbf{A} , é um instrumento de coleta construído a partir do julgamento dos decisores. O julgamento deve ser baseado na escala fundamental de Saaty (1991), conforme o Quadro 2, realizando primeiro o julgamento conceitual e, em seguida, se faz a conversão para a escala numérica a fim de registrá-lo na matriz, como também, o julgamento recíproco associado.

De acordo com Gomes, González Araya e Carignano (2004), sendo N o número de elementos comparados, ou ainda, a quantidade de critérios, o número total de comparações a serem realizadas, c , é definido conforme:

$$c = \frac{N(N-1)}{2} \quad (2)$$

A partir da matriz inicial, é necessário realizar a normalização dessa matriz e, de acordo com Tagliari (2020), isso pode ser concluído fazendo-se o somatório dos valores de cada processo (coluna) e realizando a divisão do valor de cada célula pela soma dos valores obtidos na coluna. O resultado desta normalização é realizado para cada uma das células da matriz (coluna/processo). A equação a seguir representa a matriz de comparação normalizada (\mathbf{A}_n).

$$\mathbf{A}_n = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sum_{j=1}^N a_{1j}} & \frac{a_{12}}{\sum_{j=1}^N a_{2j}} & \frac{a_{13}}{\sum_{j=1}^N a_{3j}} & \cdots & \frac{a_{1j}}{\sum_{j=1}^N a_{Nj}} \\ \frac{(1/a_{12})}{\sum_{j=1}^N a_{1j}} & \frac{1}{\sum_{j=1}^N a_{2j}} & \frac{a_{23}}{\sum_{j=1}^N a_{3j}} & \cdots & \frac{a_{2j}}{\sum_{j=1}^N a_{Nj}} \\ \frac{(1/a_{13})}{\sum_{j=1}^N a_{1j}} & \frac{(1/a_{23})}{\sum_{j=1}^N a_{2j}} & \frac{1}{\sum_{j=1}^N a_{3j}} & \cdots & \frac{a_{3j}}{\sum_{j=1}^N a_{Nj}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ \frac{(1/a_{1j})}{\sum_{j=1}^N a_{1j}} & \frac{(1/a_{2j})}{\sum_{j=1}^N a_{2j}} & \frac{(1/a_{3j})}{\sum_{j=1}^N a_{3j}} & \cdots & \frac{1}{\sum_{j=1}^N a_{Nj}} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Após a construção da matriz pareada e normalizada, é realizada a fase de obtenção do autovetor (\mathbf{w}) principal (autovetor associado ao maior autovalor), que é também conhecido como vetor de prioridade. Uma forma de obter o autovetor é através da média de cada linha, sendo calculado por meio da soma dos elementos de cada linha da matriz normalizada e da divisão desta soma pelo número de elementos na linha (FRANCO *et al.*, 2017). As formas de obtenção do autovetor são variadas e, de acordo com Saaty (1991), os componentes do vetor de prioridades (\mathbf{Aw}) são

resultados da estimativa desse autovetor (\mathbf{w}) conforme a equação a seguir, em que \mathbf{A} é a matriz de julgamentos e λ_{max} é o máximo autovalor.

$$\mathbf{A}\mathbf{w} = \lambda_{max}\mathbf{w} \quad (4)$$

Saaty (1990) propõe a normalização de \mathbf{w} pela soma de seus elementos, de forma a obter uma composição das importâncias igual a 1 (100%). Os valores encontrados no vetor de prioridade determinam a participação ou o peso desse critério em relação ao resultado total do objetivo.

De acordo com Oliveira Neto (2009), o modelo AHP converte os julgamentos realizados pelos decisores em valores percentuais (prioridades relativas), sendo calculados os desempenhos globais para cada uma das alternativas. Isso permite que elementos imensuráveis possam ser comparados, auxiliando a tomada de decisão para a obtenção do objetivo principal.

Em vista do que foi exposto, o próprio idealizador do método, Saaty, apresenta outro procedimento mais simples para gerar o vetor de prioridades com valores aproximados. Tal procedimento foi empregado por Vargas (2010), no qual: a) se realiza a soma dos julgamentos registrados em cada coluna da matriz de julgamentos; b) cria-se uma matriz normalizada, em que cada elemento da nova matriz é obtido pelo elemento da matriz original dividido pelo total de sua respectiva coluna; c) a prioridade é calculada por meio da média aritmética dos elementos de cada linha da matriz normalizada.

Dessa forma, o resultado obtido pela média aritmética em cada linha é correspondente ao total percentual relativo de prioridades ou preferências em relação ao objetivo imediato. O vetor de prioridades resultante é o chamado autovetor da matriz, \mathbf{w} , devendo ter a soma de seus elementos normalizada para se igualar a 1. Por conseguinte, é realizado o cálculo da consistência lógica das comparações de pares que é realizada com o objetivo de diminuir as incertezas através do cálculo das coerências das operações efetuadas (SAATY, 1991). O referido autor admite uma tolerância de 10% para as inconsistências.

Como a apuração é embasada em julgamentos humanos dos critérios de avaliação, pode haver alguma inconsistência na avaliação e, conseqüentemente, na realização dos cálculos (FONTANIVE *et al.*, 2017). Portanto, são necessárias algumas operações matemáticas, como o cálculo do autovalor máximo ($\lambda_{máx}$), o índice de

consistência (γ – *Consistency Index*) e o cálculo da razão de consistência (r – *Consistency Ratio*).

Para obter o autovalor máximo se calcula o maior autovalor da matriz de julgamento através do somatório do produto de cada total da coluna j da matriz original de julgamentos por cada elemento na posição j do vetor de prioridade, considerando j a coluna da matriz de julgamento, em que $1 \leq j \leq N$. De acordo com Vargas (2010), o cálculo de $\lambda_{m\acute{a}x}$ pode ser realizado conforme a seguir:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \sum_{j=1}^N t_j \times p_j \quad (5)$$

Na equação anterior, N representa a ordem da matriz, t_j o somatório da coluna j da matriz de julgamento e p_j é a prioridade calculada para o critério localizado na linha j .

Após obter o autovalor máximo, realiza-se o cálculo para o índice de consistência, que serve para avaliar o grau de inconsistência da matriz de julgamentos paritários, através da equação:

$$\gamma = \frac{|\lambda_{m\acute{a}x} - N|}{N-1} \quad (6)$$

A razão de consistência é um indicador da coerência das comparações, que segundo Costa (2002), permite avaliar a inconsistência em função da ordem da matriz de julgamentos. De acordo com Saaty (2001), este índice pode ser calculado conforme a seguinte equação.

$$r = \frac{\gamma}{v} \quad (7)$$

O cálculo da razão de consistência considera um erro aleatório associado à ordem da matriz que é dado pelo índice randômico (v – *Random Index*), sendo que esse índice varia com o tamanho da matriz e pode ser obtido conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Índices de consistência randômicos

Ordem da matriz (N)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
v	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Fonte: Adaptado de Saaty (1991).

Em seu trabalho, Saaty sugeriu que é aceitável uma razão de consistência inferior a 0,10. Caso os valores de r sejam maiores que 10%, sugere-se uma revisão

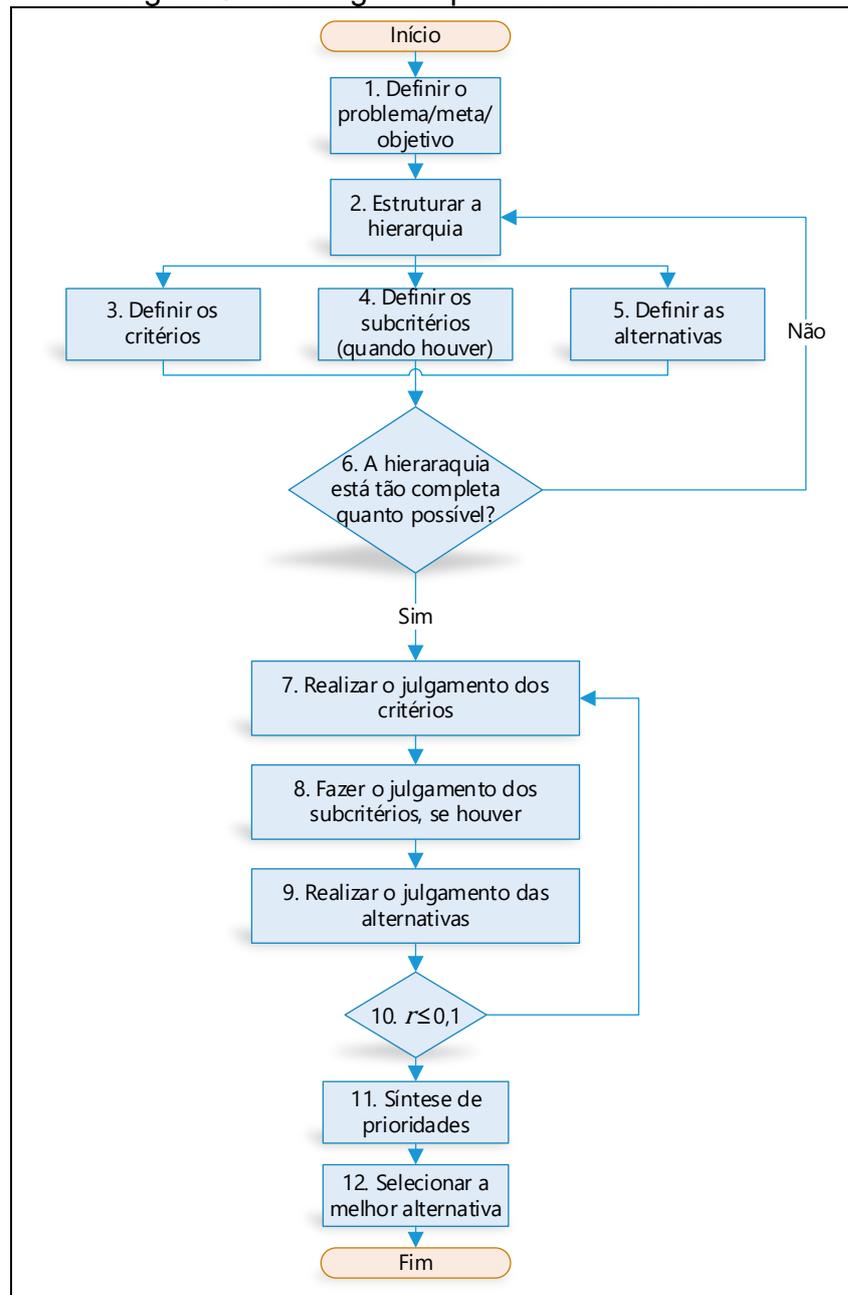
na matriz de comparações, por exemplo, reescrevendo questões do questionário ou recategorizando elementos até que a consistência esteja de acordo.

A etapa final envolve o cálculo do desempenho geral das alternativas, seguido pela análise e avaliação dos resultados obtidos. Nessa fase, é fundamental examinar os dados gerados em cada etapa do método, levando em consideração a alternativa mais viável e adequada ao contexto do problema em questão. Dessa forma, é possível tomar decisões embasadas, que atendam às demandas e necessidades específicas do cenário analisado.

De acordo com Saaty (1991) e tomando como base a estrutura hierárquica do AHP, as prioridades globais calculadas para cada critério correspondem à importância de cada critério em relação ao objetivo principal. Para se obter a prioridade global das alternativas, deve-se realizar o somatório das prioridades globais das alternativas calculadas em cada critério. Prioridade essa que determinará a contribuição da alternativa para o objetivo principal.

A seguir, na Figura 9 é apresentado um fluxograma que contribui para clarificar as etapas que caracterizam a aplicação do método AHP.

Figura 9 – Fluxograma para o método AHP



Fonte: elaborado pela autora com base em Silva *et al.* (2020).

Na Figura 9, as etapas 1 a 6 correspondem à fase de estruturação do problema, na qual se define o objetivo, organiza-se a hierarquia com critérios e subcritérios (quando houver) e se estabelecem as alternativas a serem analisadas, garantindo que a hierarquia seja suficientemente completa para representar o problema de decisão. As etapas 7, 8 e 9 equivalem à modelagem matemática que envolve a elaboração das matrizes para cálculo do vetor de pesos e obtenção das prioridades relativas. A etapa 10 trata de verificar a consistência dos julgamentos, a 11 da síntese das prioridades globais e, finalmente, a 12 é a tomada de decisão.

2.4.2 TOPSIS – Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade à Solução Ideal

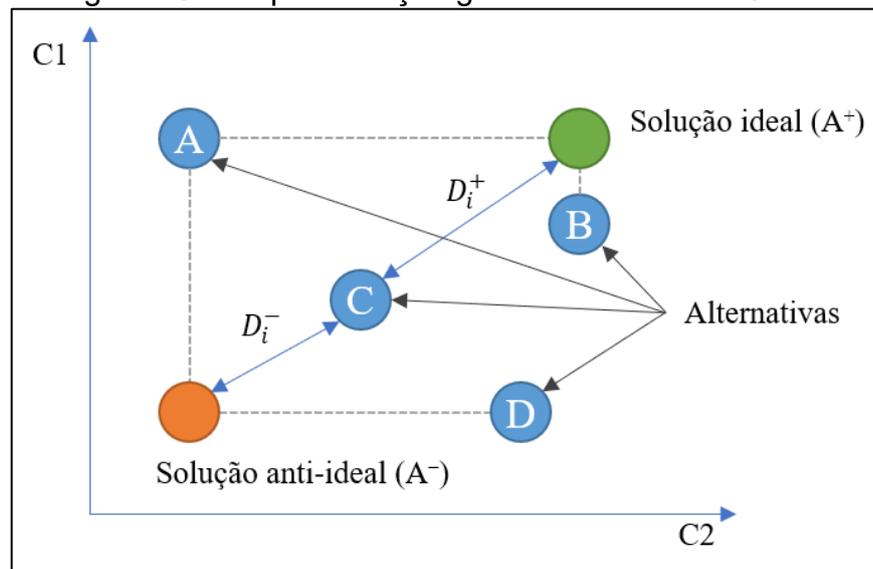
Com a compreensão do AHP e sua capacidade de estruturar critérios em uma hierarquia lógica e avaliar sua importância relativa, o método é considerado uma base sólida para análises multicritério. É nesse contexto que o TOPSIS entra, oferecendo uma abordagem complementar para classificar as alternativas e apoiar a tomada de decisão em muitas aplicações.

A Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade à Solução Ideal, conhecida pela sigla em inglês TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), foi proposta por Hwang e Yoon (1981). De acordo com Chakraborty (2022), trata-se de um método de tomada de decisão que avalia múltiplos critérios para identificar a melhor solução dentre as alternativas.

De acordo com Brites (2008), o método TOPSIS baseia-se no princípio de que a melhor alternativa é aquela que se encontra mais próxima de uma solução ideal (PIS – *Positive Ideal Solution*) e mais distante de uma solução indesejada (NIS – *Negative Ideal Solution*). Isso é determinado por meio de um coeficiente de similaridade, que avalia a proximidade entre as alternativas. Neste caso, cada alternativa é avaliada pelo tomador de decisão com o objetivo de escolher a alternativa que esteja mais próxima da solução ideal positiva, ou ótima, e mais longe da solução ideal negativa, ou inferior (TZENG; HUANG, 2011).

Segundo Cheng e Lin (2012), a lógica da técnica TOPSIS se destina a definir a solução ideal positiva e a solução ideal negativa. Isso significa que a solução ideal positiva consiste em todos os maiores atributos obtidos para os critérios, enquanto a solução ideal negativa é composta por todos os piores valores obtidos para os critérios. Sendo assim, a alternativa ideal é aquela que tem a distância mais curta a partir da solução ideal positiva e a maior distância a partir da solução ideal negativa. Com base no conceito de grau de otimização do TOPSIS, a Figura 10 ilustra a ideia de funcionamento deste método.

Figura 10 – Representação gráfica do método TOPSIS



Fonte: adaptado de Rodríguez-Pérez *et al.* (2022).

A Figura 10 ilustra a lógica do método TOPSIS, no qual cada alternativa é avaliada em relação a dois pontos de referência: a solução ideal (A^+), que representa o melhor desempenho possível considerando todos os critérios, e a solução anti-ideal (A^-), que corresponde ao pior desempenho. A distância ideal positiva (D_i^+) e a distância ideal negativa (D_i^-) indicam, respectivamente, a proximidade de cada alternativa em relação à solução ideal e o afastamento em relação à solução anti-ideal. O processo decisório orienta-se pela escolha da alternativa que minimize D_i^+ e maximize D_i^- , resultando no cálculo do coeficiente de similaridade, que expressa o desempenho relativo de cada alternativa dentro do conjunto analisado.

O princípio fundamental do TOPSIS é que a melhor alternativa é aquela que apresenta a menor distância em relação ao ponto ideal e a maior distância em relação ao ponto anti-ideal. Assim, mesmo que nenhuma alternativa real coincida exatamente com o ponto ideal, o método orienta a decisão para a opção que mais próxima dele e mais afastada da solução anti-ideal, representando, portanto, a escolha mais racional e eficiente no conjunto considerado.

Quando se utiliza o método TOPSIS para a classificação, a alternativa mais bem posicionada no *ranking* será sempre considerada a mais adequada. De acordo com Hwang e Yoon (1981), o método baseia-se no conceito de solução de compromisso, que considera uma medida de proximidade. Essa abordagem consiste em selecionar a alternativa com a menor distância euclidiana em relação à solução ideal positiva e a maior distância possível da solução ideal negativa. O objetivo

principal do TOPSIS é fornecer um *ranking* que permita ao tomador de decisão avaliar as opções disponíveis de forma clara e fundamentada em relação às alternativas consideradas.

Conforme apontado por Ramírez López (2017), o método se destaca pela simplicidade dos procedimentos matemáticos, que contribuem para facilidade de implementação e aplicação, permitindo avaliar uma quantidade não limitada de alternativas. Essa característica não apenas facilita sua aplicação em problemas de diferentes escalas, mas também permite sua utilização de forma ágil, seja como suporte para a revisão de outros métodos, seja como ferramenta autônoma de tomada de decisão.

Um dos grandes diferenciais do método TOPSIS é sua flexibilidade para ser aplicado por meio de planilhas eletrônicas. Sua simplicidade permite que os usuários gerenciem os dados utilizando planilhas, sem a necessidade de adquirir *softwares* ou licenças específicas. Para Soares (2018), essa característica tem consolidado o TOPSIS como uma ferramenta eficaz para a modelagem e priorização de alternativas.

O método é amplamente abordado na literatura, sendo aplicado em diversos contextos de tomada de decisão que envolvem múltiplos critérios e, frequentemente, em cenários de decisão em grupo que consideram várias variáveis. Além disso, foi testado e validado em inúmeros estudos realizados por diferentes autores, como Pomerol e Barba-Romero (1993), Castro (2007), Gomes e Gomes (2012), entre outros. Esse método é, possivelmente, o segundo método multicritério mais empregado na literatura e o primeiro em número de extensões (ALVES, 2018).

Behzadian *et al.* (2012) conduziram uma pesquisa bibliográfica destacando o estado da arte sobre as aplicações do método. Os autores recuperaram 266 artigos de 103 diferentes periódicos desde o ano 2000 e separaram em nove áreas de aplicação, sendo elas gestão da cadeia de suprimentos e logística, sistemas de *design*, engenharia e manufatura, gestão de negócios e *marketing*, gestão de saúde, segurança e meio ambiente, gestão de recursos humanos, gestão de energia, engenharia química, gestão de recursos hídricos e outros tópicos.

Segundo Chakraborty (2022), o TOPSIS tem sido amplamente utilizado em áreas como decisões de compra e seleção de fornecedores terceirizados, tomada de decisão de fabricação, análise de desempenho financeiro, avaliação de qualidade de serviço, aplicações para seleção educacional, seleção de tecnologias, seleção de

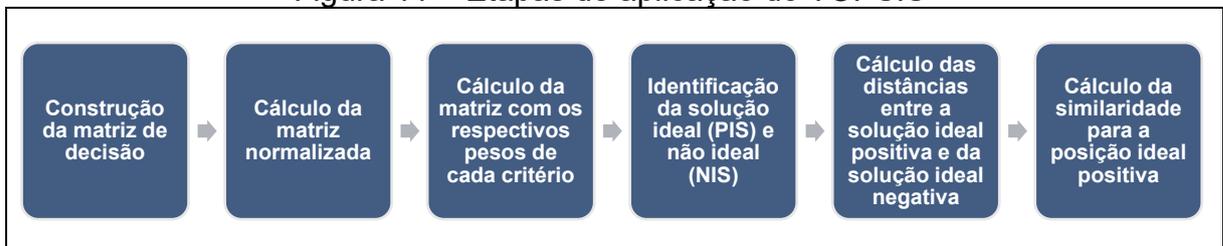
materiais, seleção de produtos, avaliação de estratégia e planejamento de missão crítica.

O TOPSIS permite a obtenção de uma ordenação das ações ou projetos usando critérios quantitativos e qualitativos (GOMES; GONZÁLEZ ARAYA; CARIGNANO, 2004). Esse método resulta em uma abordagem construtiva na qual a solução de compromisso ou concessão é obtida através de um processo de decisão interativo (HWANG; YOON, 1981). Neste trabalho serão usadas apenas classificações quantitativas, já que os dados são classificados em escala numérica, obtidos pelo método AHP.

2.4.2.1 Etapas de aplicação do método TOPSIS

O método TOPSIS é delineado por seis etapas fundamentais que envolvem e transformações matemáticas. Essas transformações utilizam as informações inseridas para gerar um *ranking* de alternativas. O resultado é sistematicamente organizado de acordo com os critérios estabelecidos e os pesos atribuídos pelo decisor. O método TOPSIS pode ser explicado como um conjunto de etapas mostradas a seguir.

Figura 11 – Etapas de aplicação do TOPSIS



Fonte: elaborado pela autora em base em Ramírez López (2017).

De acordo com Hwang e Yoon (1981), o procedimento para a aplicação do método é composto pelas etapas:

- a) Construir uma matriz de decisão X , ou matriz de desempenho. Para demonstração, será considerado um problema genérico com n alternativas, A_1, A_2, \dots, A_n , e m critérios, C_1, C_2, \dots, C_m . Conforme Tsaur (2011), cada alternativa é avaliada à luz dos m critérios considerados, assim como cada valor determinado para cada alternativa em relação a cada critério irá compor a matriz de decisão, denotada por $X = (X_{ij})_{n \times m}$ e representada na equação a seguir.

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{im} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Sendo $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ o vetor de pesos relativos dos critérios, satisfazendo $\sum_{j=1}^m w_j = 1$.

- b) Determinar a matriz de decisão normalizada a partir da matriz \mathbf{X} . Alguns métodos de normalização para o TOPSIS são resumidos por Shih, Shyur e Lee (2007). No estudo de Tsaur (2011), é apresentada a técnica de normalização vetorial no contexto do método TOPSIS, onde o valor normalizado n_{ij} é calculado de acordo com a equação:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n x_{kj}^2}} \quad (9)$$

Na equação 9, $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$.

- c) Determinar a matriz de decisão normalizada ponderada $\mathbf{V} = (v_{ij})_{n \times m}$. O valor normalizado ponderado v_{ij} é obtido pela multiplicação de cada elemento de cada coluna da matriz de decisão normalizada pelos pesos dos critérios, conforme apresentado na equação seguinte:

$$v_{ij} = w_j \cdot n_{ij} \quad (10)$$

Na equação 10, $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$, e w_j é o peso j -ésimo critério. Destaca-se que o somatório dos pesos dos critérios é 1, conforme é apresentado na equação a seguir:

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1 \quad (11)$$

Esses pesos devem refletir a importância relativa de cada critério e podem ser obtidos pelo método AHP (SOUZA, 2019).

- d) Determinar a solução ideal positiva (PIS ou A^+) e a solução ideal negativa (NIS ou A^-) pelas Equações 12 e 13 respectivamente.

$$A^+ = \{(\max v_{ij} \mid j \in J^+), (\min v_{ij} \mid j \in J^-)\}, i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

$$A^- = \{(\min v_{ij} | j \in J^+), (\max v_{ij} | j \in J^-)\}, i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

Nas equações 12 e 13, J^+ está associado aos critérios positivos (benefícios) e J^- está associado aos critérios negativos.

- e) Calcular as distâncias Euclidianas em cada uma das alternativas. A distância ideal positiva (D_i^+) e a distância ideal negativa (D_i^-) podem ser calculadas valendo-se das Equações 14 e 15.

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

- f) Calcular o coeficiente de similaridade ou proximidade (*Closeness Coefficient*, CC_i) de cada alternativa A_i em relação à solução ideal positiva A^+ , que corresponde o desempenho global das alternativas. O cálculo é descrito na Equação 16.

$$CC_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

De acordo com Mussoi (2013), quanto maior o valor do coeficiente de similaridade CC_i , melhor o desempenho da alternativa A_i . O *ranking* das alternativas preferenciais é obtido pela ordem decrescente do valor do coeficiente de similaridade. Portanto, a melhor alternativa é aquela que apresentar o maior valor para o coeficiente de similaridade, ou seja, a maior proximidade da solução ideal positiva.

2.4.3 O método combinado: AHP-TOPSIS

Escolher o método correto para tomar decisões quando há muitas opções é uma tarefa complexa (CHAKRABORTY, 2022). Este desafio se intensifica quando vários métodos se mostram igualmente adequados para abordar um problema específico de tomada de decisão. Loken (2007) destaca que a ferramenta ideal para tomada de decisão deve ser de fácil uso e compreensão. Nesse contexto, duas importantes ferramentas multicritério de fácil uso e compreensão, o AHP e o TOPSIS, têm se destacado por sua simplicidade e aplicabilidade.

A dificuldade em fornecer valores numéricos exatos para critérios de decisão, devido à indisponibilidade e incerteza das informações, bem como à imprecisão das

percepções humanas, é amplamente reconhecida na literatura. Por exemplo, Xu, Wu e Zhang (2014) discutem que, em muitos casos, os dados de avaliação e os pesos dos critérios são expressos em termos linguísticos pelos tomadores de decisão, refletindo a natureza subjetiva e imprecisa das informações disponíveis. Por essa razão, muitos pesquisadores têm aplicado métodos multicritério de decisão para problemas de seleção (KAYA; KAHRAMAN, 2011).

Estudos aplicados demonstram a eficácia do uso combinado dos métodos AHP e TOPSIS em diversas áreas. Sindhu, Nehra e Luthra (2017) empregaram essa abordagem no planejamento estratégico de energia solar; Karahalios (2017) aplicou-a para avaliar sistemas de tratamento de água em embarcações; Karim e Karmaker (2016) utilizaram-na para a escolha de máquinas industriais; e Ramírez López (2017) aplicou o método na estimativa de pegada de carbono de um serviço de entrega. Esses estudos evidenciam a versatilidade e robustez da combinação dos métodos em diferentes contextos.

A literatura reforça as vantagens individuais de cada método e como eles se complementam. Oztaysi (2014) ressalta que o TOPSIS reduz a necessidade de comparações paritárias extensivas entre alternativas, utilizando cálculos objetivos para os pesos dos critérios, que podem ser obtidos previamente pelo método AHP. Por outro lado, Ishizaka e Labib (2011) apontam que o AHP, embora flexível e lógico, pode se tornar complexo em situações com muitos critérios ou alternativas devido ao grande número de comparações necessárias. Rao (2007) destaca que a flexibilidade do AHP em integrar-se a outros métodos o torna uma base sólida para complementar o processo de classificação do TOPSIS. Assim, a combinação desses métodos fornece uma abordagem mais robusta para decisões complexas. A Quadro 3 resume as principais vantagens e desvantagens dos métodos AHP e TOPSIS.

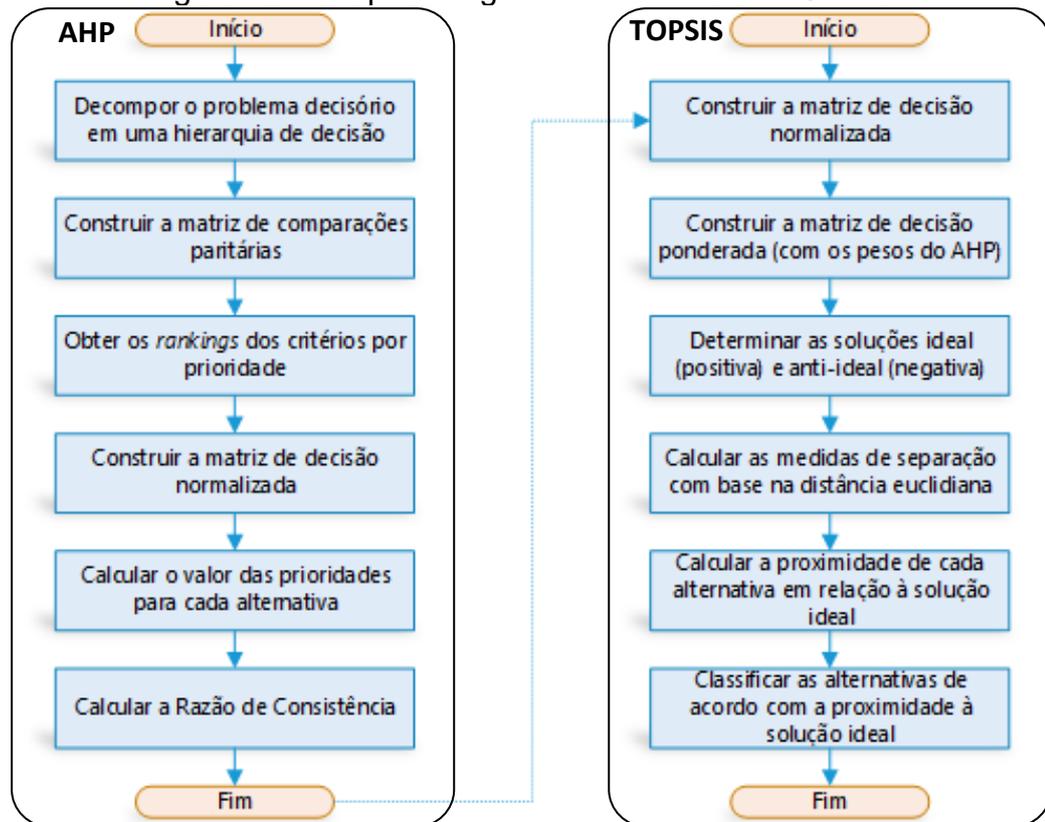
Quadro 3 – Comparação entre os métodos AHP e TOPSIS

Método	Descrição	Vantagens	Desvantagens
AHP	Inclui comparações paritárias entre alternativas com base em critérios	<ol style="list-style-type: none"> 1. Flexível e intuitivo 2. Clareza na hierarquia dos elementos 3. Consistência na tomada de decisão 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Requer um número elevado de comparações 2. Pode perder informações importantes devido à agregação aditiva 3. Sensível a inconsistências na classificação
TOPSIS	Solução de compromisso que seleciona a alternativa mais próxima da solução ideal positiva e mais distante da negativa	<ol style="list-style-type: none"> 1. Adequado para critérios quantitativos. 2. O processo de coleta de dados é mais simples e requer menor quantidade de julgamentos 3. Menor complexidade computacional 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Limitações ao lidar com variáveis qualitativas 2. Dificuldade na definição dos pesos 3. Pode ocorrer inversão no <i>ranking</i>

Fonte: adaptado de Aruldoss, Lakshmi e Venkatesan (2013).

A combinação desses dois métodos permite uma análise mais refinada. O AHP fornece uma base sólida para a avaliação e priorização dos critérios, enquanto o TOPSIS amplia essa análise, classificando as alternativas com base nas soluções ideais positiva e negativa. Essa abordagem integrada oferece um suporte robusto à tomada de decisão, sendo amplamente aplicada em problemas complexos e estratégicos. A seguir, na Figura 12, é apresentado um fluxograma que mostra as etapas integradas da aplicação do método híbrido, o AHP-TOPSIS.

Figura 12 – Etapas integradas do AHP e do TOPSIS



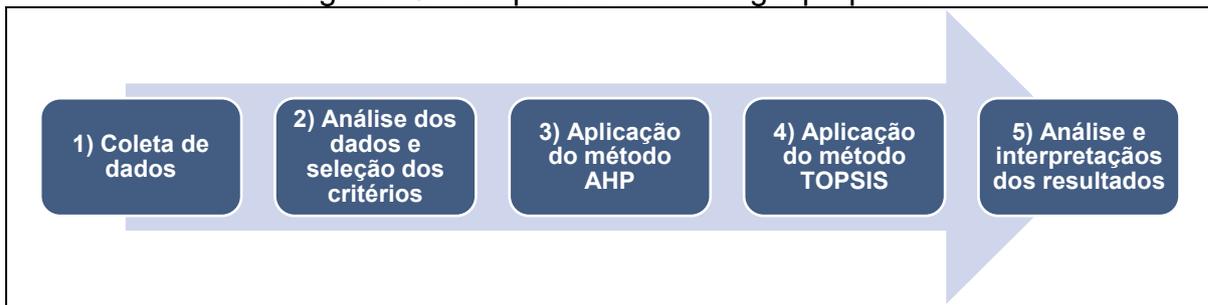
Fonte: elaborado pela autora em base em Mohammed *et al.* (2021).

A apresenta as etapas para o AHP-TOPSIS, evidenciando a complementaridade entre eles. Inicialmente, o AHP é utilizado para estruturar o problema decisório, realizar os julgamentos de prioridade entre os critérios e calcular os pesos associados a cada um. Em seguida, esses pesos são utilizados na aplicação do TOPSIS, que classifica as alternativas com base na distância euclidiana em relação às soluções ideal e anti-ideal. Essa integração proporciona uma abordagem robusta e sistemática para apoiar a tomada de decisão em contextos complexos e multicritério.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia desenvolvida para atingir o objetivo geral do trabalho, que consiste em avaliar comparativamente as topologias de máquinas elétricas aplicadas à tração veicular. Para isso, empregou-se uma abordagem híbrida baseada no método AHP-TOPSIS, que combina a hierarquização de critérios com a classificação de alternativas, oferecendo suporte à tomada de decisão com base em critérios previamente definidos. A Figura 13 ilustra um fluxograma com uma visão macro das etapas propostas para alcançar a proposta.

Figura 13 – Etapas da metodologia proposta



Fonte: elaborado pela autora (2023).

A primeira etapa consistiu na coleta de dados, realizada com base em referências bibliográficas, como artigos científicos, dissertações e teses. Essa etapa foi essencial para mapear o estado da arte relacionado às máquinas elétricas de propulsão para tração veicular. A fundamentação teórica incluiu uma visão geral das diferentes topologias dessas máquinas, seguida por uma análise detalhada de suas características técnicas. Além disso, estudos relacionados foram revisados para identificar os parâmetros de desempenho desejáveis, os quais subsidiaram a definição e a seleção dos critérios de interesse.

Com base nos requisitos de desempenho levantados, foram selecionados os critérios mais relevantes para a avaliação das topologias. Para auxiliar no processo de tomada de decisão em grupo, houve envolvimento de outros participantes, como gestores e especialistas da área, pois segundo Kilgour, Chen e Hipel (2010), a percepção de outros envolvidos auxilia no procedimento de decisão em grupo, na qual um grupo será responsável pela tomada de decisão a partir de uma análise conjunta, uma vez que todas as partes tenham objetivos comuns. Esse processo colaborativo permitiu um consenso sobre os critérios selecionados e seus pesos, aumentando a confiabilidade da análise.

Com a análise e seleção dos critérios baseados nos requisitos de desempenho identificados, aplicou-se o método híbrido AHP-TOPSIS para estruturar e conduzir a análise multicritério. O método AHP foi utilizado para hierarquizar os critérios com base em comparações paritárias realizadas pelos participantes. Essa etapa gerou uma matriz de julgamentos, permitindo o cálculo dos pesos relativos de cada critério. Foram calculados os índices de consistência lógica para validar os pesos obtidos e assegurar a confiabilidade dos resultados. Na sequência, os pesos definidos pelo AHP foram utilizados no método TOPSIS para classificar as topologias de máquinas elétricas. O TOPSIS considera a distância de cada alternativa em relação à

solução ideal positiva (melhor cenário) e à solução ideal negativa (pior cenário), resultando em um *ranking* final.

O método foi aplicado a diferentes cenários, incluindo veículos comerciais leves e pesados, bem como a aplicação de motores diretamente nas rodas. Essa abordagem possibilitou avaliar o desempenho das topologias sob condições e demandas distintas, evidenciando a abrangência do método AHP-TOPSIS em contextos diversificados.

Este trabalho, por se tratar de um estudo teórico, caracteriza-se como exploratório e descritivo. A pesquisa foi fundamentada em um levantamento bibliográfico abrangente, por meio de documentos institucionais e publicações científicas nacionais e internacionais. As buscas foram realizadas no Portal de Periódicos da CAPES e em bases de dados como IEEE Xplore, ScienceDirect, Google Scholar, Scielo e Web of Science, além de repositórios de monografias e teses de universidades.

Os resultados obtidos foram analisados quanto à sua aplicabilidade prática e alinhamento com os objetivos do estudo. O *ranking* final das alternativas fornece um suporte fundamentado para a escolha da topologia de máquina elétrica mais adequada à tração veicular em diferentes cenários de aplicação. Essa abordagem destaca o potencial do método AHP-TOPSIS como uma ferramenta robusta para a resolução de problemas de decisão multicritério, além de oferecer subsídios para futuras aplicações em outras áreas correlatas.

3.1 ABORDAGEM METODOLOGICA

Do ponto de vista de sua natureza, esta é uma pesquisa aplicada, cujo objetivo principal é gerar conhecimento para aplicação prática e imediata, propondo soluções a um problema específico. Quanto aos objetivos, apresenta caráter exploratório e descritivo, buscando proporcionar maior familiaridade com o problema por meio do levantamento bibliográfico, torná-lo explícito, construir hipóteses, descrever características e estabelecer relações entre variáveis.

No que se refere à abordagem, é considerada predominantemente quantitativa, uma vez que os critérios são mensurados e quantificados para permitir comparações e análises. Contudo, incorpora também um componente qualitativo, ao

buscar uma compreensão mais aprofundada do contexto de aplicação, integrando informações provenientes de diferentes fontes de dados.

Em relação ao método de abordagem, é dedutivo, pois parte de princípios e proposições gerais para alcançar conclusões específicas. O procedimento técnico baseia-se no método comparativo, que consiste em investigar e explicar fatos ou fenômenos, analisando dados concretos para identificar semelhanças e divergências. Esse método exige a consideração da complexidade dos fenômenos estudados, assegurando maior consistência às conclusões.

4 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi desenvolvido no contexto de uma indústria brasileira de médio porte, especializada na fabricação de máquinas elétricas, localizada na região da Serra Gaúcha. Atenta às transformações do setor automotivo e às tendências globais de descarbonização, a empresa busca expandir sua atuação para o mercado de mobilidade elétrica, com o objetivo estratégico de desenvolver e fornecer soluções em máquinas elétricas voltadas à tração veicular.

Nesse cenário, tornou-se necessário avaliar diferentes topologias de motores, a fim de identificar a solução mais adequada às necessidades desse segmento de mercado. Para apoiar essa decisão, este estudo propõe a aplicação combinada de dois métodos consolidados de apoio multicritério à decisão, conforme fundamentado no Capítulo 2.

Este capítulo apresenta a modelagem do problema decisório, os cenários de aplicação considerados e a aplicação prática da metodologia escolhida no contexto da avaliação comparativa de topologias. O objetivo principal é demonstrar a operacionalização da abordagem proposta, oferecendo um suporte estruturado à escolha da topologia de máquina elétrica mais adequada para tração veicular, com base nos critérios definidos na Seção 4.3. Essa análise contribui para uma compreensão aprofundada das alternativas avaliadas, considerando os cenários definidos e o alinhamento estratégico com as demandas do mercado de veículos elétricos.

4.1 MODELAGEM DO PROBLEMA

A formulação do problema tem como foco a avaliação comparativa das topologias de máquinas elétricas destinadas à tração veicular, considerando múltiplos critérios de interesse. Diante do cenário atual de transição energética e da crescente demanda por soluções de mobilidade sustentável, essa abordagem visa oferecer suporte à escolha da topologia mais apropriada para cenários específicos, considerando simulações baseadas em dados robustos e contextos reais de aplicação.

Este estudo adota a abordagem multicritério AHP-TOPSIS com o objetivo de classificar cinco topologias de máquinas elétricas para tração veicular em diferentes cenários de aplicação. Para estruturar o problema, foram identificadas cinco

alternativas de topologias de MEs. Essas alternativas foram selecionadas com base em uma revisão bibliográfica abrangente, previamente descrita no Capítulo 2. As alternativas em questão representam tanto tecnologias consolidadas quanto emergentes, amplamente discutidas na literatura científica e no mercado, possibilitando a avaliação de acordo com os critérios estabelecidos, para que seja feita a comparação entre as opções.

Os *stakeholders* envolvidos no processo de tomada de decisão incluem gestores e especialistas da área, que desempenharam um papel fundamental na definição dos critérios de avaliação, na escolha das alternativas para a comparação, na delimitação dos cenários de aplicação e na realização das comparações paritárias. Esses participantes contribuíram com conhecimento específico e experiência no campo das máquinas elétricas e tração veicular, para que a análise fosse robusta e que as conclusões fossem relevantes para o problema proposto.

Assim, o estudo de caso configura-se como uma ferramenta estratégica para apoiar decisões em projetos de eletrificação veicular. Ao comparar topologias com base em critérios relevantes e diferentes perfis de aplicação, a metodologia proposta contribui para identificar soluções viáveis e alinhadas com os desafios técnicos e operacionais da mobilidade elétrica. A seguir, são apresentados os cenários de aplicação considerados na análise multicritério.

4.2 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS DE ESTUDO

Neste estudo de caso, foram definidos três cenários distintos para análise: veículos leves, veículos pesados e aplicações *in-wheel*. Esses cenários foram selecionados para abranger diferentes demandas no contexto da mobilidade elétrica. A escolha reflete a diversidade de aplicações e desafios associados ao desenvolvimento de soluções em tração elétrica. A seguir, cada cenário é descrito em detalhe, contextualizando sua importância no setor.

4.2.1 Caracterização dos cenários

A primeira abordagem refere-se ao cenário de veículos leves, categoria que compreende automóveis de passeio, utilitários e demais veículos com peso bruto total (PBT) inferior ou igual a 3.500 kg, conforme estabelecido pela Resolução nº 396 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN, 2011). O PBT é a soma do peso do

veículo mais a lotação, que inclui o peso da carga e dos passageiros. Enquadram-se nessa classificação ciclomotores, motocicletas, triciclos, quadriciclos, automóveis, SUVs (*Sport Utility Vehicles*) e caminhonetes. Esses veículos destinam-se principalmente ao transporte de passageiros ou de pequenas cargas, sendo utilizados tanto em vias urbanas quanto rurais.

No Brasil, a eletrificação de veículos leves tem ganhado espaço nos últimos anos, apesar de desafios como o custo dos veículos e a infraestrutura de carregamento (EPE, 2024b). Esse crescimento acompanha tendências internacionais de eletrificação e responde à pressão por soluções ambientalmente sustentáveis. Diante de um contexto marcado por rápidas transformações e incertezas, a construção de cenários torna-se fundamental para antecipar possíveis caminhos e orientar decisões estratégicas no campo da mobilidade elétrica.

Um segmento que tem ganhado destaque na eletrificação de veículos leves é o de utilitários comerciais voltados à logística urbana, especialmente nas operações de entrega de última milha (*last-mile delivery*). Esse movimento foi intensificado pela crescente demanda do comércio eletrônico, impulsionada especialmente durante o período da pandemia (EPE, 2024a). Trata-se da adoção de veículos elétricos em nichos operacionais específicos, que exigem deslocamentos curtos, rotas repetitivas e dentro de áreas urbanas.

De acordo com dados da ABVE (2024) e da FENABRAVE (2024), modelos como Renault Kangoo E-Tech, Ford E-Transit, JAC E-JV5.5 e BYD ET3 registraram volumes relevantes de licenciamento no Brasil no ano de 2024, evidenciando a viabilidade técnica e econômica desses veículos. De acordo com a EPE (2024a), essa tendência tem sido reforçada por compromissos corporativos com práticas ambientais, sociais e de governança (ESG), bem como pela possibilidade de aquisição de energia no Mercado Livre e o uso de geração distribuída, estratégias que contribuem para a redução de custos operacionais e da pegada de carbono das frotas empresariais.

O segundo cenário contempla os veículos pesados, com PBT acima de 3.500 kg, tais como caminhões, ônibus, carretas, *motorhomes*, tratores e micro-ônibus, além de veículos leves com reboque, conforme também definido pelo CONTRAN (2011). Caminhões e ônibus, por exemplo, desempenham um papel fundamental no transporte de cargas e passageiros e estão diretamente associados ao desempenho logístico e à infraestrutura de transporte.

Na América Latina, diversas cidades já estabeleceram metas para a eletrificação de suas frotas de transporte público. A compra de ônibus elétricos a bateria (categoria BEV) tem sido anunciada por diversas cidades brasileiras, como São Paulo (SP), São José dos Campos (SP), Salvador (BA) e Curitiba (PR). O Novo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) prevê investimentos de R\$ 7,3 bilhões até 2028 em renovação da frota com ônibus elétricos para 7 estados e 61 municípios (EPE, 2024a).

Em relação ao transporte de cargas, a eletrificação de caminhões para operações logísticas é um movimento que tem crescido nos últimos anos, conforme informações da Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica (PNME, 2023). Conforme apontado no Caderno de Eletromobilidade no transporte rodoviário, elaborado no âmbito do Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 (EPE, 2024a), observou-se uma queda nas vendas desses veículos no mercado brasileiro em 2023, em especial pelo aumento da oferta de modelos de comerciais leves elétricos. Este segmento, por sua vez, apresenta aumento nas vendas por se mostrar mais adequado às operações de última milha e por dispensar a exigência de carteira de motorista para veículos pesados.

Veículos pesados representam uma oportunidade significativa para a adoção de tecnologias híbridas e elétricas, dado o seu impacto desproporcional nas emissões de carbono. Empresas como Ambev, JBS, DHL, Coca-Cola FEMSA e Magazine Luiza já figuram entre os principais frotistas de caminhões elétricos no Brasil, sinalizando comprometimento com metas de redução de emissões (PNME, 2023).

Esse segmento de veículos enfrenta desafios específicos, como a necessidade de altas demandas de torque, capacidades de carga elevadas e ciclos operacionais intensos e de longa duração. Além disso, o peso das baterias representa um obstáculo adicional, tornando a eletrificação mais complexa e onerosa para veículos de grande porte. A EPE (2024a) afirma que hibridização é uma alternativa crescentemente interessante, especialmente devido ao aumento das restrições às emissões. A empresa de pesquisa energética projeta que a frota de eletrificados representará 1,2% da frota total de 2,3 milhões de unidades em 2034.

O terceiro e último cenário explora as aplicações *in-wheel*, que envolvem a instalação do motor elétrico diretamente na roda do veículo. Os sistemas de acionamento convencionais normalmente incluem uma embreagem, engrenagem de redução e diferencial mecânico, o que resulta em perda de potência, ruído, vibração

e manutenção adicional. No entanto, a tecnologia de acionamento por motor nas rodas elimina a necessidade desses componentes, proporcionando benefícios como maior eficiência do sistema, melhor controle das rodas e maior conforto para os passageiros (DEEPAK *et al.*, 2023).

A Hyundai Mobis (2024), fornecedora global de soluções automotivas, apresentou em 2024 o veículo elétrico conceitual MOBION, equipado com o sistema de propulsão *in-wheel*. Essa tecnologia, que vinha sendo desenvolvida pela empresa desde 2010 em resposta às demandas do emergente mercado de veículos elétricos, permite o controle individual de cada roda por meio da integração dos motores diretamente nos cubos. Embora o MOBION represente um avanço significativo, ainda não há registros de sua produção em série no cenário global. Além disso, não há previsão de aplicação comercial dessa solução no mercado automotivo brasileiro no curto prazo.

Segundo Edmondson e Siddiqi (2024), motores *in-wheel* foram incorporados em alguns veículos de rodoviários, como uma quantidade limitada de caminhões da Lordstown, e avanços importantes foram observados com a Protean, onde a Dongfeng demonstrou, em 2023, o primeiro carro de passeio homologado equipado com a plataforma ProteanDrive, prosseguindo com testes de frota.

Além disso, as aplicações *in-wheel* são particularmente relevantes para veículos compactos e soluções de micromobilidade, mas também apresentam potencial para veículos de alto desempenho. Nesse cenário, pode-se enquadrar o segmento dos levíssimos, que é caracterizado pelos veículos elétricos de baixa velocidade, como as *scooters*, bicicletas, quadriciclos elétricos e pequenos automóveis que acomodam uma ou duas pessoas, com autonomia e velocidades reduzidas.

Em particular, o uso de motores *in-wheel* tem ganhado espaço no segmento de duas rodas, como *scooters* e motocicletas elétricas. Um exemplo de aplicação avançada é representado pelas motocicletas da Verge, fabricadas na Finlândia, que utilizam motor elétrico integrado à roda traseira no formato *hubless*. Dependendo do modelo, a potência varia entre 80 e 150 kW (107 a 201 cv), com torque entre 700 e 1.200 Nm e autonomia que pode alcançar até 375 km, reforçando o potencial da tecnologia também para aplicações de alto desempenho (VERGE MOTORCYCLES, 2023).

Além de startups inovadoras, fabricantes tradicionais têm intensificado sua atuação nesse mercado. A Harley-Davidson lançou a motocicleta elétrica LiveWire, e empresas como Hero Electric, Ola Electric, Zero Motorcycles, Joy E-Bike e Okinawa anunciaram ou realizaram lançamentos recentes de modelos com motorização elétrica de alta potência. Colaborações estratégicas, como a da FLASH com a GEM Motors e a da Hero Electric com a Nidec Japão, reforçam a tendência de investimento em tecnologias de propulsão elétrica com motores de cubo. Esses movimentos evidenciam uma corrida tecnológica no setor de duas rodas, com foco em eficiência, autonomia e desempenho, e apontam para a ampliação da produção de sistemas *in-wheel* em escala industrial nos próximos anos (GRAND VIEW RESEARCH, 2023).

Os cenários em questão são marcados pelo crescimento da demanda por soluções de mobilidade sustentável e a necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis no setor. A indústria automotiva está passando por uma transformação significativa, com o desenvolvimento e a adoção de VE e VEH em larga escala. Neste ambiente, a análise comparativa de diferentes topologias de máquinas elétricas torna-se estratégica para apoiar decisões técnicas, alinhadas aos requisitos específicos de cada cenário e às demandas do mercado de mobilidade elétrica.

4.3 SELEÇÃO E DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS

Esta seção apresenta o processo de seleção e definição dos critérios utilizados na análise comparativa das topologias de máquinas elétricas para tração veicular. A seleção cuidadosa dos critérios é essencial para garantir que a avaliação seja condizente com o contexto técnico, as necessidades específicas de cada cenário de aplicação e os objetivos do processo decisório.

Estabelecer uma correlação entre os diferentes critérios considerados e os fatores críticos de desempenho é fundamental para identificar a topologia mais adequada em cada contexto. Para isso, os critérios podem ser ponderados por meio de coeficientes ou pesos, resultando em uma escolha tecnicamente justificada e estruturada.

4.3.1 Identificação dos critérios relevantes

A seleção dos critérios foi realizada com base em uma revisão sistemática da literatura especializada, complementada por consultas a gestores e especialistas

atuantes nas áreas de máquinas elétricas e eletromobilidade. Os critérios foram definidos não apenas pela sua relevância técnica na avaliação de desempenho de motores de tração veicular, mas também sob a ótica do fabricante de máquinas elétricas, considerando os desafios associados à viabilidade de produção, aos aspectos construtivos e à competitividade no mercado de mobilidade elétrica.

Considerando que diferentes aplicações impõem demandas específicas, os fatores de ponderação poderão variar conforme o foco de cada cenário analisado. O presente estudo adota sete critérios para a comparação das alternativas, abrangendo atributos de desempenho, viabilidade tecnológica e sustentabilidade. São eles:

1. Rendimento (C1);
2. Fator de potência (C2);
3. Ausência de ímãs permanentes provenientes de terras raras (C3);
4. Operação com enfraquecimento de campo (C4);
5. Custo de fabricação (C5);
6. Densidade de potência (C6);
7. Baixa ondulação de conjugado (C7).

A definição desses critérios reflete a preocupação em incorporar uma visão abrangente e realista ao processo de seleção. Ao considerar tanto a literatura quanto a experiência de profissionais da área, assegura-se que a análise multicritério seja aplicável a contextos reais. Dessa forma, os critérios selecionados constituem a base estrutural da metodologia adotada, viabilizando uma comparação consistente e tecnicamente embasada entre as alternativas analisadas.

4.3.2 Definição dos critérios e suas unidades de medida

A definição clara e objetiva dos critérios adotados é necessária para garantir a consistência e a robustez do processo de avaliação multicritério. Cada critério selecionado representa um atributo relevante de desempenho, de viabilidade construtiva ou de sustentabilidade das máquinas elétricas voltadas à tração veicular. Ao estabelecer parâmetros quantificáveis, torna-se possível aplicar a metodologia proposta de forma estruturada, permitindo a comparação entre diferentes topologias.

Nesta seção, os sete critérios são apresentados com suas respectivas descrições técnicas e unidades de medida. Quando aplicável, são também fornecidas expressões matemáticas que auxiliam na compreensão do seu cálculo.

C1. Rendimento (η): o rendimento de um dispositivo conversor de potência é definido como a razão entre a potência de saída, $P_{saída}$, e a potência de entrada, $P_{entrada}$, podendo também ser expresso em função das perdas totais do sistema (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014). Assim,

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{P_{entrada} - P_{perdas}}{P_{entrada}} = 1 - \frac{P_{perdas}}{P_{entrada}} \quad (17)$$

Essa relação indica a capacidade de conversão de energia elétrica em energia mecânica no caso de máquinas elétricas, podendo ser expressa em percentual ao multiplicar-se por 100%.

No contexto de motores elétricos, considera-se $P_{saída}$ como a potência mecânica disponível no eixo e $P_{entrada}$ como a potência elétrica fornecida ao estator. Dessa forma:

$$\eta = 100\% \cdot \frac{P_{mec.saída}}{P_{elét.entrada}} \quad (18)$$

onde η é o rendimento (%) do motor, $P_{mec.saída}$ é a potência mecânica no eixo e $P_{elét.entrada}$ é a potência elétrica absorvida.

C2. Fator de potência (FP): reflete a eficiência da conversão de energia elétrica em potência ativa. É a razão entre potência elétrica ativa de entrada da máquina ($P_{elét.entrada}$) e a potência aparente (S), sendo uma variável adimensional. Um baixo fator de potência implica necessidade de sobredimensionamento do inversor e dos condutores, elevando custo, peso e volume.

$$FP = \frac{P_{elét.entrada} [W]}{S [VA]} \quad (19)$$

C3. Ausência de ímãs permanentes de terras raras: critério associado à sustentabilidade e ao custo de produção. Avaliado como uma variável binária (sim/não), indica se a máquina utiliza ou não ímãs de terras raras, cuja extração está associada a impactos ambientais e dependência de mercados externos.

C4. Ampla faixa de operação com enfraquecimento de campo (RE): representa a capacidade da máquina de operar em uma faixa ampla de velocidades, sendo expressa pela razão entre a velocidade máxima, $n_{máx}$, e a velocidade base, n_{base} .

$$RE = \frac{n_{m\acute{a}x}}{n_{base}} \quad (20)$$

Esse critério é particularmente importante em aplicações veiculares, nas quais são exigidos altos torques em baixas velocidades, como em partidas, subidas e ultrapassagens, e torques mais baixos em velocidades de cruzeiro. O uso do enfraquecimento de campo permite ampliar a faixa de operação da máquina sem aumentar seu tamanho físico, possibilitando o uso de motores mais compactos e leves, mantendo o desempenho necessário para diferentes condições de condução.

C5. Custo de fabricação: representado pelo custo total de fabricação e montagem da máquina elétrica, expresso em reais (R\$). O custo de fabricação compreende matéria-prima, usinagem de peças, montagem e outros processos industriais relevantes.

C6. Densidade de potência (DP): é calculada como a razão entre a potência mecânica nominal na saída e o volume total da máquina elétrica, $V_{m\acute{a}q.}$. Representa a taxa temporal de transferência de energia por unidade de volume.

$$DP = \frac{P_{mec.saída} [W]}{V_{m\acute{a}q.} [m^3]} \quad (21)$$

Esse critério está diretamente relacionado à compactação e à leveza da máquina, sendo especialmente importante em aplicações veiculares, onde há restrições de espaço e demanda por alta eficiência volumétrica.

C7. Ondulação de conjugado ($T_{ondulação}$): corresponde a variação do torque durante a rotação, afetando diretamente a suavidade de operação e a geração de vibrações e ruído. É mensurada pela razão entre a diferença entre os torques máximo, $T_{m\acute{a}x.}$, e mínimo, $T_{m\acute{m}n.}$, e o valor médio do torque, $T_{m\acute{e}d.}$.

$$T_{ondulação} = \frac{(T_{m\acute{a}x.} - T_{m\acute{m}n.})}{(T_{m\acute{e}d.})} \quad (22)$$

Embora a composição harmônica do torque também influencie o comportamento vibracional e acústico, esta análise mais aprofundada não será abordada neste trabalho.

É importante destacar que os critérios definidos não atuam de forma isolada, mas apresentam relações entre si que influenciam diretamente o desempenho da máquina elétrica. Por exemplo, a ausência de ímãs permanentes de terras raras pode reduzir custos de fabricação e aumentar a sustentabilidade do projeto, mas também pode impactar negativamente a densidade de potência. Da mesma forma, um baixo fator de potência pode demandar condutores maiores e inversores mais robustos, elevando o peso, volume e o custo do sistema.

A densidade de potência, por sua vez, está relacionada à capacidade de compactação do motor, mas máquinas com alta densidade de potência geralmente apresentam uma velocidade máxima mais baixa. Isso influencia na relação de enfraquecimento de campo, uma vez que essa relação depende da diferença entre a velocidade máxima e a velocidade base. Assim, quanto maior a densidade de potência, menor tende a ser a velocidade máxima da máquina, o que impacta na faixa de enfraquecimento de campo.

Apesar da aparente proximidade conceitual entre os critérios “rendimento” e “fator de potência”, ambos foram mantidos na análise por medirem aspectos distintos. O rendimento está relacionado à proporção entre a potência de saída e a potência elétrica de entrada, sendo um indicativo direto da eficiência de conversão da máquina elétrica em operação. Já o fator de potência refere-se à qualidade da energia consumida, isto é, à proporção entre potência ativa e potência aparente, sendo influenciado pela presença de potência reativa no sistema. Assim, embora estejam inter-relacionados, não são redundantes, pois capturam dimensões complementares do desempenho da máquina. A distinção entre esses critérios é fundamental para evitar distorções nos pesos atribuídos no método e garantir uma avaliação mais robusta.

4.4 APLICAÇÃO DO AHP-TOPSIS NO ESTUDO DE CASO

Nesta seção, é descrita a aplicação da metodologia AHP-TOPSIS no estudo de caso, com enfoque na avaliação comparativa das diferentes topologias de máquinas elétricas nos três cenários propostos: veículos leves, veículos pesados e aplicações *in-wheel*. O método AHP é uma ferramenta eficiente que permite avaliar alternativas com base em múltiplos critérios, considerando o julgamento de especialistas quanto à importância relativa de cada critério envolvido.

A aplicação do AHP envolveu a construção da hierarquia, a criação e normalização das matrizes de comparação par a par (julgamentos paritários), o cálculo dos autovetores, a verificação da consistência dos dados e a obtenção das prioridades globais. Em seguida, os pesos dos critérios e os desempenhos das alternativas foram utilizados como entrada para a aplicação do método TOPSIS, que classifica as alternativas com base em sua proximidade à solução ideal positiva e distanciamento da solução ideal negativa.

Essa abordagem integrada oferece uma base sistemática e justificada para a avaliação comparativa das alternativas, permitindo identificar, de forma transparente e tecnicamente fundamentada, a topologia mais adequada a cada cenário de aplicação. A seguir, são descritas as etapas da aplicação e os resultados obtidos.

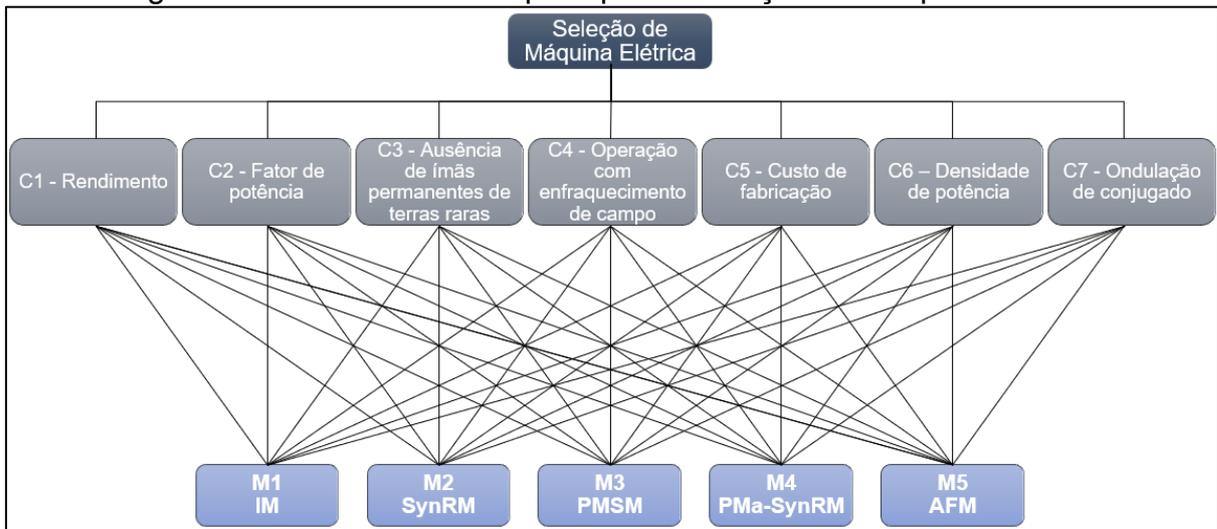
4.4.1 Construção da hierarquia

O AHP permite organizar o problema de decisão em uma estrutura hierárquica que evidencia e relaciona os elementos que compõem o processo de seleção, facilitando a decomposição de problemas complexos em subconjuntos mais simples e proporcionando uma compreensão mais clara da análise. Essa representação constitui o primeiro passo para a aplicação do método, permitindo que o tomador de decisão realize comparações paritárias entre os elementos de um mesmo nível em relação a um elemento do nível superior. Esse processo promove a transparência e possibilita o registro formal das preferências, conduzindo à definição das prioridades.

A estrutura hierárquica do AHP foi construída em três níveis. No primeiro nível, encontra-se o objetivo geral da análise: selecionar a topologia de máquina elétrica mais adequada para aplicação veicular de acordo com cada cenário. No segundo nível, estão dispostos os sete critérios previamente definidos. O terceiro nível compreende as cinco alternativas de topologias de máquinas elétricas consideradas no estudo.

A Figura 14 apresenta a hierarquia elaborada para a seleção da topologia de máquina elétrica, baseada em sete critérios de avaliação e cinco alternativas de máquinas de propulsão elétrica.

Figura 14 – Estrutura hierárquica para a seleção de máquina elétrica



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Com a estrutura hierárquica definida, a etapa seguinte consiste na realização das comparações paritárias entre os critérios do segundo nível, com o objetivo de determinar a importância relativa de cada um. Essa etapa é operacionalizada pela construção da matriz de julgamentos e pela aplicação dos cálculos do método AHP, que resultam na obtenção dos pesos relativos dos critérios.

4.4.2 Criação e normalização das matrizes

Na etapa de julgamento dos critérios, foram realizadas as comparações paritárias entre os elementos do segundo nível da hierarquia. Essas comparações foram conduzidas com base na escala fundamental de Saaty (1991), apresentada no Quadro 2, que associa valores de 1 a 9 a julgamentos qualitativos de importância relativa.

O processo de julgamento, inevitavelmente subjetivo, foi estruturado com base na seguinte pergunta: “Qual é a importância do critério X em relação ao critério Y no contexto do objetivo proposto?”. As respostas foram obtidas por consenso, através de reuniões com os participantes, conforme pode ser visualizado no Apêndice C. A Tabela 2 apresenta as matrizes de comparação dos critérios para os três cenários analisados, conforme a representado na Equação 1.

Considerando o total de sete critérios, a quantidade de comparações necessárias é determinada pela Equação 2, que define o número de comparações $N(N - 1)/2$, onde N é o número de elementos a serem comparados. Dessa forma,

foram necessárias 21 comparações na construção da matriz A de julgamentos para cada cenário.

Tabela 2 – Matriz de comparação pareada para cada cenário

Veículos leves	Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	C1	1,00	4,00	6,00	7,00	1,00	2,00	7,00
	C2	0,25	1,00	2,00	5,00	1,00	1,00	5,00
	C3	0,17	0,50	1,00	4,00	0,25	0,50	2,00
	C4	0,14	0,20	0,25	1,00	0,11	0,25	0,25
	C5	1,00	1,00	4,00	9,00	1,00	0,25	5,00
	C6	0,50	1,00	2,00	4,00	4,00	1,00	5,00
	C7	0,14	0,20	0,50	4,00	0,20	0,20	1,00
	Somatório	3,20	7,90	15,75	34,00	7,56	5,20	25,25
Veículos pesados	Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	C1	1,00	2,00	2,00	2,00	3,00	5,00	4,00
	C2	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	4,00	6,00
	C3	0,50	0,50	1,00	0,50	5,00	4,00	7,00
	C4	0,50	0,33	2,00	1,00	2,00	2,00	4,00
	C5	0,33	0,25	0,20	0,50	1,00	0,50	5,00
	C6	0,20	0,25	0,25	0,50	2,00	1,00	3,00
	C7	0,25	0,17	0,14	0,25	0,20	0,33	1,00
	Somatório	3,28	4,50	7,59	7,75	17,20	16,83	30,00
Aplicação in-wheel	Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	C1	1,00	3,00	9,00	4,00	2,00	0,33	9,00
	C2	0,33	1,00	4,00	2,00	0,50	0,17	4,00
	C3	0,11	0,25	1,00	0,33	0,20	0,11	0,50
	C4	0,25	0,50	3,00	1,00	0,33	0,14	2,00
	C5	0,50	2,00	5,00	3,00	1,00	0,33	4,00
	C6	3,00	6,00	9,00	7,00	3,00	1,00	6,00
	C7	0,11	0,25	2,00	0,50	0,25	0,17	1,00
	Somatório	5,31	13,00	33,00	17,83	7,28	2,25	26,50

Fonte: a autora (2024).

As matrizes construídas são do tipo quadrada de ordem $N = 7$ (número de critérios), e os julgamentos foram registrados com valores numéricos que expressam a importância do critério na linha em relação ao critério na coluna. Por definição, a diagonal principal assume sempre o valor 1, pois representa a comparação de um critério consigo mesmo.

Com as matrizes de julgamento construídas, a etapa seguinte consiste na normalização da matriz A, conforme a Equação 3. A normalização foi realizada dividindo-se cada elemento da matriz pelo somatório de sua respectiva coluna, resultando em uma matriz normalizada (A_n) conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Matriz normalizada para cada cenário

	Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Veículos leves	C1	0,3123	0,5063	0,3810	0,2059	0,1323	0,3846	0,2772
	C2	0,0781	0,1266	0,1270	0,1471	0,1323	0,1923	0,1980
	C3	0,0520	0,0633	0,0635	0,1176	0,0331	0,0962	0,0792
	C4	0,0446	0,0253	0,0159	0,0294	0,0147	0,0481	0,0099
	C5	0,3123	0,1266	0,2540	0,2647	0,1323	0,0481	0,1980
	C6	0,1561	0,1266	0,1270	0,1176	0,5290	0,1923	0,1980
	C7	0,0446	0,0253	0,0317	0,1176	0,0265	0,0385	0,0396
	Somatório	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Veículos pesados	Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	C1	0,3046	0,4444	0,2634	0,2581	0,1744	0,2970	0,1333
	C2	0,1523	0,2222	0,2634	0,3871	0,2326	0,2376	0,2000
	C3	0,1523	0,1111	0,1317	0,0645	0,2907	0,2376	0,2333
	C4	0,1523	0,0741	0,2634	0,1290	0,1163	0,1188	0,1333
	C5	0,1015	0,0556	0,0263	0,0645	0,0581	0,0297	0,1667
	C6	0,0609	0,0556	0,0329	0,0645	0,1163	0,0594	0,1000
	C7	0,0761	0,0370	0,0188	0,0323	0,0116	0,0198	0,0333
Somatório	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Aplicação in-wheel	Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	C1	0,1885	0,2308	0,2727	0,2243	0,2746	0,1479	0,3396
	C2	0,0628	0,0769	0,1212	0,1121	0,0686	0,0739	0,1509
	C3	0,0209	0,0192	0,0303	0,0187	0,0275	0,0493	0,0189
	C4	0,0471	0,0385	0,0909	0,0561	0,0458	0,0634	0,0755
	C5	0,0942	0,1538	0,1515	0,1682	0,1373	0,1479	0,1509
	C6	0,5654	0,4615	0,2727	0,3925	0,4119	0,4437	0,2264
	C7	0,0209	0,0192	0,0606	0,0280	0,0343	0,0739	0,0377
Somatório	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Fonte: a autora (2024).

4.4.3 Cálculo dos autovetores

Após a normalização das matrizes de julgamento, o próximo passo consiste na obtenção do autovetor (w), calculado por meio da média aritmética dos elementos de cada linha da matriz normalizada (A_n). Os resultados dessa etapa podem ser visualizados na Tabela 4, que apresenta os autovetores obtidos para cada cenário analisado, evidenciando o peso relativo de cada critério na tomada de decisão.

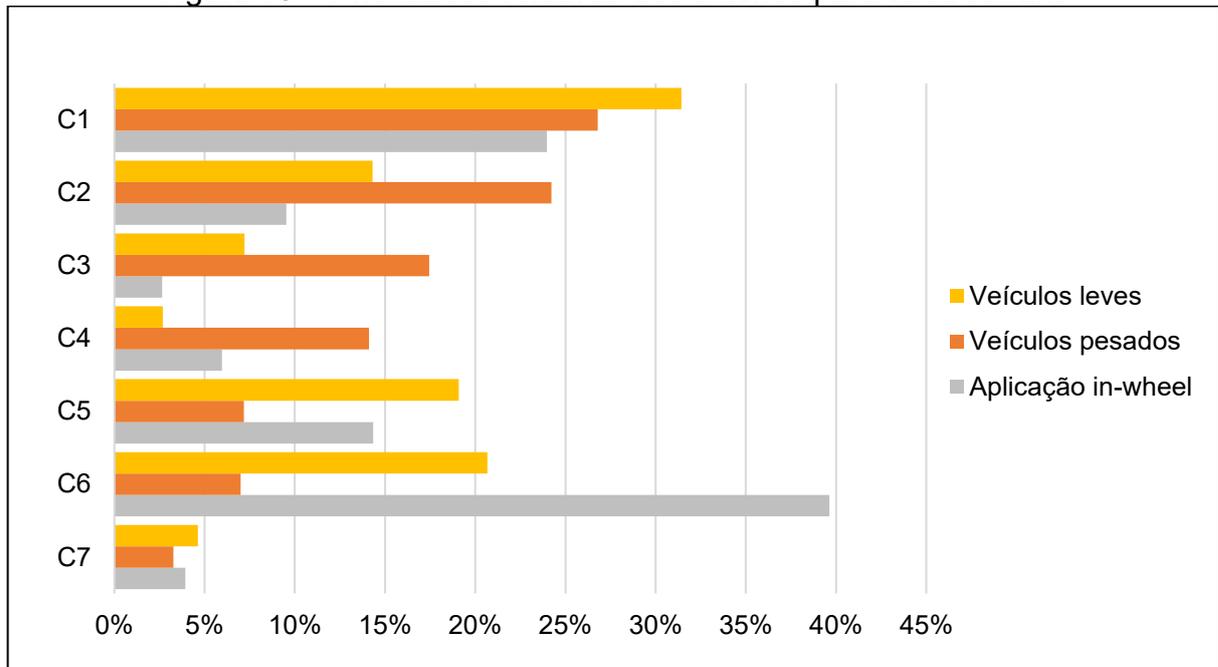
Tabela 4 – Vetor de prioridade dos critérios para cada cenário

Critérios	w		
	Veículos leves	Veículos pesados	<i>In-wheel</i>
C1 – Rendimento	0,3142	0,2679	0,2398
C2 - Fator de potência	0,1430	0,2422	0,0952
C3 - Ausência de ímãs permanentes de terras raras	0,0721	0,1745	0,0264
C4 - Ampla faixa de operação com enfraquecimento de campo	0,0268	0,1410	0,0596
C5 - Custo de fabricação	0,1908	0,0718	0,1434
C6 - Densidade de potência	0,2067	0,0699	0,3963
C7 - Baixa ondulação de conjugado	0,0463	0,0327	0,0393
Somatório	1,00	1,00	1,00

Fonte: a autora (2024).

Observa-se que os critérios de maior relevância variam conforme o tipo de aplicação, refletindo as demandas específicas de veículos leves, veículos pesados e aplicações *in-wheel*. Para facilitar a visualização comparativa, a Figura 15 ilustra as prioridades relativas dos critérios em cada cenário, destacando as diferenças de importância atribuídas conforme o contexto analisado.

Figura 15 – Prioridades relativas dos critérios para cada cenário



Fonte: a autora (2024).

Nos três cenários analisados, observa-se uma variação significativa na priorização dos critérios de seleção das topologias de máquinas elétricas. Para veículos leves, o rendimento (C1) foi o critério mais relevante (31,42%), seguido pela densidade de potência (C6) e pelo custo de fabricação (C5). Essa priorização está alinhada à necessidade de elevada eficiência energética e compactidade (restrições de peso e volume), características fundamentais para maximizar a autonomia e otimizar o desempenho de veículos nessa aplicação.

No cenário de veículos pesados, o rendimento (C1) assumiu o maior peso (26,79%), logo seguido pelo fator de potência (C2) e pela ausência de ímãs de terras raras (C3). Esse resultado reflete a necessidade de motores com elevada eficiência energética e baixo consumo de potência reativa para aplicações que demandam maior robustez operacional e alta confiabilidade.

Já no cenário *in-wheel*, a densidade de potência (C6) foi o critério mais significativo (39,63%), superando com folga os demais. Essa prioridade é coerente com as exigências específicas dessa aplicação, na qual a integração do motor à roda requer alta compactação e elevada eficiência volumétrica. O rendimento (C1) e o custo de fabricação (C5) também apresentaram pesos relevantes, reforçando que, além da compactação, a eficiência e o controle de custos de produção são aspectos determinantes para viabilizar essa solução tecnológica.

Essa análise evidencia que a importância dos critérios varia conforme o tipo de aplicação, reforçando a necessidade de adaptação da estratégia de seleção das topologias às exigências técnicas, operacionais e construtivas de cada cenário.

4.4.4 Análise da consistência dos dados

Quando algo complexo e com muitas variáveis é julgado, aumenta o risco de julgamentos inconsistentes. Se o tomador de decisão classificou o critério “A” como mais relevante que o critério “B”, e classificou o critério “B” como sendo muito preferível ao “C”, será inconsistente caso julgue o critério “A” indiferente em relação ao critério “C” (RAGSDALE, 2004).

Determinado o vetor de prioridades, deve-se verificar a consistência dos dados para verificar se as decisões realizadas pelos decisores na comparação par a par estão coerentes. Para isso, fez-se a multiplicação da matriz de comparação (A) pelos

resultados obtidos para o autovetor (w). Os resultados são mostrados na Tabela 5, onde foi realizada a multiplicação de cada elemento da primeira coluna da matriz de decisão pelo vetor prioridade do primeiro critério e assim sucessivamente.

Tabela 5 – Produto da matriz de comparações pelos autovetores em cada cenário

Critérios	Aw		
	Veículos leves	Veículos pesados	In-wheel
C1 - Rendimento	2,435	2,079	1,774
C2 - Fator de potência	1,129	1,911	0,695
C3 - Ausência de ímãs permanentes de terras raras	0,547	1,368	0,189
C4 - Ampla faixa de operação com enfraquecimento de campo	0,203	1,119	0,429
C5 - Custo de fabricação	1,461	0,526	1,054
C6 - Densidade de potência	1,753	0,540	3,008
C7 - Baixa ondulação de conjugado	0,343	0,238	0,274

Fonte: a autora (2024).

Conforme Pegetti (2014) e Silva (2007), a partir do vetor resultante do produto Aw , calcula-se o autovalor de cada critério (λ) dividindo-se cada elemento de Aw pelo respectivo valor do autovetor w . A média desses autovalores corresponde ao maior autovalor da matriz ($\lambda_{m\acute{a}x}$), necessário para o cálculo do índice de consistência. Os resultados estão organizados na Tabela 6.

Tabela 6 – Autovalor dos critérios para cada cenário

Critérios	λ		
	Veículos leves	Veículos pesados	In-wheel
C1 – Rendimento	7,750	7,761	7,398
C2 - Fator de potência	7,892	7,892	7,295
C3 - Ausência de ímãs permanentes de terras raras	7,583	7,839	7,162
C4 - Ampla faixa de operação com enfraquecimento de campo	7,556	7,934	7,203
C5 - Custo de fabricação	7,656	7,322	7,347
C6 - Densidade de potência	8,483	7,719	7,589
C7 - Baixa ondulação de conjugado	7,407	7,272	6,985
$\lambda_{m\acute{a}x}$	7,761	7,677	7,283

Fonte: a autora (2024).

Idealmente, em uma matriz de comparações perfeitamente consistente, o $\lambda_{m\acute{a}x}$ seria igual ao número de critérios ($N = 7$). No entanto, pequenas variaoes são aceitáveis e esperadas em julgamentos humanos. A proximidade dos valores obtidos de $\lambda_{m\acute{a}x}$ em relaao ao ideal indica um nível de consistência satisfatório nas matrizes.

O método AHP incorpora um mecanismo de verificaao da consistência, etapa fundamental para validar a robustez dos resultados obtidos. A consistência é avaliada por meio da razão de consistência (r), calculada a partir do ndice de consistência (γ) e do ndice randômico (ν).

Para o presente estudo, a quantidade de critérios é igual a sete em todos os cenários, resultando em um valor fixo do ndice randômico igual a 1,32, conforme a Tabela 1 de Saaty (1991). A razão de consistência deve ser inferior a 10% ($r < 0,1$) para ser considerada aceitável. Valores superiores indicam julgamentos inconsistentes, exigindo revisão dos dados.

O ndice de consistência é calculado conforme a Equaao 6 e, a partir dele, obtem-se a razão de consistência utilizando a Equaao 7. A Tabela 7 apresenta os valores obtidos para cada cenário analisado, confirmando a consistência dos julgamentos realizados.

Tabela 7 – Verificaao da coerência do modelo para cada cenário

Parâmetro	Resultado		
	Veículos leves	Veículos pesados	<i>In-wheel</i>
ndice de Consistência (γ)	0,1268	0,1129	0,0471
ndice Randômico (ν)	1,32	1,32	1,32
Razão de Consistência (r)	0,0961	0,0855	0,0357

Fonte: a autora (2024).

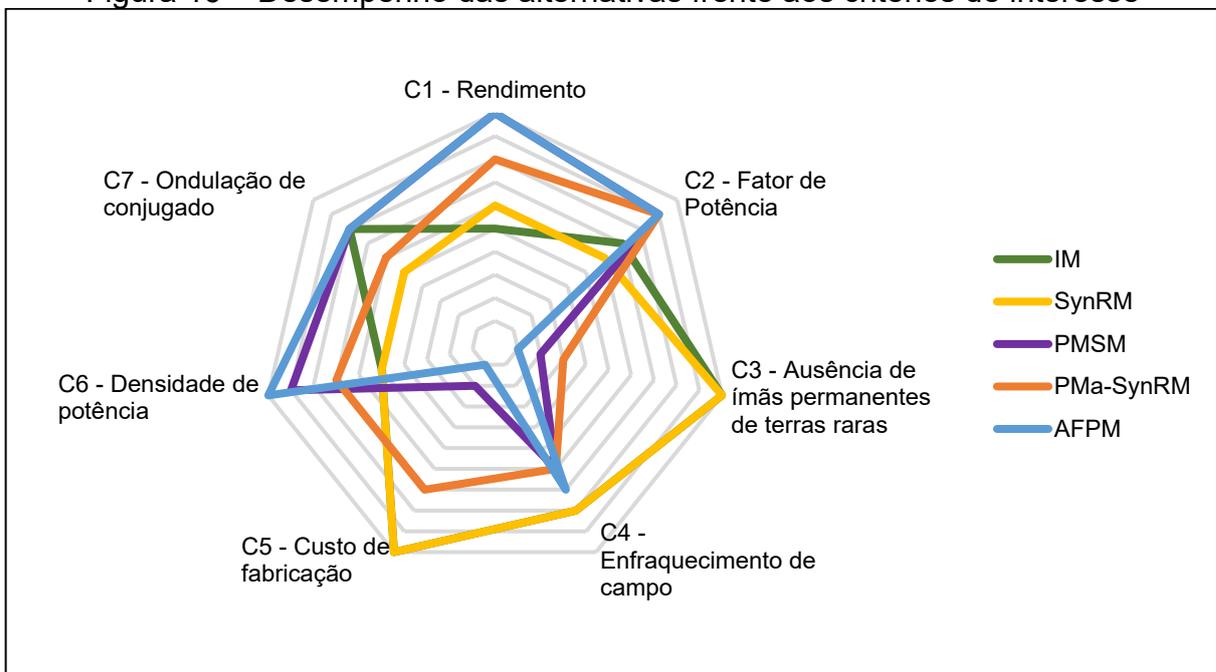
Mediante o teste de consistência realizado, verifica-se que, nos três cenários analisados, a razão de consistência permaneceu dentro do limite aceitável estabelecido por Saaty. Dessa forma, os julgamentos realizados nas matrizes de comparaao podem ser considerados consistentes, validando a confiabilidade dos pesos atribuídos aos critérios em cada cenário de aplicaao.

4.4.5 Classificaao pelo método AHP

Após realizar os cálculos dos critérios em relaao ao objetivo principal, o próximo passo consistiu em calcular o desempenho das alternativas em relaao a cada critério. Os dados utilizados para a construao da matriz de desempenho das

alternativas foram obtidos a partir do desempenho das topologias de máquinas elétricas, conforme relatado na literatura. Diversos estudos propõem comparações entre diferentes topologias utilizando abordagens como análises conceituais, simulações computacionais, avaliações experimentais e escalas numéricas (Bostanci *et al.*, 2017; Ehsani *et al.*, 2021; Karki *et al.*, 2020; Ramesh; Lenin, 2019; Rind *et al.*, 2017; Wang; Chen; Wang, 2019; Zeraoulia; Benbouzid; Diallo, 2006). Com base nesses trabalhos e outros, foi possível organizar e classificar o desempenho das alternativas consideradas neste estudo de caso, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Desempenho das alternativas frente aos critérios de interesse



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Os dados de desempenho, atribuídos com valores de 1 a 10, foram consolidados na Tabela 8, com base no levantamento feito conforme apresentado no Apêndice D. Essa classificação serviu como base para a construção da matriz de desempenho das alternativas em relação a cada critério avaliado.

Tabela 8 – Desempenho das alternativas em relação a cada critério

Alternativas	Critérios							Média
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	
IM	5	7	10	8	10	5	8	7,6
SynRM	6	6	10	8	10	5	5	7,1
PMSM	10	9	2	6	2	9	8	6,6
PMa-SynRM	8	9	3	6	7	7	6	6,6
AFPM	10	9	1	7	1	10	8	6,6

Fonte: a autora (2024).

O desempenho das alternativas permanece o mesmo nos três cenários analisados, pois as características são inerentes às topologias de máquinas elétricas, independentemente do contexto de aplicação. O que varia entre os cenários é a importância relativa de cada critério, determinada pelos julgamentos paritários, e não o desempenho intrínseco de cada topologia frente aos critérios definidos.

Em seguida, a matriz de desempenho foi normalizada, conforme pode ser visualizado na Tabela 9.

Tabela 9 – Matriz normalizada de desempenho das alternativas

Alternativas	Critérios						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
IM	0,128	0,175	0,385	0,229	0,333	0,139	0,229
SynRM	0,154	0,150	0,385	0,229	0,333	0,139	0,143
PMSM	0,256	0,225	0,077	0,171	0,067	0,250	0,229
PMa-SynRM	0,205	0,225	0,115	0,171	0,233	0,194	0,171
AFPM	0,256	0,225	0,038	0,200	0,033	0,278	0,229
Somatório	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Fonte: a autora (2024).

Para obter a matriz final de prioridade, as preferências foram agregadas por meio da multiplicação entre os vetores de prioridade (autovetores) e a matriz normalizada de desempenho das alternativas. O resultado dessa multiplicação representa a posição de cada alternativa em relação ao conjunto de critérios avaliados, conforme pode ser visualizado na Tabela 10.

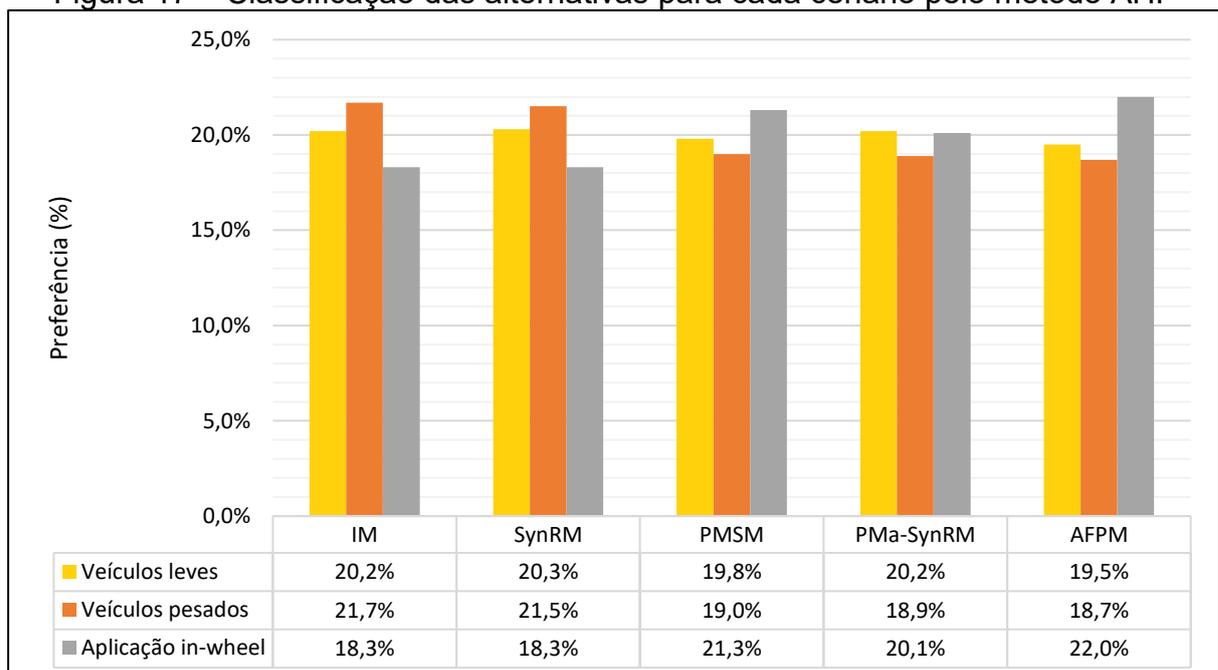
Tabela 10 – Autovetor para cada cenário

Veículos leves	Alternativas	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	IM	0,040	0,025	0,028	0,006	0,064	0,029	0,011
	SynRM	0,048	0,021	0,028	0,006	0,064	0,029	0,007
	PMSM	0,080	0,032	0,006	0,005	0,013	0,052	0,011
	PMa-SynRM	0,064	0,032	0,008	0,005	0,044	0,040	0,008
	AFPM	0,080	0,032	0,003	0,005	0,006	0,057	0,011
Veículos pesados	Alternativas	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	IM	0,034	0,042	0,067	0,032	0,024	0,010	0,007
	SynRM	0,041	0,036	0,067	0,032	0,024	0,010	0,005
	PMSM	0,069	0,054	0,013	0,024	0,005	0,017	0,007
	PMa-SynRM	0,055	0,054	0,020	0,024	0,017	0,014	0,006
	AFPM	0,069	0,054	0,007	0,028	0,002	0,019	0,007
Aplicação in-wheel	Alternativas	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	IM	0,031	0,017	0,010	0,014	0,048	0,055	0,009
	SynRM	0,037	0,014	0,010	0,014	0,048	0,055	0,006
	PMSM	0,061	0,021	0,002	0,010	0,010	0,099	0,009
	PMa-SynRM	0,049	0,021	0,003	0,010	0,033	0,077	0,007
	AFPM	0,061	0,021	0,001	0,012	0,005	0,110	0,009

Fonte: a autora (2024).

Em seguida, somam-se os elementos de cada linha chegando-se à prioridade final das alternativas pelo método AHP, conforme pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 – Classificação das alternativas para cada cenário pelo método AHP



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Com base nos resultados obtidos pelo método AHP, observa-se que a distribuição das preferências entre as alternativas é bastante próxima nos três cenários analisados. Essa proximidade revela a complexidade da escolha da topologia ideal de máquina elétrica para cada aplicação e reforça a importância de se utilizar um método complementar como o TOPSIS para maior refinamento dos resultados.

Para veículos leves, a SynRM obteve a maior preferência (20,3%), seguido pelas topologias IM e PMa-SynRM, ambas com 20,2%, configurando um empate. No cenário de veículos pesados, a topologia IM alcançou a maior preferência com 21,7%, seguida de perto pelo SynRM (21,5%). Para aplicações *in-wheel*, a AFPM obteve a maior pontuação (22,0%), posicionando-se como a alternativa mais promissora. A seguir vêm a PMSM (21,3%) e a PMa-SynRM (20,1%). Observa-se ainda um empate entre IM e SynRM (ambas com 18,3%). Diante dessa proximidade entre os valores e da existência de empate, o uso do TOPSIS torna-se importante para indicar, qual topologia apresenta a melhor adequação ao perfil da aplicação em questão.

4.4.6 Matriz normalizada AHP-TOPSIS

O método híbrido AHP-TOPSIS utiliza inicialmente o AHP para determinar os pesos relativos dos critérios (vetores de prioridades), que posteriormente são empregados como entrada no modelo TOPSIS para a avaliação das alternativas. O objetivo é identificar a alternativa que apresenta o desempenho mais próximo da solução ideal positiva e mais distante da solução ideal negativa, em cada cenário analisado.

Os dados de entrada para o TOPSIS são formados a partir dos vetores de prioridades obtidos no AHP (Tabela 4), combinados com o desempenho das alternativas, com base na revisão da literatura (Tabela 8).

Realizou-se a normalização das matrizes de desempenho, conforme orientado pela técnica TOPSIS, utilizando a normalização vetorial (Equação 9). Este procedimento consiste em dividir cada elemento da matriz pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos valores da respectiva coluna, padronizando as unidades e preservando as proporções relativas entre os dados.

Tabela 11 – Normalização da matriz das alternativas conforme TOPSIS

Cenário	Normalização						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Veículos leves	18,03	18,11	14,63	15,78	15,94	16,73	15,91
Veículos pesados							
Aplicação <i>in-wheel</i>							

Fonte: a autora (2024).

A partir disso, a matriz de decisão normalizada ponderada (**V**) pode ser calculada por meio da multiplicação da matriz normalizada pelos pesos dos critérios (obtidos pelo AHP), conforme a Equação 10. Os resultados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Matriz de decisão normalizada do modelo TOPSIS

Veículos leves	Alternativas	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	IM	0,0871	0,0553	0,0493	0,0136	0,1197	0,0618	0,0233
SynRM	0,1046	0,0474	0,0493	0,0136	0,1197	0,0618	0,0145	
PMSM	0,1743	0,0711	0,0099	0,0102	0,0239	0,1112	0,0233	
PMa-SynRM	0,1394	0,0711	0,0148	0,0102	0,0838	0,0865	0,0175	
AFPM	0,1743	0,0711	0,0049	0,0119	0,0120	0,1235	0,0233	
Veículos pesados	Alternativas	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	IM	0,0743	0,0936	0,1193	0,0715	0,0450	0,0209	0,0165
SynRM	0,0892	0,0802	0,1193	0,0715	0,0450	0,0209	0,0103	
PMSM	0,1486	0,1203	0,0239	0,0536	0,0090	0,0376	0,0165	
PMa-SynRM	0,1189	0,1203	0,0358	0,0536	0,0315	0,0293	0,0123	
AFPM	0,1486	0,1203	0,0119	0,0626	0,0045	0,0418	0,0165	
Aplicação <i>in-wheel</i>	Alternativas	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	IM	0,0665	0,0368	0,0180	0,0302	0,0900	0,1184	0,0197
SynRM	0,0798	0,0316	0,0180	0,0302	0,0900	0,1184	0,0123	
PMSM	0,1330	0,0473	0,0036	0,0227	0,0180	0,2132	0,0197	
PMa-SynRM	0,1064	0,0473	0,0054	0,0227	0,0630	0,1658	0,0148	
AFPM	0,1330	0,0473	0,0018	0,0264	0,0090	0,2368	0,0197	

Fonte: a autora (2024).

Após a normalização e a ponderação das matrizes de desempenho, a estrutura dos dados está adequada para a próxima fase do método TOPSIS. Nesta etapa, busca-se determinar a solução ideal positiva e a solução ideal negativa para cada cenário analisado.

4.4.7 Solução ideal positiva e negativa

De acordo com a teoria do método TOPSIS, a solução ideal positiva representa os melhores valores para cada critério, enquanto a solução ideal negativa reúne os piores desempenhos. Essas distâncias são calculadas utilizando as Equações 12 e 13 e apresentadas, respectivamente, na Tabela 13.

Tabela 13 – Soluções ideais positivas e negativas

Cenário	Solução	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Veículos leves	A ⁺	0,1743	0,0711	0,0493	0,0136	0,1197	0,1235	0,0233
	A ⁻	0,0871	0,0474	0,0049	0,0102	0,0120	0,0618	0,0145
Veículos pesados	A ⁺	0,1486	0,1203	0,1193	0,0715	0,0450	0,0418	0,0165
	A ⁻	0,0743	0,0802	0,0119	0,0536	0,0045	0,0209	0,0103
Aplicação <i>in-wheel</i>	A ⁺	0,1330	0,0473	0,0180	0,0302	0,0900	0,2368	0,0197
	A ⁻	0,0665	0,0316	0,0018	0,0227	0,0090	0,1184	0,0123

Fonte: a autora (2024).

A partir dessas referências, serão calculadas as distâncias euclidianas entre cada alternativa e as soluções ideais, permitindo a classificação final das alternativas com base em sua proximidade relativa à solução ideal.

4.4.8 Medidas de separação e coeficiente de similaridade

Após a definição das soluções ideal positiva e ideal negativa, foi realizado o cálculo da distância euclidiana de cada alternativa em relação a essas soluções, conforme descrito pelas Equações 14 e 15. Os resultados obtidos para as medidas de separação em relação à solução ideal positiva (D_i^+) e à solução ideal negativa (D_i^-), bem como os respectivos coeficientes de similaridade (CC_i), estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Distâncias Euclidianas e Coeficientes de Similaridade das Alternativas

Veículos leves	Alternativas	D_i^+	D_i^-	CC_i
	IM	0,1080	0,1172	0,5205
	SynRM	0,0965	0,1179	0,5499
	PMSM	0,1044	0,1041	0,4994
	PMa-SynRM	0,0715	0,0958	0,5725
	AFPM	0,1166	0,1098	0,4850
Veículos pesados	Alternativas	D_i^+	D_i^-	CC_i
	IM	0,0817	0,1170	0,5890
	SynRM	0,0749	0,1171	0,6097
	PMSM	0,1036	0,0872	0,4571
	PMa-SynRM	0,0924	0,0705	0,4329
	AFPM	0,1151	0,0877	0,4324
Aplicação in-wheel	Alternativas	D_i^+	D_i^-	CC_i
	IM	0,1362	0,0834	0,3799
	SynRM	0,1310	0,0840	0,3907
	PMSM	0,0775	0,1174	0,6023
	PMa-SynRM	0,0820	0,0838	0,5053
	AFPM	0,0827	0,1370	0,6236

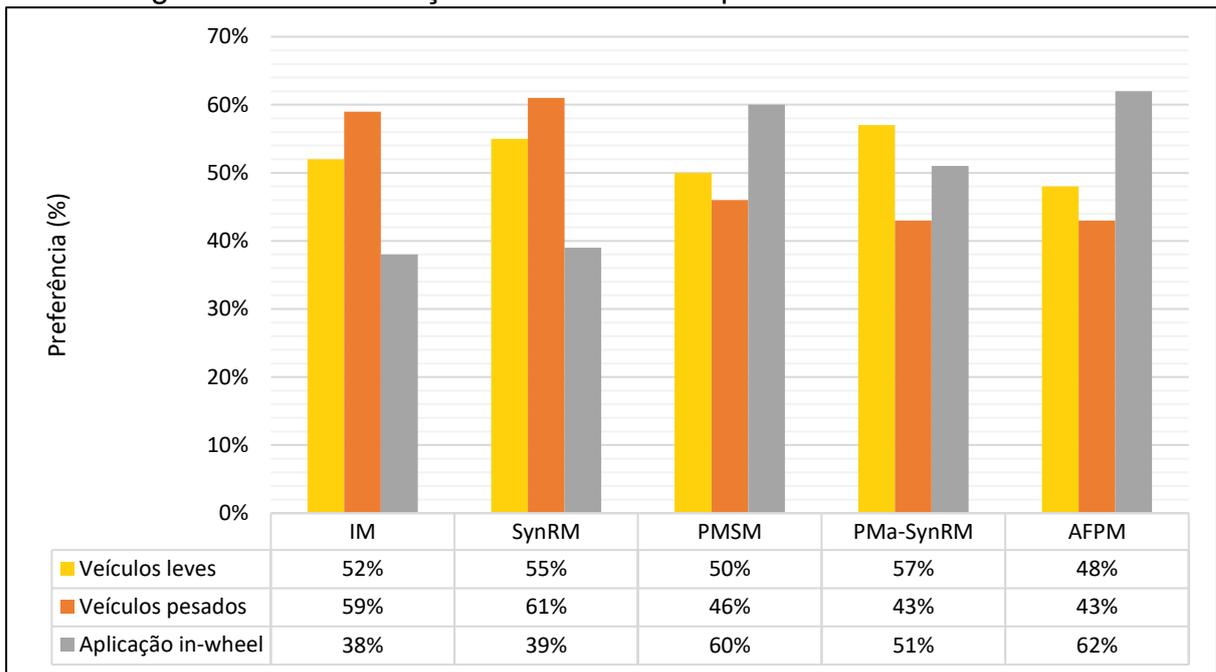
Fonte: a autora (2024).

O coeficiente de similaridade (CC_i) expressa a relação entre a distância da alternativa até a solução ideal negativa e a soma total das distâncias em relação às duas soluções de referência. Valores de CC_i mais próximos de 1 indicam alternativas que estão mais próximas da solução ideal positiva e mais afastadas da solução ideal negativa, representando, portanto, as melhores opções dentro do conjunto analisado. Assim, a alternativa que apresentar o maior valor de CC_i é considerada a mais adequada para o cenário estudado.

4.4.9 Classificação pelo método AHP-TOPSIS

Através do cálculo dos coeficientes de similaridade, as alternativas foram classificadas para cada cenário analisado. O método AHP-TOPSIS permitiu ordenar as opções de acordo com o desempenho global de cada alternativa. A Figura 18 apresenta a classificação das alternativas para os três cenários analisados.

Figura 18– Classificação das alternativas pelo método AHP-TOPSIS



Fonte: elaborado pela autora (2024).

Conforme ilustrado na Figura 18, é possível observar que a classificação das alternativas varia entre os cenários, refletindo a influência dos pesos dos critérios e o desempenho de cada topologia de máquina elétrica. Essa análise reforça a importância do uso de métodos multicritério combinados para apoiar decisões técnicas complexas, garantindo que a seleção das alternativas esteja alinhada às exigências específicas de cada aplicação.

5 DISCUSSÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos da aplicação dos métodos AHP e AHP-TOPSIS para a seleção de topologias de máquinas elétricas de tração veicular. São comparados os resultados de cada abordagem, destacando as diferenças observadas e os benefícios da integração dos métodos no processo decisório.

A seguir, a Tabela 15 apresenta a comparação dos resultados obtidos com a aplicação isolada do método AHP e do método híbrido AHP-TOPSIS para cada cenário de estudo. Essa comparação permite visualizar como a combinação dos métodos contribuiu para uma definição mais robusta e discriminativa da melhor opção em cada aplicação.

Tabela 15 – Comparação AHP *versus* AHP-TOPSIS para cada cenário

Veículos leves	Alternativas	AHP	Posição pelo AHP	AHP-TOPSIS	Posição pelo AHP-TOPSIS
	IM		20,2%	2º	52%
SynRM		20,3%	1º	55%	2º
PMSM		19,8%	3º	50%	4º
PMa-SynRM		20,2%	2º	57%	1º
AFPM		19,5%	4º	48%	5º
Veículos pesados	Alternativas	AHP	Posição pelo AHP	AHP-TOPSIS	Posição pelo AHP-TOPSIS
	IM		21,7%	1º	59%
SynRM		21,5%	2º	61%	1º
PMSM		19,0%	3º	46%	3º
PMa-SynRM		18,9%	4º	43%	4º
AFPM		18,7%	5º	43%	4º
Aplicação <i>in-wheel</i>	Alternativas	AHP	Posição pelo AHP	AHP-TOPSIS	Posição pelo AHP-TOPSIS
	IM		18,3%	4º	38%
SynRM		18,3%	4º	39%	4º
PMSM		21,3%	2º	60%	2º
PMa-SynRM		20,1%	3º	51%	3º
AFPM		22,0%	1º	62%	1º

Fonte: a autora (2024).

A Tabela 15 evidencia que, no método AHP, os percentuais de preferência entre as alternativas permaneceram muito próximos, com variações inferiores a 2 pontos percentuais na maioria dos casos. Essa distribuição homogênea dificultou a

distinção clara da melhor alternativa em cada cenário, indicando que, embora o AHP tenha sido eficaz na estruturação e priorização dos critérios, mostrou-se menos evidente na ordenação final das alternativas, sobretudo em um contexto no qual os desempenhos das máquinas elétricas para tração veicular podem ser bastante similares.

Por outro lado, o método AHP-TOPSIS proporcionou uma diferenciação mais acentuada entre as alternativas, permitindo identificar, em cada cenário, a alternativa com desempenho mais próximo da solução ideal positiva e mais distante da solução ideal negativa, fortalecendo o processo decisório por meio de uma classificação final mais evidente e discriminativa, com variações na decisão final, conforme será discutido adiante.

5.1 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Nos três cenários avaliados, observa-se que a aplicação isolada do AHP resultou em uma distribuição equilibrada de preferências entre as alternativas, o que dificultou uma decisão conclusiva sobre a melhor opção. Em contrapartida, a adoção do método híbrido AHP-TOPSIS ampliou a diferenciação entre as alternativas, proporcionando uma avaliação mais evidente e realista quanto à adequação técnica de cada topologia aos requisitos de cada aplicação.

- Em veículos leves, a PMA-SynRM foi a alternativa de maior preferência (57%), seguida de perto pela SynRM (55%). Esta tendência evidencia a valorização de características como alta eficiência energética e elevada densidade de potência, que são fundamentais para maximizar a autonomia e otimizar o desempenho em aplicações onde volume é restritivo. A PMA-SynRM, ao incorporar ímãs de ferrite ou pequenas quantidades de terras raras estrategicamente posicionadas nas barreiras de fluxo, oferece ganhos expressivos em torque específico e faixa de operação de potência constante, sem os elevados custos e limitações de sustentabilidade associados às PMSMs tradicionais.

Ainda no cenário de veículos leves, conforme a Figura 18, observa-se que a IM superou a PMSM no ranking final do AHP-TOPSIS. Isso ocorre devido à lógica do método TOPSIS, que não se baseia apenas nos critérios de maior peso isoladamente. Embora a PMSM seja

superior em rendimento (C1) e densidade de potência (C6), que são os critérios com pesos elevados (31,42% e 20,67%, respectivamente), a IM obteve uma vantagem decisiva por seu desempenho máximo em custo de fabricação (C5), que possui um peso considerável de 19,08%, e em ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3), com peso de 7,21%. Nestes dois critérios (C5 e C3), a IM alcançou nota 10, enquanto a PMSM recebeu nota 2, criando uma disparidade significativa.

No método TOPSIS, essa performance superior da IM em C3 e C5, especialmente a grande diferença de notas, fez com que ela se distanciasse consideravelmente da Solução Ideal Negativa (A^-), que representa o pior desempenho possível. A IM registrou uma distância D_i^- de 0,1172, enquanto a PMSM teve D_i^- de 0,1041. Apesar de a PMSM estar ligeiramente mais próxima da Solução Ideal Positiva (A^+) com D_i^+ de 0,1044 contra 0,1080 da IM, o maior afastamento da IM em relação à A^- foi mais impactante no cálculo final do Coeficiente de Similaridade (CC_i), que resultou em 0,5205 para a IM e 0,4994 para a PMSM. Adicionalmente, a IM também superou a PMSM no critério de ampla faixa de operação com enfraquecimento de campo (C4), contribuindo para ampliar sua vantagem. A explicação para essa preferência da IM sobre a PMSM para o cenário de veículos leves reside na forma como o desempenho global das alternativas é avaliado, considerando não apenas os critérios mais ponderados, mas o conjunto de todos os fatores e a proximidade de cada alternativa às soluções ideais positiva e negativa, intrínsecas à lógica do TOPSIS.

Em síntese, a classificação da IM acima da PMSM não decorre de um único critério isolado, mas do equilíbrio entre desempenho e ponderação, com destaque principalmente para critérios de custo e ausência de ímãs de terras raras, que pesaram mais na lógica multicritério do TOPSIS.

- Em veículos pesados, a SynRM foi a topologia mais bem posicionada (61%), seguida pela IM (59%). A escolha da SynRM reflete uma mudança de paradigma no setor, uma vez que sua construção robusta, com rotor composto apenas por chapas ferromagnéticas laminadas (sem enrolamentos ou barras condutoras), resulta em menores perdas rotóricas, melhor desempenho térmico e maior confiabilidade operacional, que são atributos essenciais para

aplicações de alta carga e ciclos exigentes de operação. Já a IM, embora apresente maior robustez mecânica consolidada e menor sensibilidade a variações de carga, sofre com maiores perdas no rotor e com a necessidade de sistemas de refrigeração mais robustos, o que justifica sua segunda colocação.

- Na aplicação *in-wheel*, a AFPM (62%) destacou-se como a alternativa mais adequada, seguida pela PMSM (60%). A preferência pela AFPM decorre principalmente da sua arquitetura de fluxo axial, que permite uma maior densidade de potência em volumes compactos, sendo uma característica essencial para aplicações onde o motor precisa ser integrado diretamente no cubo da roda. Esse formato reduz a necessidade de espaço longitudinal e favorece o desenho de veículos mais leves e eficientes. Apesar de as AFPMs também utilizarem ímãs permanentes, sua geometria permite maior flexibilidade na disposição dos materiais magnéticos e melhor aproveitamento do espaço, resultando em configurações mais otimizadas para aplicações compactas. A PMSM, embora ofereça alta densidade de torque e excelente eficiência energética, apresenta desafios relacionados à sua arquitetura de fluxo radial, que tende a ocupar mais volume transversal e apresenta menor potencial de compactação em comparação às máquinas axiais, o que pode limitar sua aplicação em sistemas *in-wheel*, para as quais o espaço disponível é extremamente restrito.

De forma geral, os resultados obtidos confirmam que a escolha da topologia ideal deve ser orientada pelas características específicas de cada aplicação e não por uma preferência genérica por determinado tipo de máquina. A utilização do método híbrido AHP-TOPSIS permitiu uma ordenação mais discriminativa das alternativas, com inversão nas preferências.

5.1.1 Análise da inversão de *ranking* entre o AHP e AHP-TOPSIS

A Tabela 15 compara os resultados obtidos com a aplicação isolada do método AHP e do método híbrido AHP-TOPSIS para os três cenários analisados. Observa-se, no cenário de veículos leves e pesados, uma inversão de ranking entre as alternativas, além de uma diferenciação mais nítida no posicionamento das topologias quando se utiliza o método híbrido. Essa mudança na classificação, embora possa parecer

construtiva à primeira vista, é uma consequência das diferentes lógicas de agregação e princípios de classificação empregados por cada método, sendo uma ocorrência recorrente e debatida na literatura sobre métodos multicritério de apoio à decisão.

Enquanto o AHP estrutura o problema em forma hierárquica e utiliza comparações paritárias para derivar pesos e prioridades globais, o TOPSIS baseia-se na distância relativa de cada alternativa em relação a uma Solução Ideal Positiva (PIS ou A^+) e uma Solução Ideal Negativa (NIS ou A^-). A PIS é uma solução hipotética que representa os melhores valores alcançáveis para cada critério, enquanto a NIS representa os piores valores. O TOPSIS calcula um coeficiente de similaridade (ou proximidade relativa) para cada alternativa em relação a essas soluções ideais. No modelo híbrido, os pesos dos critérios são obtidos pelo AHP e utilizados na construção da matriz ponderada do TOPSIS, que, por sua vez, calcula as distâncias euclidianas às soluções ideais e determina o grau de similaridade de cada alternativa.

Essa diferença metodológica tem implicações práticas importantes. O AHP tende a suavizar as diferenças entre alternativas, como se observa no cenário de veículos leves, onde IM, PMA-SynRM e SynRM apresentaram percentuais de preferência muito próximos (20,2%, 20,2% e 20,3%, respectivamente). Já no AHP-TOPSIS, as mesmas alternativas revelaram distanciamentos mais marcantes, em que a PMA-SynRM alcançou 57%, SynRM 55% e IM 52%, resultando em uma ordenação mais discriminante. Isso ocorre porque o TOPSIS, ao considerar o afastamento das alternativas em relação à NIS e sua aproximação da PIS, amplia a sensibilidade às variações nos desempenhos específicos de cada critério.

O AHP e o AHP-TOPSIS utilizam lógicas diferentes para agregação e classificação. O AHP agrega as preferências através de uma soma ponderada das prioridades locais das alternativas em relação a cada critério. O ranking é direto a partir desses escores globais. O TOPSIS, mesmo utilizando os pesos do AHP, introduz uma lógica de medidas de separação e coeficiente de similaridade. Uma alternativa pode ter um bom escore no AHP por ser consistentemente boa em vários critérios de peso médio, mas se, em alguns critérios importantes (com alto peso do AHP), ela estiver muito distante da PIS ou próxima da NIS, seu ranking no TOPSIS pode cair. Inversamente, uma alternativa que não se destaca tanto no AHP (talvez por não ser a melhor em muitos critérios, mas também não ser a pior) pode subir no

ranking do TOPSIS se estiver consistentemente mais próxima da PIS e mais distante da NIS em um conjunto de critérios ponderados.

A inversão não significa necessariamente uma falha em um dos métodos, mas sim que eles capturam diferentes facetas da preferência e do desempenho. A coerência da inversão reside no fato de que o AHP-TOPSIS busca um tipo diferente de "ótimo" em comparação com o AHP. Uma alternativa bem posicionada no AHP pode ser penalizada no TOPSIS se apresentar distância elevada da PIS em critérios decisivos. Os métodos utilizam procedimentos de normalização distintos. O AHP emprega normalização por soma, enquanto o TOPSIS adota a normalização vetorial. Isso influencia diretamente a escala relativa dos desempenhos das alternativas e pode contribuir para variações no posicionamento.

Como observado no próprio estudo de caso, o AHP puro resultou em percentuais de preferência muito próximos entre as alternativas, dificultando uma distinção clara. O TOPSIS, ao calcular as distâncias e o coeficiente de similaridade, muitas vezes consegue "esticar" essas pequenas diferenças, levando a uma ordenação mais definida e, por vezes, diferente.

Alguns pesquisadores consideram a abordagem AHP-TOPSIS mais robusta porque combina as forças de ambos os métodos, como a capacidade do AHP de lidar com a subjetividade e hierarquizar critérios, e a lógica clara e computacionalmente simples do TOPSIS para classificar alternativas com base em um conceito intuitivo de solução ideal. Essa complementaridade permite que o processo de decisão se beneficie tanto da estruturação subjetiva quanto de uma lógica de otimização baseada em proximidade.

Oztaysi (2014), ao aplicarem AHP integrado com TOPSIS-Grey para seleção de sistemas de gerenciamento de conteúdo, argumentam que "resultados mais precisos podem ser adquiridos com a integração dos métodos AHP e TOPSIS", especialmente ao incorporar a teoria Grey para lidar com incertezas nas avaliações das alternativas.

O estudo de Menon e Ravi (2022) sobre a seleção de fornecedores sustentáveis em uma cadeia de suprimentos de eletrônicos, utilizando o método AHP-TOPSIS, destaca a eficácia da abordagem híbrida para lidar com critérios tangíveis e intangíveis no contexto da análise. A comparação pareada do AHP permite à organização compreender a importância relativa dos critérios e subcritérios específicos ao setor e ao produto, ao passo que o TOPSIS fornece uma classificação

das alternativas com base na distância em relação às soluções ideais positiva e negativa. Essa combinação metodológica oferece aos gestores uma visão clara sobre o desempenho relativo dos fornecedores, auxiliando na priorização e seleção mais coerente com os objetivos sustentáveis da empresa. O modelo desenvolvido no estudo permite integrar julgamentos subjetivos com métricas mensuráveis, fornecendo uma base robusta para decisões estratégicas de compras sustentáveis. A combinação com AHP para a ponderação dos critérios e a natureza do cálculo de distância do TOPSIS podem oferecer uma perspectiva diferente e, em muitos casos, mais estável.

A literatura traz exemplos onde a abordagem híbrida AHP-TOPSIS resultou em percepções valiosas e decisões mais fundamentadas. Os autores Sindhu, Nehra e Luthra (2017) aplicaram o AHP e Fuzzy TOPSIS para investigar a viabilidade da implantação de fazendas solares na Índia. Eles destacam que a combinação dos métodos fornece um "*framework* de suporte à decisão eficaz, eficiente e sistemático", essencial para problemas complexos como a seleção de locais, que envolvem múltiplos fatores sociais, técnicos, econômicos, ambientais e políticos. A utilização do Fuzzy TOPSIS, neste caso, também ajudou a lidar com a imprecisão e incerteza inerentes aos dados e julgamentos.

Tyagi, Kumar e Kumar (2014) utilizaram o AHP-TOPSIS para analisar o desempenho de e-SCM (*Electronic Supply Chain Management*) na indústria automobilística indiana. A análise revelou que o investimento em tecnologias baseadas na *web* era a melhor alternativa, demonstrando a capacidade do método híbrido de identificar soluções prioritárias em contextos tecnológicos e de gestão.

Esses exemplos ilustram que a combinação AHP-TOPSIS é valorizada por sua capacidade de integrar diferentes tipos de informação (qualitativa e quantitativa, subjetiva e objetiva), lidar com incertezas e fornecer *rankings* mais discriminantes e robustos. A inversão de *ranking*, portanto, pode ser vista como um refinamento da análise, onde a lógica de proximidade ao ideal do TOPSIS complementa a avaliação de prioridades relativas do AHP, resultando em uma decisão potencialmente mais equilibrada e defensável.

No contexto desse estudo de caso sobre máquinas elétricas destinadas à tração veicular, a inversão e a maior diferenciação observadas com o AHP-TOPSIS são coerentes com o objetivo de encontrar a alternativa que não apenas pontua bem de forma geral (AHP), mas que também representa o melhor compromisso em termos

de se aproximar do ideal (PIS) e se afastar do anti-ideal (NIS) em um conjunto de critérios.

5.2 SENSIBILIDADE E ROBUSTEZ DA ANÁLISE

Considerando que os resultados obtidos são influenciados por julgamentos subjetivos, baseados nos conhecimentos e preferências dos decisores (etapa de comparação dos critérios), torna-se fundamental verificar a confiabilidade das classificações finais geradas pelo método híbrido AHP-TOPSIS. Com esse objetivo, foi conduzida uma análise de sensibilidade, visando examinar se variações nos pesos atribuídos aos critérios impactam significativamente a ordenação das alternativas.

Essa abordagem possibilita testar a confiabilidade do processo de seleção, reconhecendo que, em aplicações reais, a avaliação da importância dos critérios pode sofrer pequenas variações decorrentes da atualização de informações (como o surgimento de novas tecnologias de motores mais eficientes), de mudanças nas condições de mercado (como a variação no custo dos materiais) ou de diferenças de percepção entre especialistas, que podem atribuir pesos ligeiramente distintos aos fatores avaliados.

O tipo de análise de sensibilidade empregado consistiu na modificação dos pesos relativos dos critérios, especificamente daqueles mais influentes em cada cenário, e na subsequente observação do impacto dessas alterações na classificação final das alternativas. Este procedimento foi aplicado para verificar se as alternativas selecionadas permaneceriam consistentes diante de perturbações nas preferências.

Para a realização da análise de sensibilidade, foram selecionados os dois critérios de maior peso em cada cenário de aplicação. A escolha dos critérios mais representativos visa focar a análise nas variáveis que, segundo a avaliação inicial, possuem maior influência na decisão final.

Cada critério selecionado teve seu peso original alterado em dois níveis de variação: 5% e 10%. Essas variações foram aplicadas sobre o peso dos critérios, representados pelo autovetor (w), correspondente ao critério analisado, permitindo mensurar o grau de influência que pequenas mudanças podem exercer sobre o resultado do modelo.

Os autovetores representam a prioridade atribuída a cada critério no método AHP. Ao manipular esses pesos, é possível simular cenários de variações de

juízo e, conseqüentemente, avaliar a estabilidade do modelo diante dessas incertezas.

A nova ponderação para o critério alterado foi calculada utilizando a seguinte relação:

$$NP = Cn \times \% \quad (23)$$

em que:

- NP : nova ponderação para critério escolhido,
- Cn : peso original do critério,
- %: variação percentual aplicada.

Após a alteração do peso de um critério específico, os pesos dos demais critérios foram recalculados para manter a soma total igual a 1. A redistribuição foi feita de forma proporcional, conforme:

$$C_{i(novo)} = \left(\frac{C_i}{\sum_{k \neq i} C_k} \right) \times (1 - NP) \quad (24)$$

em que:

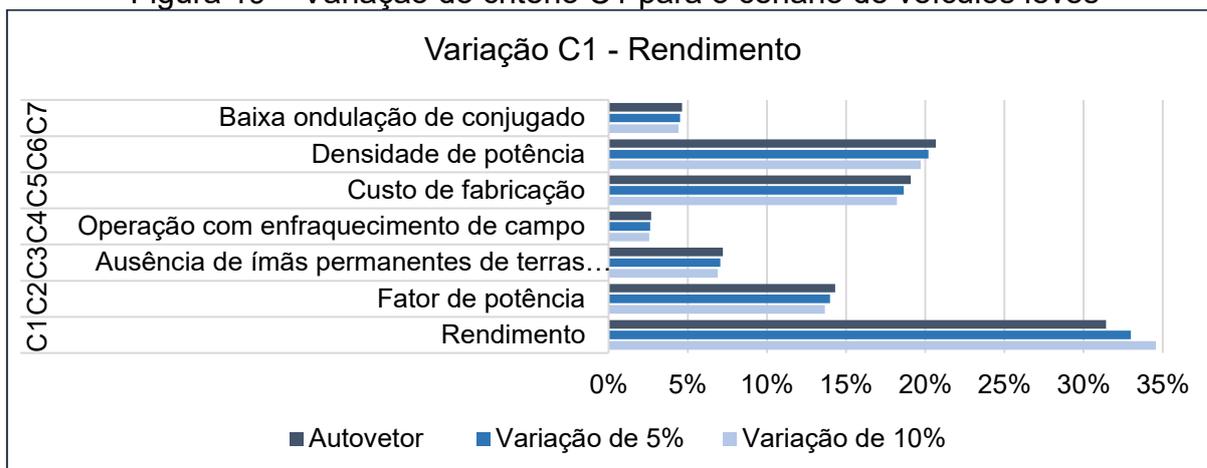
- $C_{i(novo)}$: nova ponderação do critério i ,
- C_i : ponderação original do critério i ,

Após a definição da metodologia de ajuste dos pesos dos critérios, procedeu-se à realização da análise de sensibilidade. A seguir, apresentam-se os resultados obtidos para cada cenário.

5.2.1 Análise de sensibilidade para o cenário de veículos leves

Para o cenário de veículos leves, os critérios mais influentes identificados no modelo original foram o rendimento (C1) e a densidade de potência (C6). Foram recalculadas as novas ponderações para os critérios, com os novos pesos obtidos para as variações de 5% e 10%, com as respectivas projeções visuais na Figura 19.

Figura 19 – Variação do critério C1 para o cenário de veículos leves



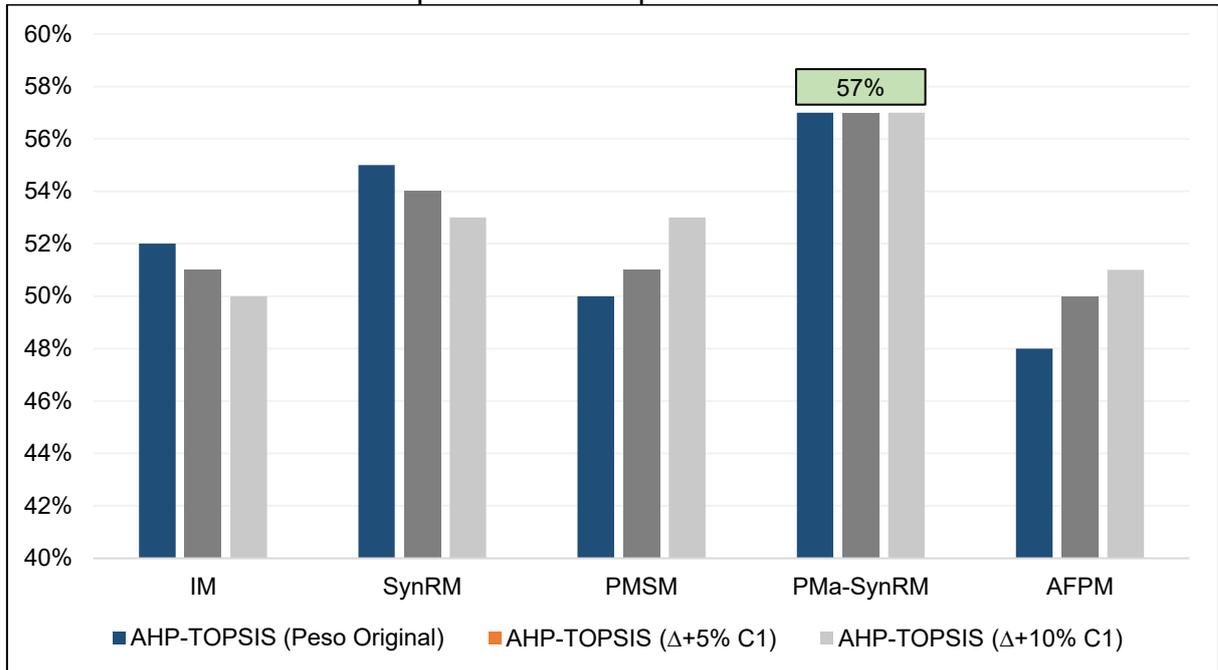
Fonte: a autora (2024).

Observa-se que, embora pequenas oscilações tenham ocorrido entre os critérios, o impacto geral foi limitado, sem inversão significativa nas prioridades relativas.

Contudo, a projeção apenas dos pesos dos critérios não é suficiente para atestar a robustez do modelo. Assim, na sequência, avaliou-se o impacto dessas variações no *ranking* final das alternativas, utilizando os novos vetores de pesos recalculados como entrada para o método TOPSIS.

A Figura 20 apresenta o impacto da variação do peso do critério rendimento (C1) sobre a preferência das alternativas para veículos leves. Foram simuladas variações de +5% e +10%, e os resultados comparados com a preferência original calculada pelo método AHP-TOPSIS.

Figura 20 – Impacto da variação do peso do critério rendimento (C1) na preferência de máquinas elétricas para veículos leves

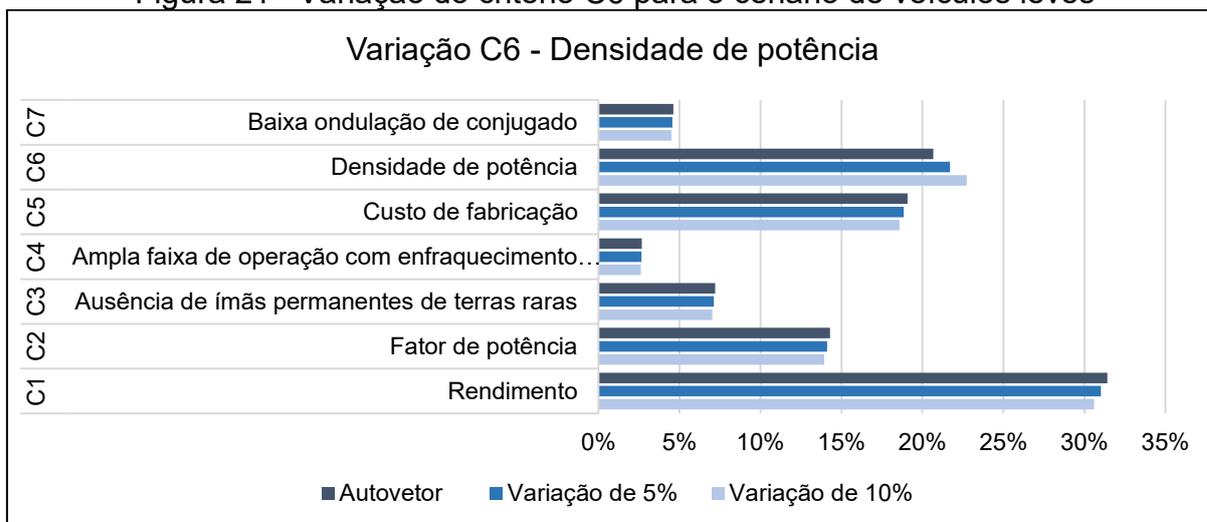


Fonte: a autora (2024).

Os gráficos de comparação dos resultados finais revelam o comportamento das alternativas sob a influência das variações aplicadas. Nota-se que mesmo após as variações aplicadas ao critério C1, a alternativa PMa-SynRM manteve 57% de preferência, demonstrando estabilidade.

A Figura 21 evidencia a estabilidade do modelo para o critério densidade de potência, indicando que alterações moderadas nos pesos desses critérios não provocam distorções relevantes na estrutura de prioridades dos critérios no cenário de veículos leves.

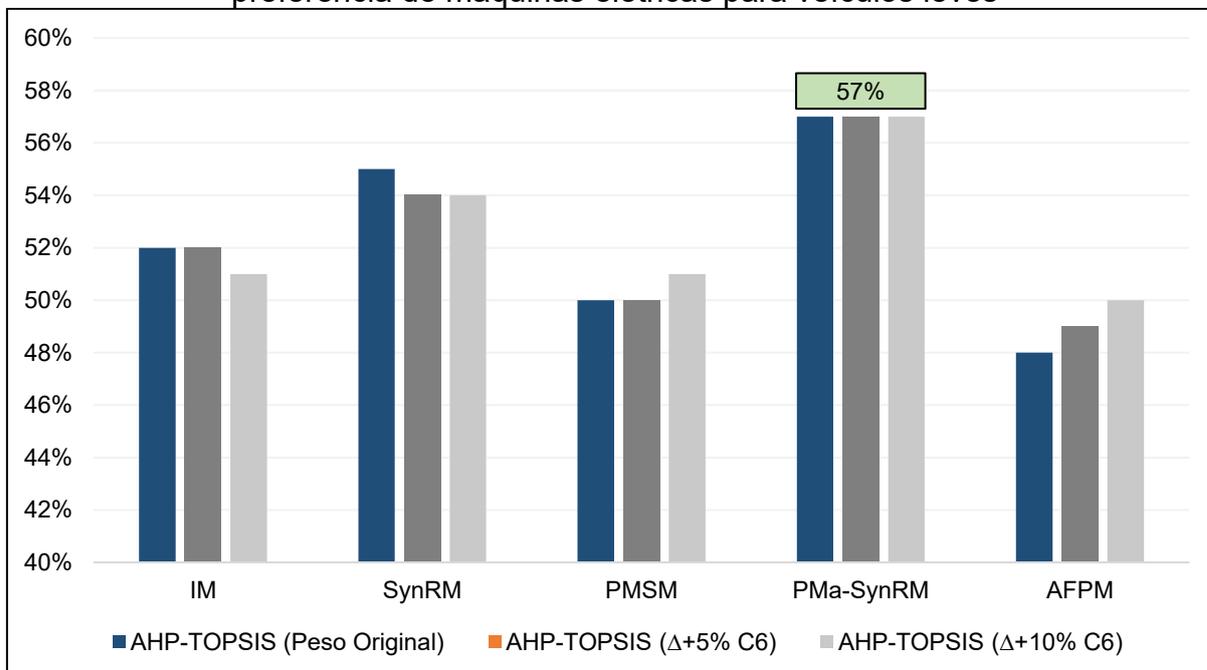
Figura 21– Variação do critério C6 para o cenário de veículos leves



Fonte: a autora (2024).

De forma similar, para o critério densidade de potência (C6), a PMA-SynRM também permaneceu como a alternativa mais bem posicionada, reforçando a estabilidade do modelo mesmo frente a alterações nos pesos atribuídos, conforme pode ser visualizado na Figura 22.

Figura 22 – Impacto da variação do peso do critério densidade de potência (C6) na preferência de máquinas elétricas para veículos leves



Fonte: a autora (2024).

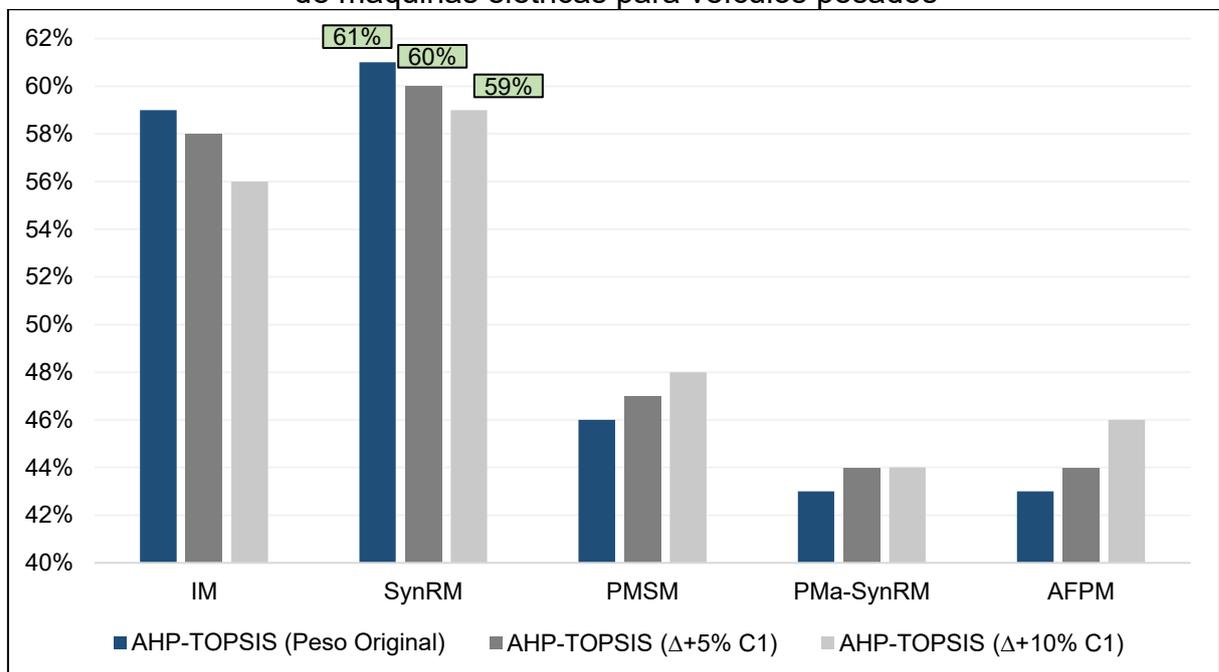
Esses resultados demonstram que o modelo desenvolvido apresenta elevada robustez no cenário de veículos leves, sendo capaz de suportar pequenas variações

nas ponderações dos critérios sem comprometer a coerência e a confiabilidade da decisão final.

5.2.2 Análise de sensibilidade para o cenário de veículos pesados

A seguir, apresenta-se a análise de sensibilidade para o cenário de veículos pesados, considerando os critérios mais influentes. A Figura 23 ilustra o impacto da variação do peso do critério rendimento (C1) na preferência das alternativas.

Figura 23 – Impacto da variação do peso do critério rendimento (C1) na preferência de máquinas elétricas para veículos pesados

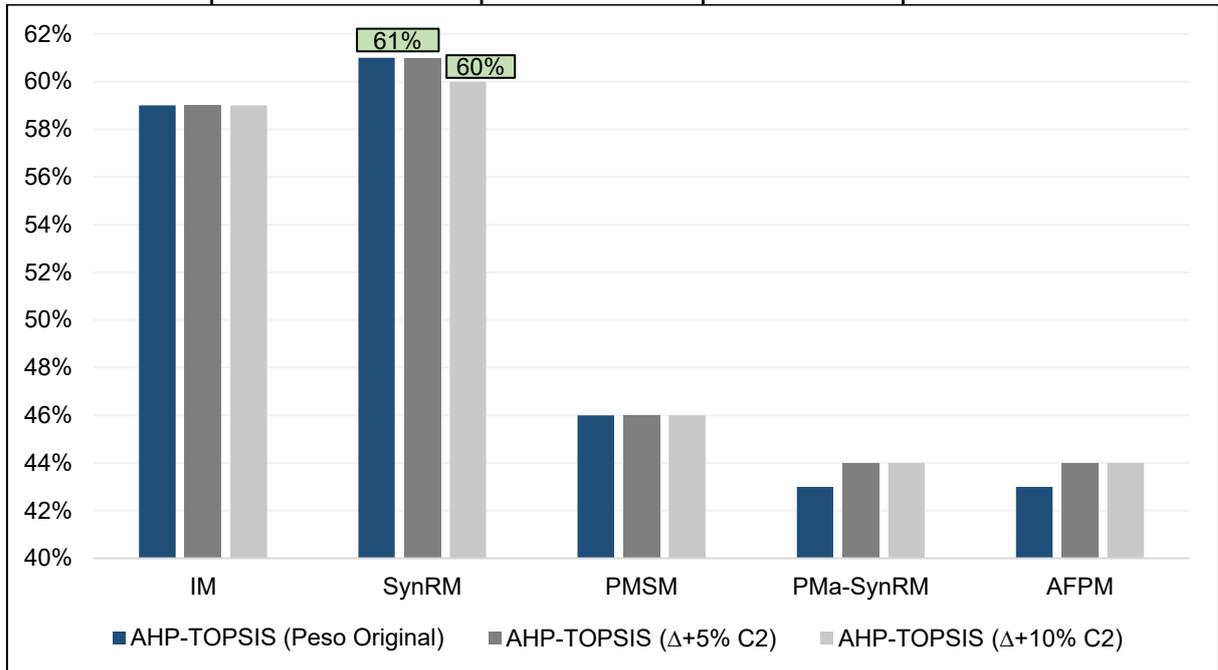


Fonte: a autora (2024).

Observa-se que a preferência pela SynRM, que inicialmente era de 61%, caiu para 60% após a variação de 5% e depois para 59% na variação de 10%. Mesmo após as alterações aplicadas ao critério C1, a alternativa SynRM manteve a preferência, demonstrando estabilidade na decisão para este cenário.

De forma análoga, a Figura 24 apresenta o impacto da variação do peso do critério fator de potência (C2) sobre a classificação das alternativas.

Figura 24 – Impacto da variação do peso do critério fator de potência (C2) na preferência de máquinas elétricas para veículos pesados



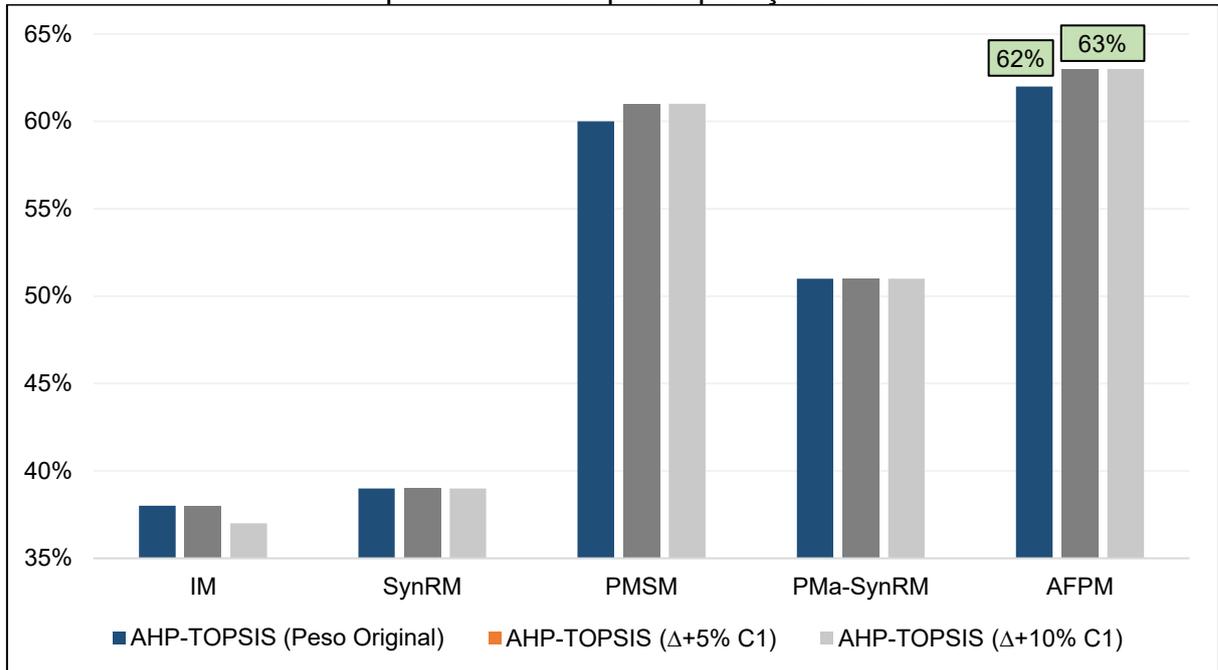
Fonte: a autora (2024).

Para uma variação de 5%, houve impacto apenas na preferência da PMa-SynRM e AFPM, que aumentaram de 43% para 44%. Enquanto uma variação de 10%, a SynRM reduziu sua preferência de 61% para 60%, enquanto PMa-SynRM e AFPM aumentaram levemente. Assim, a análise reforça que a SynRM permanece como a alternativa mais adequada para veículos pesados. As variações simuladas não provocaram alterações significativas na hierarquia final das alternativas, o que confirma a consistência dos resultados obtidos no cenário de veículos pesados.

5.2.3 Análise de sensibilidade para o cenário de aplicação *in-wheel*

A seguir, apresenta-se a análise de sensibilidade para o cenário de aplicação *in-wheel*, considerando os critérios mais influentes. A Figura 25 mostra o impacto da variação do peso do critério rendimento (C1) na preferência entre as alternativas.

Figura 25 – Impacto da variação do peso do critério rendimento (C1) na preferência de máquinas elétricas para aplicação *in-wheel*

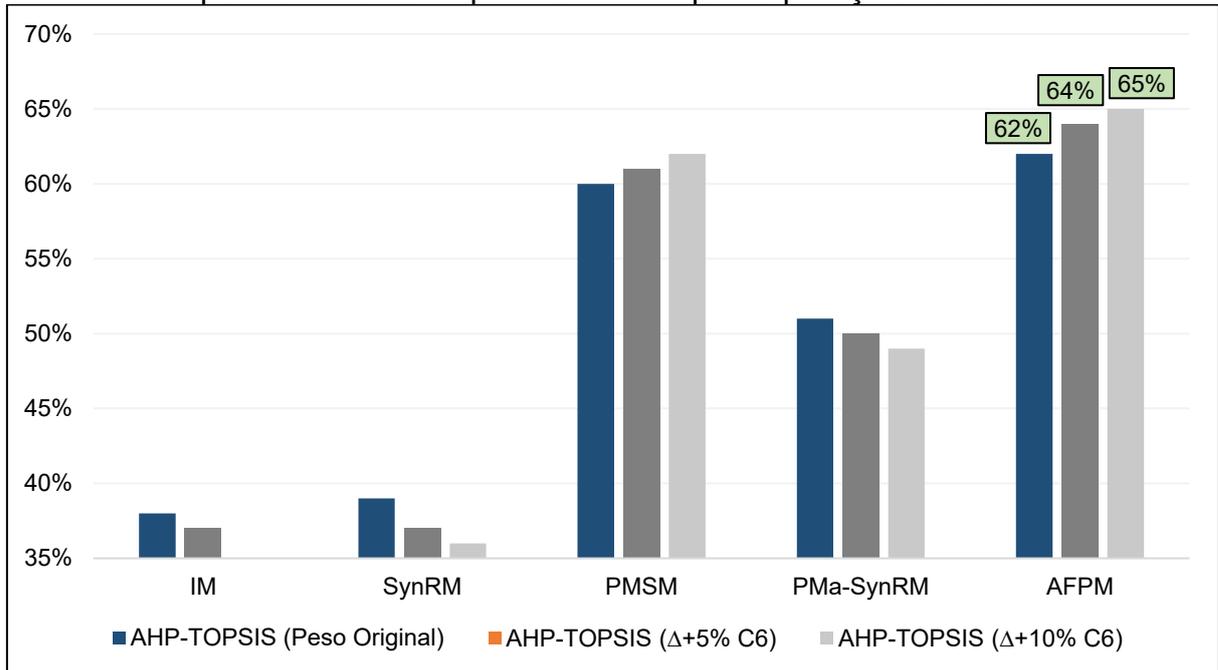


Fonte: a autora (2024).

No cenário de aplicação *in-wheel*, a variação do critério rendimento (C1) provocou um leve aumento na preferência das alternativas PMSM, que aumentou de 60% para 62%, e a AFPM cresceu de 62% para 63%. Observa-se que, mesmo após as variações simuladas no critério C1, a alternativa AFPM manteve-se com preferência.

Em complemento, a Figura 26 apresenta o impacto da variação do peso do critério densidade de potência (C6), também relevante para o cenário de aplicação *in-wheel*.

Figura 26 – Impacto da variação do peso da densidade de potência (C6) na preferência de máquinas elétricas para aplicação *in-wheel*



Fonte: a autora (2024).

Por fim, a variação do critério densidade de potência (C6) revelou tendência semelhante, em que a preferência da PMSM subiu de 60% para 62% enquanto a preferência da AFPM subiu de 62% para 65%. Esses resultados são coerentes, uma vez que a densidade de potência é um requisito importante para motores *in-wheel*, que exigem alta densidade de potência e volume reduzido.

Os resultados obtidos demonstram que o modelo AHP-TOPSIS é robusto e confiável para o problema estudado. As pequenas variações aplicadas aos pesos dos critérios mais relevantes não alteraram significativamente a ordenação final das alternativas, assegurando estabilidade e confiabilidade nas decisões de seleção de topologias de máquinas elétricas para tração veicular.

6 CONCLUSÃO

No ambiente dinâmico e competitivo da economia moderna, a seleção adequada da máquina elétrica de tração é um fator estratégico, capaz de impactar diretamente a eficiência, a capacidade produtiva e a rentabilidade de uma empresa. A complexidade inerente a essa decisão, em função da necessidade de considerar múltiplos critérios técnicos, operacionais e econômicos, torna essencial a adoção de métodos sistemáticos e estruturados de apoio à decisão.

Neste contexto, esse trabalho propôs a aplicação combinada dos métodos *Analytic Hierarchy Process (AHP)* e *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*, oferecendo uma estrutura de tomada de decisão multicritério robusta para a seleção de topologias de máquinas elétricas destinadas à tração veicular. O AHP foi empregado para calcular os pesos relativos dos critérios de avaliação, enquanto o TOPSIS foi utilizado para ranquear as alternativas em função da proximidade com a solução ideal. Para a aplicação dos métodos, utilizou-se o Microsoft® Office Excel, demonstrando que ferramentas de fácil acesso e implementação são suficientes para operacionalizar o modelo proposto.

A aplicação prática evidenciou que a escolha da máquina ideal é altamente dependente do contexto de aplicação. Em veículos leves, a topologia PMA-SynRM obteve 57% de preferência, seguida pela SynRM (55%) e pela IM (52%). Em veículos pesados, a SynRM destacou-se com 61%, superando a IM (59%) e a PMSM (46%). Já para aplicações *in-wheel*, a AFPM apresentou o melhor desempenho, com 62% de preferência, seguida pela PMSM (60%) e pela PMA-SynRM (51%). Esses resultados refletem a capacidade do modelo híbrido em capturar as exigências específicas de cada cenário, alinhando a seleção técnica às necessidades práticas da mobilidade elétrica.

A análise de sensibilidade reforçou a robustez da metodologia, demonstrando que pequenas variações nos pesos dos critérios não alteraram significativamente a hierarquia das alternativas, o que confirma a estabilidade e confiabilidade do modelo aplicado.

As principais contribuições deste estudo consistem na consolidação de uma abordagem híbrida AHP-TOPSIS adaptada à seleção de máquinas elétricas para tração veicular, na demonstração da aplicabilidade prática da metodologia utilizando

ferramentas acessíveis e na validação da robustez do modelo frente a variações nos julgamentos de prioridade dos critérios.

Entretanto, como limitação, destaca-se que a análise foi baseada em dados de desempenho extraídos de literatura técnica e não em testes experimentais próprios. Além disso, os critérios e pesos considerados refletem um cenário geral, podendo requerer ajustes para aplicações específicas ou em função da evolução tecnológica contínua do setor.

Assim, este trabalho contribui para a tomada de decisão no contexto da mobilidade elétrica e abre possibilidades para estudos futuros que considerem a aplicação da metodologia em novos contextos, com bases de dados atualizadas, avaliações experimentais e integração com outros métodos de análise.

REFERÊNCIAS

ABB. **A ABB é a primeira a atingir a hipereficiência IE6 extrapolada com motores sem ímãs permanentes.** Disponível em: <<https://new.abb.com/news/pt-br/detail/116123/a-abb-e-a-primeira-a-atingir-a-hipereficiencia-ie6-extrapolada-com-motores-sem-imas-permanentes>>. Acesso em: 24 mar. 2025a.

ABB. **Motors for Heavy Electric Vehicles.** Disponível em: <<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AAU00000000036&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=D>>. Acesso em: 25 mar. 2025b.

ABVE. **Com vendas de junho, mercado bate em 80 mil eletrificados no 1º semestre e 300 mil em circulação.** Disponível em: <<https://abve.org.br/80-mil-eletrificados-so-no-primeiro-semester/>>. Acesso em: 15 abr. 2025.

AGAMLOH, Emmanuel; VON JOUANNE, Annette; YOKOCHI, Alexandre. An overview of electric machine trends in modern electric vehicles. **Machines**, v. 8, n. 2, 17 abr. 2020.

ALATALO, Mikael. **Axial Flux Machine as a Traction Motor for Electric and Hybrid Vehicles.** Gothenburg, Sweden: [S.n.].

ALMEIDA, Anibal T. de; FERREIRA, Fernando J. T. E.; BAOMING, Ge. Beyond Induction Motors—Technology Trends to Move Up Efficiency. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 50, n. 3, p. 2103–2114, maio 2014.

ALVES, Marcos Antonio. **Proposta de Agregação Robusta de Múltiplos Métodos com Incertezas em Problemas de Tomada de Decisão Multicritério.** Dissertação de Mestrado—Belo Horizonte, MG: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 14 ago. 2018.

AMIN, Mahmoud; AZIZ, Ghada A. Abdel. Hybrid Adopted Materials in Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor With Rotating Losses Computation. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 55, n. 6, p. 1–5, jun. 2019.

AMIN, Shahbaz; KHAN, Sahib; HUSSAIN BUKHARI, Syed Sabir. A Comprehensive Review on Axial Flux Machines and Its Applications. *In*: IEEE, jan. 2019.

ANDRADE, Rodrigo. **Os desafios para consolidação dos veículos elétricos no Brasil**. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/360-os-desafios-para-consolidacao-dos-veiculos-eletricos-no-brasil>>. Acesso em: 28 nov. 2024.

ARULDOSS, M.; LAKSHMI, T. M.; VENKATESAN, V. P. A Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications. **American Journal of Information Systems.**, v. 1, n. 1, p. 31–43, 2013.

BAGHERI, Elmira *et al.* Impact of driving characteristic parameters and vehicle type on fuel consumption and emissions performance over real driving cycles. **PLOS ONE**, v. 20, n. 1, p. e0317098, 13 jan. 2025.

BEHZADIAN, Majid *et al.* A state-of the-art survey of TOPSIS applications. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 17, p. 13051–13069, dez. 2012.

BHUSHAN, Navneet; RAI, Kanwal. **Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process**. [S.l.]: Springer, 2004.

BIANCHI, Nicola *et al.* Electric Vehicle Traction Based on Synchronous Reluctance Motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 52, n. 6, p. 4762–4769, nov. 2016.

BIEKER, Georg. **A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars**. Geneva, Switzerland: [S.n.]. Disponível em: <https://unece.org/sites/default/files/2022-06/4_ICCT.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2023.

BILATIU, Cristina-Adina *et al.* Identification and Evaluation of Electric and Hybrid Vehicles Propulsion Systems. *In*: IEEE, out. 2019.

BILGIN, Berker *et al.* Making the Case for Electrified Transportation. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, v. 1, n. 1, p. 4–17, jun. 2015.

BOLDEA, Ion *et al.* Automotive Electric Propulsion Systems With Reduced or No Permanent Magnets: An Overview. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 61, n. 10, p. 5696–5711, out. 2014.

BOLVASHENKOV, Igor; KAMMERMANN, Jorg; HERZOG, Hans-Georg. Multi-Criteria Analysis for Ultimate Selection of the Vehicle Traction Electric Motor: Methodology and Application. *In*: IEEE, jun. 2018.

BORGIA, Fabio; SAMUEL, Stephen. Design of Drive Cycle for Electric Powertrain Testing. *In*: 11 abr. 2023.

BOSCH. **Separate motor-generator SMG220 OHW**. Disponível em: <https://www.bosch-mobility.com/media/global/solutions/off-highway-and-large-engines/off-highway-solutions/separate-motor-generator-ohw/beg_summary_separate_motor_generator_smg220_en_rgb_150dpi_20210727.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2025.

BOSTANCI, Emine *et al.* Opportunities and Challenges of Switched Reluctance Motor Drives for Electric Propulsion: A Comparative Study. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, v. 3, n. 1, p. 58–75, 1 mar. 2017.

BRITES, Carlo Renan Cáceres. **Abordagem Multiobjetivo na Seleção de Sistemas de Reúso de Água em Irrigação Paisagística no Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado—Brasília-DF: Universidade de Brasília (UnB), 2 maio 2008.

BUYUKDEGIRMENCI, Veysel T.; BAZZI, Ali M.; KREIN, Philip T. Evaluation of Induction and Permanent-Magnet Synchronous Machines Using Drive-Cycle Energy and Loss Minimization in Traction Applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 50, n. 1, p. 395–403, jan. 2014.

CARDOSO, Uriel Chagas. **Método Analytic Hierarchy Process para Estudo de Viabilidade da Implantação de um Centro de Distribuição**. Joinville-SC: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), mar. 2022.

CASTRO, Leonardo Mitre Alvim de. **Proposição de metodologia para avaliação dos efeitos da urbanização nos corpos de água**. Tese de Doutorado—Belo Horizonte, MG: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2007.

CAVALEIRO, Diogo Emanuel Santos. **Motor síncrono de relutância para sistemas de tração de veículos elétricos**. Mestrado—Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, fev. 2015.

CHAKRABORTY, Subrata. TOPSIS and Modified TOPSIS: A comparative analysis. **Decision Analytics Journal**, v. 2, p. 100021, mar. 2022.

CHAN, C. C. The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles. **IEEE**, p. 1–29, fev. 2002.

CHAN, C. C. The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. **Proceedings of the IEEE**, v. 95, n. 4, p. 704–718, abr. 2007.

CHAU, K. T. Overview of Electric Vehicle Machines - From Tesla to Tesla, and Beyond. *In: IEEE*, ago. 2016.

CHAVES, Viviane Hengler Corrêa. **Perspectivas históricas da Pesquisa Operacional**. Dissertação de Mestrado—Rio Claro, SP: Universidade Estadual Paulista, 2011.

CHEN, Qian; ZHAO, Wenxiang. Fault-Tolerant Control for Permanent Magnet Motors. *In: Emerging Technologies for Electric and Hybrid Vehicles* . [S.l.: S.n.]. p. 115–169.

CHENG, Y. I. L. I.; LIN, Y. U. A. N. H. S. U. Performance Evaluation of Technological Innovation Capabilities In Uncertainty. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 40, p. 287–314, 2012.

CHERNYSHEV, A. D.; LISOVSKAYA, T. A.; LISOVSKIY, R. A. Comparative analysis of different electrical motor types as a traction drive part in electrical transmission. *In: IEEE*, maio 2017.

COLIN, Emerson Carlos. **Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

CONTRAN. **Resolução nº 396, de 13 de dezembro de 2011. Ministério dos Transportes**BrazilConselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), , 13 dez. 2011. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/resolucao_contran_396_11.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2025

COSTA, Helder Gomes. **Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão**. Niterói, RJ: Universidade Federal Fluminense, maio 2002.

DANA. **TM4® MOTIVE™ Integrated Motor / Inverter**. Disponível em: <<https://www.dana.com/globalassets/resource-library/light-vehicle/spec-sheets/spec-sheet-motive-1-en.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2025.

DANA TM4. **SRI 200 series Synchronous Reluctance / IPM Motor “Hybrid Motor”**. Disponível em: <<https://www.danatm4.com/wp-content/uploads/2022/10/TM4-SRI-200-onepager.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2024.

DANFOSS. **EM-PMI300-T310 Technical Data Sheet**. Disponível em: <<https://assets.danfoss.com/documents/latest/456959/AI269158260707en-000203.pdf>>. Acesso em: 5 fev. 2025.

DE OLIVEIRA NETO, Mario Santos. **Avaliação dos Critérios para a Seleção de Transportador e Modo de Transporte para o escoamento da Safra Agrícola de Grãos**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro, RJ: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009.

DEEPAK, Kritika *et al.* In-Wheel Motor Drive Systems for Electric Vehicles: State of the Art, Challenges, and Future Trends. **Energies** **2023**, Vol. 16, Page 3121, v. 16, n. 7, p. 3121, 29 mar. 2023.

DUAN, Xucheng; SCHOCKENHOFF, Ferdinand; KOCH, Alexander. Implementation of Driving Cycles Based on Driving Style Characteristics of Autonomous Vehicles. **World Electric Vehicle Journal**, v. 13, n. 6, p. 108, 20 jun. 2022.

EDMONDSON, James. **The EV Market Doubles Down on Permanent Magnets Despite Material Costs**. Disponível em: <<https://www.idtechex.com/en/research-article/the-ev-market-doubles-down-on-permanent-magnets-despite-material-costs/28314>>. Acesso em: 13 dez. 2022.

EDMONDSON, James; SIDDIQI, Shazan. **Electric Motors for Electric Vehicles 2024-2034** IDTechEx. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.idtechex.com/en/research-report/electric-motors-for-electric-vehicles-2024-2034/941>>. Acesso em: 17 abr. 2025.

EHSANI, Mehrdad *et al.* **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles**. 3rd. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.

EHSANI, Mehrdad *et al.* State of the Art and Trends in Electric and Hybrid Electric Vehicles. **Proceedings of the IEEE**, v. 109, n. 6, p. 967–984, jun. 2021.

EKER, Mustafa; ZÖHRA, Berkan; AKAR, Mehmet. Experimental performance verification of radial and axial flux line start permanent magnet synchronous motors. **Electrical Engineering**, v. 106, n. 2, p. 1693–1704, 21 abr. 2024.

EL HADRAOUI, Hicham *et al.* A Multi-Criteria Analysis and Trends of Electric Motors for Electric Vehicles. **World Electric Vehicle Journal**, v. 13, n. 4, p. 65, 7 abr. 2022.

EL-REFAIE, Ayman; OSAMA, Mohamed. High specific power electrical machines: A system perspective. **CES Transactions on Electrical Machines and Systems**, v. 3, n. 1, p. 88–93, mar. 2019a.

EL-REFAIE, Ayman; OSAMA, Mohamed. High specific power electrical machines: A system perspective. **CES Transactions on Electrical Machines and Systems**, v. 3, n. 1, p. 88–93, mar. 2019b.

EMRAX. **Axial flux e-motors**. Disponível em: <<https://emrax.com/>>. Acesso em: 6 abr. 2025.

EPE. **Caderno de Eletromobilidade: Transporte Rodoviário. PDE 2034**. Rio de Janeiro: [S.n.]. Disponível em: <www.mme.gov.brwww.mme.gov.brwww.mme.gov.brwww.mme.gov.br>. Acesso em: 16 abr. 2025a.

EPE. **Nota Técnica de Demanda de Energia de Veículos Leves: 2025-2034**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br><http://www.mme.gov.br><http://www.mme.gov.br><http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 15 abr. 2025b.

FANNING, Paul. **IE5 and beyond**. Disponível em: <<https://www.eurekamagazine.co.uk/content/technology/ie5-and-beyond/>>. Acesso em: 5 mar. 2025.

FENABRAVE. **Emplacamentos**. Disponível em: <<https://www.fenabrave.org.br/portalv2/Conteudo/emplacamentos>>. Acesso em: 15 abr. 2025.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. Jr.; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas**. Tradução: Anatólio Laschuk. 7. ed. Porto Alegre: [S.n.].

FONTANIVE, Fernanda *et al.* Aplicação do Método de Análise Multicriterial AHP como Ferramenta de Apoio a Tomada de Decisão. **Revista Espacios**, 2017.

FRANCO, MATEUS MULLER *et al.* APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP NA TOMADA DE DECISÃO DO PROCESSO DE TERCEIRIZAÇÃO DE COMPONENTES USINADOS EM UMA EMPRESA MULTINACIONAL. *In*: 15 nov. 2017.

FUNDEP. **Fundep e CNPq firmam parceria para investimento em soluções para o setor automotivo**. Disponível em: <<https://www.gov.br/cnpq/pt-br/assuntos/noticias/cnpq-em-acao/fundep-e-cnpq-firmam-parceria-de-r-21-milhoes-para-investimento-em-solucoes-para-o-setor-automotivo>>. Acesso em: 3 out. 2022.

GENG, Weiwei *et al.* Comparative Study of Yokeless Stator Axial-Flux PM Machines Having Fractional Slot Concentrated and Integral Slot Distributed Windings for Electric Vehicle Traction Applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 70, n. 1, p. 155–166, jan. 2023.

GOMES, Luiz Flavio A. M.; GOMES, Carlos Francisco S. **Tomada de Decisão Gerencial: Enfoque Multicritério**. 4 ed. ed. São Paulo, SP: Editora Atlas, 2012.

GOMES, Luiz Flavio Autran Monteiro; GONZÁLEZ ARAYA, Marcela Cecilia; CARIGNANO, Claudia. **Tomada de decisões em cenários complexos: introdução aos métodos discretos do apoio multicritério à decisão**. 1. ed. ed. São Paulo, SP: Thomson, 2004.

GRAND VIEW RESEARCH. **Two Wheeler Hub Motor Market Trends**. Disponível em: <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/two-wheeler-hub-motor-market>>. Acesso em: 9 jul. 2025.

HASHEMNIA, Nasser; ASAEI, Behzad. Comparative Study of Using Different Electric Motors in the Electric Vehicles. *In: IEEE*, 2008.

HE, Tianran *et al.* **Permanent Magnet Machines for High-Speed Applications**. **World Electric Vehicle Journal**MDPI, , 1 jan. 2022.

HEIDARI, Hamidreza *et al.* A Review of Synchronous Reluctance Motor-Drive Advancements. **Sustainability**, v. 13, n. 2, p. 729, 13 jan. 2021.

HLINOVSKÝ, Tomáš. **Optimal Control of Mathematical Model of the Electrovehicle**. Master's Thesis—Praga: Czech Technical University in Prague, 2015.

HUSAIN, Iqbal *et al.* Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles. **Proceedings of the IEEE**, v. 109, n. 6, p. 1039–1059, jun. 2021.

HWANG, Ching-Lai; YOON, Kwangsun. Methods for Multiple Attribute Decision Making. *In: [S.l.: S.n.]*. p. 58–191.

HYUNDAI MOBIS. **Hyundai Mobis desenvolve o Sistema “In-wheel”, um motor elétrico dentro das roda**. Disponível em: <<https://hyundaimobis.com.br/en/hyundai-mobis-develops-the-in-wheel-system-an-electric-motor-inside-the-wheels/>>. Acesso em: 16 abr. 2025.

IBRAHIM, Muhammed A.; NASSER B. ALSAMMAK, A. Switched Reluctance Motor Drive Challenges - A review. **Al-Iraqia Journal of Scientific Engineering Research**, v. 2, n. 4, 18 dez. 2023.

IEA. **Global EV Outlook 2024 Moving towards increased affordability**. Paris: [S.n.]. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/a9e3544b-0b12-4e15-b407-65f5c8ce1b5f/GlobalEVO Outlook2024.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2025.

ISHIZAKA, Alessio; LABIB, Ashraf. Review of the main developments in the analytic hierarchy process. **Expert Systems with Applications**, maio 2011.

ISLAM, Md Khurshedul *et al.* Performance Comparison of Different Permanent Magnet Motors for Traction Applications. *In: IEEE*, 9 out. 2022.

JAGANATHAN, Srihari; ERINJERI, Jinson J.; KER, Jun-ing. Fuzzy analytic hierarchy process based group decision support system to select and evaluate new manufacturing technologies. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 32, n. 11–12, p. 1253–1262, 5 maio 2007.

JAHNS, Thomas. Getting Rare-Earth Magnets Out of EV Traction Machines: A review of the many approaches being pursued to minimize or eliminate rare-earth magnets from future EV drivetrains. **IEEE Electrification Magazine**, v. 5, n. 1, p. 6–18, mar. 2017.

KAHOURZADE, Solmaz *et al.* **A comprehensive review of axial-flux permanent-magnet machines**. **Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering** | IEEE Canada, , 2014.

KAHRAMAN, Cengiz. **Fuzzy Multi-Criteria Decision Making**. Boston, MA: Springer US, 2008. v. 16

KANG, Jae-Beom; LEE, Ji-Young; LEE, Ji-Heon. Guidelines for Determining the Initial Shape and Specifications of High-Speed AFPM Based on Recent Research. **Energies**, v. 15, n. 16, p. 6099, 22 ago. 2022.

KANNOJIA, Prashant; CHINMAYA, K. A. Comparative Review and Finite Element Analysis of Energy Efficient Motors. *In: IEEE*, 3 jan. 2023.

KARHALIOS, Hristos. The application of the AHP-TOPSIS for evaluating ballast water treatment systems by ship operators. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 52, p. 172–184, maio 2017.

KARIM, Rubayet; KARMAKER, C. L. Machine Selection by AHP and TOPSIS Methods. **American Journal of Industrial Engineering**, v. 4, n. 1, p. 7–13, 5 jan. 2016.

KARKI, Abhisek *et al.* Status of Pure Electric Vehicle Power Train Technology and Future Prospects. **Applied System Innovation**, v. 3, n. 3, p. 35, 17 ago. 2020.

KAYA, Tolga; KAHRAMAN, Cengiz. Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 6, p. 6577–6585, jun. 2011.

KHUDE, Jyotsna Tanaji; HARUN SHAIKH, Arbaj; UGALE, R. T. Comparative Analysis of 5 H.P SynRM And FeA-SynRM for EV Applications. *In: IEEE*, 27 set. 2024.

KILGOUR, D. Marc; CHEN, Ye; HIPEL, Keith W. Multiple Criteria Approaches to Group Decision and Negotiation. *In: [S.l.: S.n.]*. p. 317–338.

KIM, Hyo-Gu *et al.* Design Process of High-Power Density Hybrid Type Motor Using 3D Printing. **IEEE Access**, v. 13, p. 32072–32086, 31 jan. 2025.

KIM, Hyunwoo *et al.* Study on Line-Start Permanent Magnet Assistance Synchronous Reluctance Motor for Improving Efficiency and Power Factor. **Energies**, v. 13, n. 2, p. 384, 13 jan. 2020.

KNOBLOCH, Florian *et al.* Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time. **Nature Sustainability**, v. 3, n. 6, p. 437–447, 1 jun. 2020.

KOBLER, R. *et al.* Development of a compact and low cost axial flux machine using soft magnetic composite and hard ferrite. *In: IEEE*, jun. 2015.

KOLEHMAINEN, Jere. Synchronous Reluctance Motor With Form Blocked Rotor. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 25, n. 2, p. 450–456, jun. 2010.

KONG, Yong; LIN, Mingyao; JIA, Lun. A novel high power density permanent-magnet synchronous machine with wide speed range. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 56, n. 2, 1 fev. 2020.

KRINGS, Andreas; MONISSEN, Christian. Review and Trends in Electric Traction Motors for Battery Electric and Hybrid Vehicles. *In: IEEE*, 23 ago. 2020.

LAMMOTOR. **Do You Know Which Car Models Use Axial Flux Motor?** Disponível em: <<https://lammotor.com/which-car-models-use-axial-flux-motors/>>. Acesso em: 16 jul. 2025.

LIU, Yaohan *et al.* Multi-Criteria Decision-Making Framework (AHP-TOPSIS): Pavement Preventive Maintenance Case Study for Ordinary National Trunk Highways. **Buildings**, v. 14, n. 10, 1 out. 2024.

LOKEN, E. Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 7, p. 1584–1595, set. 2007.

LU, Yang *et al.* Comparative Study on Vibration Behaviors of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machines With Different Rotor Topologies. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 57, n. 2, p. 1420–1428, mar. 2021.

MAHLE. **Complete power for your vehicle.** Disponível em: <<https://www.mahle.com/en/products-and-services/passenger-cars/mechatronics/electric-drive-systems/>>. Acesso em: 25 mar. 2025.

MEDEIROS, Antônio Marcos de Melo *et al.* Projeção do impacto de veículos elétricos na geração de energia no brasil. **CEEL - ISSN 2596-2221**, p. 2–2, nov. 2019.

MENON, Rakesh R.; RAVI, V. Using AHP-TOPSIS methodologies in the selection of sustainable suppliers in an electronics supply chain. **Cleaner Materials**, v. 5, p. 100130, 1 set. 2022.

MLOT, Adrian; LUKANISZYN, Marian. Analysis of axial flux motor performance for traction motor applications. **COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering**, v. 38, n. 4, p. 1306–1322, 1 jul. 2019.

MOGHADDAM, Reza Rajabi *et al.* Different traction motor topologies used in E-mobility: Part II: Magnet-based solutions. *In*: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 23 ago. 2020.

MOHAMMED, Thura J. *et al.* Convalescent-plasma-transfusion intelligent framework for rescuing COVID-19 patients across centralised/decentralised telemedicine hospitals based on AHP-group TOPSIS and matching component. **Applied Intelligence**, v. 51, n. 5, p. 2956–2987, 22 maio 2021.

MRAD, Andre *et al.* 3D Finite Difference Model of the Open Circuit Field of Permanent Magnet Spoke Type Axial Flux Machines. p. 1–6, 2021.

MURATALIYEV, Mukhammed *et al.* Synchronous Reluctance Machines: A Comprehensive Review and Technology Comparison. **Proceedings of the IEEE**, v. 110, n. 3, p. 382–399, mar. 2022.

MUSSOI, Fernando Luiz Rosa. **Modelo de Decisão Integrado para a Priorização Multiestágio de Projetos de Distribuição Considerando a Qualidade da Energia Elétrica**. Tese de Doutorado—Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 5 mar. 2013.

NALLEY, Stephen; LAROSE, Angelina. **International Energy Outlook 2021 (IEO2021)**. Washington, DC: [S.n.]. Disponível em: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/IEO2021_ReleasePresentation.pdf>.

NEETHU, S. *et al.* Radial-and Axial-Flux Synchronous Motors for High-Speed Low-Power Applications. *In*: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2 jul. 2018.

OZTAYSI, Basar. A decision model for information technology selection using AHP integrated TOPSIS-Grey: The case of content management systems. **Knowledge-Based Systems**, v. 70, p. 44–54, nov. 2014.

PARKER. **GVM Global Vehicle Motor Power Series Permanent Magnet (PMAC). Motor for Mobile Systems**. Disponível em: <https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Electromechanical-Europe/Literature/192_300125_GVM_catalog_EU.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2025.

PASSOS, Anderson Campos. **Definição de um Índice de Qualidade para Distribuidoras de Energia Elétrica Utilizando o Apoio Multicritério à Decisão e Análise de Séries Temporais**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro, RJ: Pontifícia Universidades Católica do Rio de Janeiro, 29 out. 2010.

PATIL, Mayuri S.; DHAMAL, S. S. A Detailed Motor Selection for Electric Vehicle Traction System. *In*: IEEE, dez. 2019.

PEGETTI, Ana Lucia. **Aplicação de mapas cognitivos e método AHP para a seleção de fornecedores em instituição de ensino superior**. Dissertação de Mestrado—São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 12 ago. 2014.

PEINADO, H. S. *et al.* **Método AHP para tomada de decisão multicritério**. Coleção Fundamentum ed. Maringá-PR: EDUEM, 2016.

PNME. **3º Anuário Brasileiro da Mobilidade Elétrica**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://pnme.org.br/wp-content/uploads/2023/12/3o-Anuario-Brasileiro-de-Mobilidade-Elétrica.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2025.

POMEROL, Jean-Charles; BARBA-ROMERO, Sergio. **Multicriterion Decision in Management: Principles and Patrice**. 1 ed ed. Massachusetts: Editora Kluwer, 1993.

POP, Adrian Augustin *et al.* Electromagnetic torque capabilities of axial-flux and radial-flux permanent-magnet machines. *In: IEEE*, out. 2013.

PRASAD, Shana Lakshmi; GUDIPALLI, Abhishek. An effective range estimation and state-of-charge to mitigate range anxiety in electric vehicles. **Heliyon**, v. 11, n. 1, p. e41494, jan. 2025.

QUIROGA, Tony. **Tested: 2014 Ferrari LaFerrari Is Hellaciously Quick**. Disponível em: <<https://www.caranddriver.com/reviews/a15107243/ferrari-laFerrari-hypercar-tested-review/>>. Acesso em: 13 jul. 2025.

RADU, Raluca *et al.* Electrical Machines for Mobile Charging Station Propulsion Systems – Comparative Study. *In: IEEE*, mar. 2019.

RAGSDALE, Cliff T. **Spreadsheet Modeling & Decision Analysis: A Practical Introduction to Management Science**. 4. ed. [S.l.]: Thomson/South-Western, 2004.

RAMESH, P.; LENIN, N. C. High Power Density Electrical Machines for Electric Vehicles—Comprehensive Review Based on Material Technology. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 55, n. 11, p. 1–21, nov. 2019.

RAMÍREZ LÓPEZ, Sergio. **Escolha de uma metodologia de cálculo da pegada de carbono de serviços de distribuição urbana: aplicação do método híbrido AHP-TOPSIS**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro-RJ: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 31 mar. 2017.

RAO, Ravipudi Venkata. **Decision Making in the Manufacturing Environment: Using Graph Theory and Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods**. London: Springer London, 2007.

RAWSUN. **EV Motors**. Disponível em: <<https://www.rawsuns.com/ev-motor/>>. Acesso em: 25 mar. 2025.

RIBA, Jordi-Roger *et al.* Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 367–379, maio 2016.

RIBEIRO, Livia de Souza; PASSOS, Aderson Campos; TEIXEIRA, Marcello Goulart. Seleção de tecnologias de comunicações no exército brasileiro utilizando os métodos multicritério de análise hierárquica, TODIM e software Sapiens. **Production**, v. 22, n. 1, p. 132–141, 10 nov. 2011.

RICARDO. **Ricardo completes the development of novel, rare earth and copper free, electric propulsion motor.** Disponível em: <<https://www.ricardo.com/en/news-and-insights/press-releases/2025/ricardo-completes-the-development-of-novel-rare-earth-and-copper-free-electric-propulsion-motor>>. Acesso em: 3 abr. 2025.

RIND, Saqib Jamshed *et al.* Configurations and control of traction motors for electric vehicles: A review. **Chinese Journal of Electrical Engineering**, v. 3, n. 3, p. 1–17, dez. 2017.

RIVAS, René Ernesto García. **Uso do método multicritério para tomada de decisão operacional tendo em conta riscos operacionais, à segurança, ambientais e à qualidade.** Dissertação de Mestrado—Salvador, BA: Universidade Federal da Bahia, 2016.

RODRÍGUEZ-PÉREZ, Angel Mariano *et al.* Power and Performance the Water Lifting Machines Used in Ancient Mining in the Southwest of the Iberian Peninsula. *In: [S.l.: S.n.]*. p. 184–196.

SAATY, Thomas L. The Analytic Hierarchy Process: Decision Making in Complex Environments. *In: Quantitative Assessment in Arms Control*. Boston, MA: Springer US, 1984. p. 285–308.

SAATY, Thomas L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9–26, set. 1990.

SAATY, Thomas L. **Método de Análise Hierárquica.** 3 ed. ed. São Paulo-SP: Makron Books do Brasil Editora Ltda. Editora McGraw-Hill do Brasil, 1991.

SAATY, Thomas L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. **Interfaces**, v. 24, n. 6, p. 19–43, dez. 1994.

SAATY, Thomas L. The Analytic Network Process: Decision Making with Dependence and Feedback. **Encyclopedia of Operations Research and Management Science**, p. 28–35, 2001.

SAIETTA GROUP. **Electric Drive Technology - Applications**. Disponível em: <<https://www.saietta.com/applications/>>. Acesso em: 6 abr. 2025.

SANJARBEK, Ruzimov; MAVLONOV, Jamshid; MUKHITDINOV, Akmal. Analysis of the Powertrain Component Size of Electrified Vehicles Commercially Available on the Market. **Communications - Scientific letters of the University of Zilina**, v. 24, n. 1, p. B74–B86, 1 jan. 2022.

SHAO, Lingyun *et al.* Design Approaches and Control Strategies for Energy-Efficient Electric Machines for Electric Vehicles—A Review. **IEEE Access**, v. 8, p. 116900–116913, 2020.

SHAO, Lingyun *et al.* Design and Construction of Axial-Flux Permanent Magnet Motors for Electric Propulsion Applications—A Review. **IEEE Access**, v. 9, p. 158998–159017, 2021.

SHIH, Hsu-Shih; SHYUR, Huan-Jyh; LEE, E. Stanley. An extension of TOPSIS for group decision making. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 45, n. 7–8, p. 801–813, abr. 2007.

SHIMIZU, Tamio. **Decisão nas organizações**. 3. ed. ed. [S.l.]: Atlas, 2010.

SILVA, Diva Martins Rosas e. **Aplicação do Método AHP para Avaliação de Projetos Industriais**. Dissertação de Mestrado—[S.l.]: PUC-Rio, 14 mar. 2007.

SILVA, Flavia Cristina *et al.* Perspectiva de aplicação do método Analytic Hierarchy Process no cenário brasileiro de pesquisa. **Revista Organizações em Contexto**, v. 16, n. 32, p. 95–124, 29 dez. 2020.

SINDHU, Sonal; NEHRA, Vijay; LUTHRA, Sunil. Investigation of feasibility study of solar farms deployment using hybrid AHP-TOPSIS analysis: Case study of India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 496–511, jun. 2017.

SOARES, Fabiano Campos. **Priorização de Processos de Gestão Através dos Métodos SMARTER e TOPSIS**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro, RJ: Centro Universitário IBMEC, 12 set. 2018.

SON, Ji-Chang *et al.* Optimal Design of PMA-SynRM for Electric Vehicles Exploiting Adaptive-Sampling Kriging Algorithm. **IEEE Access**, v. 9, p. 41174–41183, 2021.

SOUZA, Lorena Mendes de. **O Mercado Brasileiro de Bioquerosene de Aviação: Mapeamento Multicritério para Seleção de Oleaginosas para o Processo HEFA**. Tese de Doutorado—Rio de Janeiro, RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2019.

TAGHAVI, Seyedmorteza; PILLAY, Pragasen. A comparative study of synchronous reluctance machine performance with different pole numbers for automotive applications. *In: IEEE*, out. 2014.

TAGLIARI, Leandro Dóro. **Avaliação do desempenho em sustentabilidade utilizado em processos de manufatura**. Tese de Doutorado—Passo Fundo, RS: Universidade de Passo Fundo, 2020.

TORTORELLA, Guilherme L.; FOGLIATTO, Flávio S. Planejamento sistemático de layout com apoio de análise de decisão multicritério. **Production**, v. 18, n. 3, p. 609–624, dez. 2008.

TRAXIAL. **Traxial's Technology – Yokeless axial flux motor**. Disponível em: <<https://traxial.com/technology/>>. Acesso em: 6 abr. 2025.

TSAUR, Ruey-Chyn. Decision risk analysis for an interval TOPSIS method. **Applied Mathematics and Computation**, v. 218, n. 8, p. 4295–4304, dez. 2011.

TYAGI, Mohit; KUMAR, Pradeep; KUMAR, Dinesh. A Hybrid Approach using AHP-TOPSIS for Analyzing e-SCM Performance. **Procedia Engineering**, v. 97, p. 2195–2203, 1 jan. 2014.

TZENG, Gwo-Hshiung; HUANG, Jih-Jeng. **Multiple Attribute Decision Making**. [S.l.]: Chapman and Hall/CRC, 2011.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects 2024: Summary of Results**. New York: United Nations: [S.n.].

VARGAS, Ricardo Viana. Utilizando a programação multicritério (Analytic Hierarchy Process-AHP) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio. *In: Washington – DC – EUA*: 2010.

VELAYUDHAM, Malarselvam; CAROUNAGARANE, Carunaiselvane. Energy Efficient Analysis of Electric Vehicle Motor under Drive Cycle Influence. *In: IEEE*, 17 dez. 2023.

VERGE MOTORCYCLES. **Verge Motorcycles**. Disponível em: <<https://www.vergemotorcycles.com/>>. Acesso em: 9 jul. 2025.

WANG, Wei; CHEN, Xinbo; WANG, Junmin. Motor/Generator Applications in Electrified Vehicle Chassis—A Survey. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, v. 5, n. 3, p. 584–601, set. 2019.

WANG, Youhua *et al.* Development of a High-Performance Axial Flux PM Machine With SMC Cores for Electric Vehicle Application. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 55, n. 7, p. 1–4, jul. 2019.

WIDMER, James D.; MARTIN, Richard; KIMIABEIGI, Mohammed. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 3, p. 7–13, abr. 2015.

WOLFF, CRISTINA SANTOS. **O MÉTODO AHP - REVISÃO CONCEITUAL E PROPOSTA DE SIMPLIFICAÇÃO**. Rio de Janeiro, Brazil: PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, 24 abr. 2008.

WON, Hoyun *et al.* Roles of coercivity and remanent flux density of permanent magnet in interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) performance for electric vehicle applications. **AIP Advances**, v. 8, n. 5, p. 056811, maio 2018.

WU, Gongping *et al.* Robust Predictive Torque Control of N*3-Phase PMSM for High-Power Traction Application. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 35, n. 10, p. 10799–10809, 1 out. 2020.

WU, Wenye *et al.* Design and analysis of a hybrid permanent magnet assisted synchronous reluctance motor considering magnetic saliency and PM usage. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 28, n. 3, 1 abr. 2018.

XU, Jiuping; WU, Zhibin; ZHANG, Yuan. A Consensus Based Method for Multi-criteria Group Decision Making Under Uncertain Linguistic Setting. **Group Decision and Negotiation**, v. 23, n. 1, p. 127–148, 19 jan. 2014.

XUE, X. D.; CHENG, K. W. E.; CHEUNG, N. C. Selection of Electric Motor Drives for Electric Vehicles. **Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'08)**, p. 1–6, 2008.

YADAV, Dharmendra Singh; MANISHA, Manisha. Electric Propulsion Motors: A Comparative Review for Electric and Hybrid Electric Vehicles. *In*: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022.

YANG, Gongde *et al.* Flux-Weakening Control Combined With Magnetization State Manipulation of Hybrid Permanent Magnet Axial Field Flux-Switching Memory Machine. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 33, n. 4, p. 2210–2219, 1 dez. 2018.

YANG, Zhi *et al.* Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for EV and HEV applications. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, v. 1, n. 3, p. 245–254, 1 out. 2015.

YASA. **Our Mission Is To Accelerate Electrification**. Disponível em: <<https://yasa.com/about/>>. Acesso em: 6 abr. 2025.

YILMAZ, Murat. Limitations/capabilities of electric machine technologies and modeling approaches for electric motor design and analysis in plug-in electric vehicle applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 80–99, dez. 2015.

ZERAOULIA, Mounir; BENBOUZID, Mohamed El Hachemi; DIALLO, Demba. Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 55, n. 6, p. 1756–1764, nov. 2006.

ZF. **CeTrax - Electric Central Drive**. Disponível em: <https://www.zf.com/products/en/special_vehicles/products_64419.html>. Acesso em: 24 mar. 2025.

ZHAO, Jing; LI, Bin; GU, Zhongxin. Research on an Axial Flux PMSM with Radially Sliding Permanent Magnets. **Energies**, v. 8, n. 3, p. 1663–1684, 27 fev. 2015.

ZHU, Z. Q.; CHU, W. Q.; GUAN, Y. Quantitative comparison of electromagnetic performance of electrical machines for HEVs/EVs. **IEEE Transactions on Electrical Machines and Systems**, v. 1, n. 1, p. 37–47, mar. 2017.

ZHU, Z. Q.; HOWE, David. Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. **Proceedings of the IEEE**, v. 95, n. 4, p. 746–765, abr. 2007.

APÊNDICE A – METAS DE ELETRIFICAÇÃO DAS PRINCIPAIS MONTADORAS

A Tabela A1 apresenta as metas de eletrificação estabelecidas por algumas das principais montadoras globais, conforme dados do relatório IEA (2024). Essas metas refletem o compromisso crescente da indústria automotiva com a transição energética e a descarbonização do setor de transportes.

Tabela A1 – Metas de eletrificação das principais montadoras

Fabricante	Meta	Região
Volkswagen	Aumento da meta de entrega de BEV de 50% para 55% em 2030	EUA
Volkswagen	Aumento da meta de entrega de BEV de 70% para 80% em 2030	Europa
Ampere	Meta de 300 mil veículos BEV vendidos em 2025 e 1 milhão em 2031	Europa
Togg	Visa a entrega de 1 milhão de carros elétricos até 2030	Europa
Toyota	Aumento da meta de produção para 20% de veículos elétricos até 2026	Europa
Nissan	Meta de vendas anunciada de 100% para veículos BEV a partir de 2030	Europa
Suzuki	Estratégia de alcance de 80% de participação de BEV nas vendas em 2030	Europa
Suzuki	Estratégia de alcance de 15% de participação de BEV nas vendas em 2030	Índia
Suzuki	Estratégia de alcance de 20% de participação de BEV nas vendas em 2030	Japão
Subaru	Anunciou meta mais ambiciosa de 50% de vendas de BEVs em 2030	Global
Hyundai	Aumentou a meta de vendas anual para 2 milhões de veículos elétricos até 2030	Global
Kia	Aumento da meta de vendas de veículos elétricos de 2030 para 1,6 milhões	Global
Tata	Estratégia anunciada de vendas de 50% de veículos elétricos até 2030	Global
SAIC	Aumento de 40% para 50% na meta de vendas de veículos com emissão zero até 2025	Global
Geely	Aumento de 40% para 50% na meta de vendas de veículos com emissão zero até 2025	Global

Fonte: adaptado de IEA (2024).

A pesquisa da Agência Internacional de Energia (IEA) foi realizada com base nos anúncios públicos divulgados pelas montadoras. O relatório ainda destaca que:

- As dez maiores fabricantes, responsáveis por mais de 40 milhões de veículos vendidos em 2023, definiram metas ambiciosas de eletrificação para 2030.
- Mais de 20 montadoras (90% das vendas de 2023) anunciaram metas que indicam uma participação de até 58% de veículos elétricos até 2030.
- Diversas fabricantes também anunciaram a eliminação gradual de veículos com motor a combustão interna, com destaque para Ford, Volkswagen, Stellantis, Lancia, Renault e Nissan, especificamente no mercado europeu.

APÊNDICE B – TOPOLOGIAS ADOTADAS EM VEs COMERCIAIS

Tabela A2 – Motores de tração adotados em aplicações de VE e VEH

Ano	Marca	Modelo	Potência de Pico (kW)	Topologia
2025	Aston Martin	Valhalla	182 (potência total)	PMSM (dianteiros) e AFPM (traseiro)
2025	Lamborghini	Temerário	110 cada motor	AFPM (3 motores YASA)
2024	Koenigsegg	Gemera	600	AFPM
2023	Mercedes-Benz	Vision One-Eleven	353 cada motor	AFPM (4 motores YASA)
2021	McLaren	Artura	70	AFPM
2019	Ferrari	SF90 Stradale	99 (PMSM) e 150 (AFPM)	PMSM (dianteiros) e AFPM (traseiro)
2014	Audi	A3 e-tron	150	IM
2014	Citroën	Berlingo	49	PMSM
2014	Citroën	Berlingo	49	PMSM
2014	Ferrari	LaFerrari	118	PMSM
2014	Kia	Soul EV	81,4	PMSM
2013	Mahindra	e2o	19	IM
2013	Mercedes-Benz	B-Class Electric Drive	130	IM
2013	Volkswagen	e-Up	60	PMSM
2012	Renault	Twizy	13	IM
2012	Roewe	E50	52	PMSM
2012	Smart	Fortwo ED	55	PMSM
2012	Tesla	Model S	215	IM
2012	Hyundai	Blue ON	212	PMSM
2011	Bolloré	Bluecar	50	PMSM
2011	Ford	Focus Electric	110	IM
2011	Volvo	C30 DRIVE	89	PMSM
2011	Tata Motors	Indica Vista EV	55	PMSM
2011	Ford	Turneo Connect EV	50	IM
2011	REVA	NXR	13	IM
2011	Fiat	Doblo	43	IM
2011	Peugeot	iOn	35	PMSM
2011	Fiat	Doblo	43	IM
2010	BYD	F3M	125	PMSM
2010	Ford	Transit Connect EV	50	IM
2010	Mercedes-Benz	Vito E-Cell	60	PMSM
2010	Toyota	Prius	60	PMSM
2009	BYD	e6	115	PMSM
2009	Citroën	C-Zero	49	PMSM
2009	Mitsubishi	i-MiEV	47	PMSM

(continuação)

Ano	Marca	Modelo	Potência de Pico (kW)	Topologia
2009	Citroën	iOn	49	PMSM
2009	Tazzari	Zero	15	IM
2008	Tesla	Roadster	215	IM
2008	Reva Electric Car	REVAi	13	IM
2007	AC Propulsion	eBox	150	IM
1999	Ford	Ranger EV	67	IM
1999	Peugeot	Partner	28	DC
1998	Fiat	Panda Elettra	9,2	DC
1998	Toyota	RAV4 EV	50	IM
1997	Chevrolet	S-10	85	IM
1997	Nissan	Altra	62	PMSM
1997	Honda	EV Plus	49	DC
1996	GM	EV-1	102	IM
1992	Ford	Ecostar	56	IM
1992	Bertone	Blitz	52	DC

Fonte: elaborado pela autora com base em Hlinovský (2015), Quiroga (2015), Ramesh e Lenin (2019), Husain *et al.* (2021), El Hadraoui *et al.* (2022) e Lammotor (2025).

A Tabela A2 apresenta os motores de tração adotados em aplicações comerciais de veículos elétricos (VE) e veículos híbridos (VEH), considerando o ano de lançamento dos modelos. Embora alguns exemplos mais antigos estejam fora de linha, muitos permanecem em produção ou marcaram a introdução de topologias relevantes, o que justifica sua inclusão. Além disso, foram acrescentados modelos recentes (2019–2025), que ilustram a evolução tecnológica e a incorporação de arquiteturas híbridas e de motores de fluxo axial em veículos de alto desempenho.

APÊNDICE C – QUESTIONÁRIOS DE COLETA DE DADOS

Este apêndice apresenta o modelo de questionário utilizado para a comparação par a par entre os critérios, com base na escala fundamental de Saaty, Quadro 2. As comparações foram realizadas individualmente para cada cenário de aplicação: veículos leves, veículos pesados e aplicações *in-wheel*.

Para cada par de critérios, considerou-se o questionamento: “*Para o cenário analisado, qual a importância do critério X em relação ao critério Y?*”.

Comparação entre os critérios elencados (C1 a C7) para o cenário de Veículos Leves.

Critério de Priorização X	Intensidade de Importância																Critério de Priorização Y	
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8		9
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Fator de potência (C2)
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Operação com enfraquecimento de campo (C4)
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Custo de fabricação (C5)
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Densidade de potência (C6)
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)
Fator de potência (C2)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)
Fator de potência (C2)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Operação com enfraquecimento de campo (C4)
Fator de potência (C2)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Custo de fabricação (C5)
Fator de potência (C2)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Densidade de potência (C6)

(continuação)

Fator de potência (C2)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)
Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Operação com enfraquecimento de campo (C4)
Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Custo de fabricação (C5)
Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Densidade de potência (C6)
Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)
Operação com enfraquecimento de campo (C4)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Custo de fabricação (C5)
Operação com enfraquecimento de campo (C4)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Densidade de potência (C6)
Operação com enfraquecimento de campo (C4)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)
Custo de fabricação (C5)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Densidade de potência (C6)
Custo de fabricação (C5)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)
Densidade de potência (C6)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)

Para o cenário de Veículos Pesados, qual a importância do critério X em relação ao critério Y?

Critério de Priorização X	Intensidade de Importância																Critério de Priorização Y	
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Fator de potência (C2)
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Operação com enfraquecimento de campo (C4)
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Custo de fabricação (C5)
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Densidade de potência (C6)

(continuação)

Critério de Priorização X	Intensidade de Importância																	Critério de Priorização Y
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)
Fator de potência (C2)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)
Fator de potência (C2)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Operação com enfraquecimento de campo (C4)
Fator de potência (C2)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Custo de fabricação (C5)
Fator de potência (C2)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Densidade de potência (C6)
Fator de potência (C2)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)
Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Operação com enfraquecimento de campo (C4)
Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Custo de fabricação (C5)
Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Densidade de potência (C6)
Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)
Operação com enfraquecimento de campo (C4)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Custo de fabricação (C5)
Operação com enfraquecimento de campo (C4)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Densidade de potência (C6)
Operação com enfraquecimento de campo (C4)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)
Custo de fabricação (C5)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Densidade de potência (C6)
Custo de fabricação (C5)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)
Densidade de potência (C6)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)

Para o a aplicação in-wheel, qual a importância do critério X em relação ao critério Y?

Critério de Priorização X	Intensidade de Importância																Critério de Priorização Y	
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8		9
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Fator de potência (C2)
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Operação com enfraquecimento de campo (C4)
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Custo de fabricação (C5)
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Densidade de potência (C6)
Rendimento nominal (C1)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)
Fator de potência (C2)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)
Fator de potência (C2)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Operação com enfraquecimento de campo (C4)
Fator de potência (C2)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Custo de fabricação (C5)
Fator de potência (C2)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Densidade de potência (C6)
Fator de potência (C2)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)
Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Operação com enfraquecimento de campo (C4)
Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Custo de fabricação (C5)
Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Densidade de potência (C6)
Ausência de ímãs permanentes de terras raras (C3)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)
Operação com enfraquecimento de campo (C4)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Custo de fabricação (C5)
Operação com enfraquecimento de campo (C4)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Densidade de potência (C6)

(continuação)

Critério de Priorização X	Intensidade de Importância																	Critério de Priorização Y
Operação com enfraquecimento de campo (C4)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)
Custo de fabricação (C5)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Densidade de potência (C6)
Custo de fabricação (C5)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)
Densidade de potência (C6)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Baixa ondulação de conjugado (C7)

APÊNDICE D – DESEMPENHO DAS ALTERNATIVAS

Tabela D1 – Resumo da literatura para o critério Rendimento (C1)

Id.	Referência	Unidade/Escala	IM	SynRM	PMSM	PMa-SynRM	AFPM	Artigo	Comentários
1	(EKER; ZÖHRA; AKAR, 2024)	[%]	-	-	91,02	-	92,92	Periódico	Projeto analítico e simulação (FEM), com validação experimental
2	(GENG <i>et al.</i> , 2023)	[%]	-	-	-	-	97,8	Periódico	Estudo comparativo (experimental X simulações)
3	(YADAV; MANISHA, 2022)	[1-10]	7	-	10	-	-	Conferência	Análise comparativa (simulados no MATLAB/SIMULINK)
4	(ISLAM <i>et al.</i> , 2022)	[%]	-	-	-	94,7	95,9	Conferência	Comparação PMa-SynRMs e AFPMs (FEA e experimentos)
5	(EHSANI <i>et al.</i> , 2021)	[%]	90	-	97	-	-	Convidado	Revisão Estado da Arte
6	(SHAO <i>et al.</i> , 2021)	[1-3]	-	-	-	-	3	Periódico	Projeto e construção AFPM
7	(KARKI <i>et al.</i> , 2020)	[1-5]	3	-	4,5	-	-	Periódico	Análise de revisão bibliográfica técnica
8	(KIM <i>et al.</i> , 2020)	[%]	91,13	-	-	92,69	-	Periódico	Simulação por elementos finitos (FEA), com validação experimental em protótipo
9	(MOGHADDAM <i>et al.</i> , 2020)	[1-5] (%)	2 (93%)	3 (94%)	5 (96,7)	5 (95,7)	-	Conferência	Estudo comparativo (FEA)
10	(SHAO <i>et al.</i> , 2020)	[%]	95	-	97	-	96	Periódico	Estudo de revisão, abordagem de projeto
11	(WANG; CHEN; WANG, 2019)	[1-5]	3,5	-	5	-	-	Periódico	Pesquisa (discussões comparativas)
12	(RADU <i>et al.</i> , 2019)	[%]	89,1	90	95,58	-	-	Conferência	Estudo comparativo (Maxwell Electromagnetics)
13	(EL-REFAIE; OSAMA, 2019B)	[%]	-	-	97	-	95	Periódico	Revisão abrangente e detalhada

(continuação)

Id.	Referência	Unidade/Escala	IM	SynRM	PMSM	PMa-SynRM	AFPM	Artigo	Comentários
14	(BOSTANCI <i>et al.</i> , 2017)	[1-10]	5	6	10	8	-	Periódico	Estudo comparativo abrangente e detalhado (FEM)
15	(RIND <i>et al.</i> , 2017)	[1-5]	4	-	5	-	-	Periódico	Estudo de revisão
16	(YANG <i>et al.</i> , 2015)	[%]	96,83	-	97,23	-	-	Periódico	Estudo comparativo (simulação FEA)
17	(BUYUKDEGIRMENCI; BAZZI; KREIN, 2014)	[%]	93,5	-	95	-	-	Periódico	Estudo comparativo (IMs e IPMSMs) no MATLAB
18	(ZERAOUZIA; BENBOUZID; DIALLO, 2006)	[1-5]	3,5	5	-	-	-	Periódico	Estudo comparativo (revisão exaustiva do estado da arte)

Fonte: elaborado pela autora (2025).

$$\text{Posição na matriz de desempenho das alternativas para o critério Rendimento (C1)} = \begin{pmatrix} a_{11} = 5 \\ a_{21} = 6 \\ a_{31} = 10 \\ a_{41} = 8 \\ a_{51} = 10 \end{pmatrix}.$$

A atribuição dos valores na matriz de desempenho para o critério C1 foi realizada a partir da consolidação dos resultados apresentados na Tabela D1, que reúne estudos comparativos provenientes de periódicos, conferências e revisões da literatura. Assim, a IM foi posicionada com valor 5, a SynRM com 6, a PMSM com 10, a PMa-SynRM com 8 e a AFPM também com 10, refletindo as evidências mais consistentes e recentes da literatura, respeitando tanto a confiabilidade das fontes quanto a recorrência dos resultados.

Tabela D2 – Resumo da literatura para o critério Fator de Potência (C2)

Id.	Referência	Unidade/Escala	IM	SynRM	PMSM	PMa-SynRM	AFPM	Artigo	Comentários
1	(EKER; ZÖHRA; AKAR, 2024)	máx=1	-	-	0,936	-	0,971	Periódico	Projeto analítico e simulação (FEM), com validação experimental
2	(GENG <i>et al.</i> , 2023)	máx=1	-	-	-	-	0,93	Periódico	Estudo comparativo (experimental X simulações)
3	(ISLAM <i>et al.</i> , 2022)	máx=1	-	-	-	0,94	0,98	Conferência	Comparação PMA-SynRMs e AFPMS (FEA e experimentos)
4	(KIM <i>et al.</i> , 2020)	-	74,5	-	-	71,2	-	Periódico	Simulação por elementos finitos (FEA), com validação experimental em protótipo
5	(MOGHADDAM <i>et al.</i> , 2020)	[1-5] (%)	3 (0,87)	2 (0,69)	5 (0,92)	5 (0,87)	-	Conferência	Estudo comparativo (FEA)
6	(RADU <i>et al.</i> , 2019)	máx=1	0,78	0,54	0,956	-	-	Conferência	Estudo comparativo (Maxwell Electromagnetics)
7	(BOSTANCI <i>et al.</i> , 2017)	[1-10] (%)	7 (0,76)	6 (0,70)	9 (0,9)	9 (0,91)	-	Periódico	Estudo comparativo abrangente e detalhado (FEM)

Fonte: elaborado pela autora (2025).

$$\text{Posição na matriz de desempenho das alternativas para o critério Fator de Potência (C2)} = \begin{pmatrix} a_{12} = 7 \\ a_{22} = 6 \\ a_{32} = 9 \\ a_{42} = 9 \\ a_{52} = 9 \end{pmatrix}.$$

As notas atribuídas para o critério C2 foram fundamentadas em dados comparativos que demonstram a eficiência de cada topologia na conversão de energia. As alternativas PMSM, PMA-SynRM e AFPM receberam nota 9, refletindo valores elevados de fator de potência. A alternativa IM foi avaliada com nota 7, apresentando desempenho satisfatório, embora ligeiramente inferior aos modelos síncronos com ímãs. Já a alternativa SynRM obteve nota 6, indicando fator de potência mais limitado, conforme observado por Moghaddam *et al.* (2020) e Radu *et al.* (2019), o que é característico dos motores síncronos de relutância sem o uso de ímãs.

Tabela D3 – Referências da literatura para o critério Ausência de Ímãs Permanentes de Terras Raras (C3)

Id.	Referência	Topologia	Característica	Justificativa/Observações
1	(MURATALIYEV <i>et al.</i> , 2022)	SynRM	Não utiliza ímãs permanentes	Alternativa promissora de alta eficiência sem ímãs
2	(SHAO <i>et al.</i> , 2020)	PMSM	Depende de ímãs permanentes, frequentemente de terras raras, para alta performance	Uso de terras raras garante alta eficiência e densidade de potência
3	(MOGHADDAM <i>et al.</i> , 2020)	PMa-SynRM	Usa ímãs permanentes, mas em menor quantidade ou de materiais alternativos	Pode empregar ímãs de ferrite ou menor quantidade de terras raras
4	(EL-REFAIE; OSAMA, 2019B)	AFPM	Geralmente utiliza grande quantidade de ímãs permanentes para alta performance	Maior quantidade de material magnético para obter densidade de torque elevada
5	(WIDMER; MARTIN; KIMIABEIGI, 2015)	IM	Não utiliza ímãs permanentes, portanto, não contém terras raras	Tecnologia robusta e madura, sem dependência de materiais críticos

Fonte: elaborado pela autora (2025).

Posição na matriz de desempenho das alternativas para o critério Ausência de Ímãs Permanentes de Terras Raras (C3) = $\begin{pmatrix} a_{13} = 10 \\ a_{23} = 10 \\ a_{33} = 2 \\ a_{43} = 3 \\ a_{53} = 1 \end{pmatrix}$.

As notas atribuídas na matriz de desempenho para o critério C3 refletem a dependência de cada topologia em relação a esses materiais críticos, conforme indicado na literatura. As máquinas do tipo SynRM e IM receberam nota máxima (10), pois não utilizam ímãs permanentes em sua construção, o que elimina a necessidade de terras raras e representa uma vantagem estratégica em termos de custo, sustentabilidade e segurança quanto ao suprimento de matéria prima. Em contraste, as topologias PMSM e AFPM dependem fortemente do uso desses materiais para alcançar alta densidade de potência e desempenho, justificando as notas mais baixas (2 e 1, respectivamente). A topologia PMa-SynRM, embora ainda utilize ímãs, apresenta um potencial de redução significativa no uso de terras raras ao empregar ferrite ou outros materiais alternativos, o que justifica a nota intermediária (3), destacando seu equilíbrio entre desempenho e redução da dependência de recursos críticos.

Tabela D4 – Resumo da literatura para o critério Ampla Faixa de Operação com Enfraquecimento de Campo (C4)

Id.	Referência	Unidade/Escala	IM	SynRM	PMSM	PMa-SynRM	AFPM	Artigo	Comentários
1	(MOGHADDAM <i>et al.</i> , 2020)	[1-5]	3	2	4	5	-	Conferência	Estudo comparativo (FEA)
2	(BOSTANCI <i>et al.</i> , 2017)	[1-10]	8	8	6	6	-	Periódico	Estudo comparativo abrangente e detalhado (FEM)

Fonte: elaborado pela autora (2025).

Posição na matriz de desempenho das alternativas para o critério Ampla Faixa de Operação com Enfraquecimento de Campo (C4) = $\begin{pmatrix} a_{14} = 8 \\ a_{24} = 8 \\ a_{34} = 6 \\ a_{44} = 6 \\ a_{54} = 7 \end{pmatrix}$.

As características de enfraquecimento de campo podem ser expressas por meio das curvas de torque *versus* velocidade e potência *versus* velocidade. A região de torque constante está abaixo da velocidade base. A região de enfraquecimento de campo está acima da velocidade base, sendo idealmente também a região de potência constante (ZHAO; LI; GU, 2015).

A nota 7 atribuída às máquinas AFPM no critério de C3 reflete a limitação de topologias convencionais, compensada pelo potencial significativo demonstrado por designs mais avançados e técnicas específicas, conforme observado na literatura analisada.

Por um lado, algumas fontes apontam para uma capacidade de enfraquecimento de campo inerentemente limitada em máquinas AFPM, especialmente aquelas com ímãs montados superficialmente (SPM - *Surface Permanent Magnet*) e entreferros maiores, que resultam em baixas indutâncias de eixo direto (Ld), dificultando a redução do fluxo por métodos elétricos convencionais (ALATALO, 2018; ISLAM *et al.*, 2022; ZHAO; LI; GU, 2015). Alatalo (2018) compara o desempenho da máquina de fluxo axial com a de fluxo radial, indicando um desempenho inferior em alta velocidade para a AFPM. Islam *et al.* (2022) mencionam a operação limitada de enfraquecimento de campo como uma desvantagem das AFPMs.

Por outro lado, diversos estudos demonstram que a capacidade C3 das AFPMs pode ser significativamente melhorada através de escolhas de design e topologias específicas. Por exemplo, as máquinas AFPM do tipo "spoke" apresentam uma capacidade inerente para enfraquecimento de campo (MRAD *et al.*, 2021). As topologias como a YASA (*Yokeless and Segmented Armature*) com enrolamentos concentrados de ranhura fracionária (FSCW - *Fractional-Slot Concentrated Winding*) aumentam a indutância Ld, melhorando a capacidade C3 (GENG *et al.*, 2023; SHAO *et al.*, 2021). Além disso, técnicas como o uso de cunhas magnéticas nas ranhuras (SHAO *et al.*, 2021) e métodos mecânicos, como o uso de ímãs permanentes deslizantes radialmente, podem expandir a faixa de operação, especialmente quando combinados com métodos elétricos (ZHAO; LI; GU, 2015). Estratégias de controle avançadas, com manipulação do estado de magnetização em máquinas com ímãs de baixa coercividade, também demonstram excelente desempenho em ampla faixa de velocidade (YANG *et al.*, 2018).

Tabela D5 – Resumo da literatura para o critério Custo de Fabricação (C5)

Id.	Referência	Unidade/Escala	IM	SynRM	PMSM	PMa-SynRM	AFPM	Artigo	Comentários
1	(KARKI <i>et al.</i> , 2020)	[1-5]	5	-	3	-	-	Periódico	Análise de revisão bibliográfica técnica
2	(MOGHADDAM <i>et al.</i> , 2020)	[1-5]	3	4	1	2	-	Conferência	Estudo comparativo (FEA)
3	(WANG; CHEN; WANG, 2019)	[1-5]	5	-	3	-	-	Periódico	Pesquisa (discussões comparativas)
4	(RIND <i>et al.</i> , 2017)	[1-5]	5	-	3	-	-	Periódico	Estudo de revisão

Fonte: elaborado pela autora (2025).

$$\text{Posição na matriz de desempenho das alternativas para o critério Custo de Fabricação (C5)} = \begin{pmatrix} a_{15} = 10 \\ a_{25} = 10 \\ a_{35} = 2 \\ a_{45} = 7 \\ a_{55} = 1 \end{pmatrix}.$$

A topologia IM recebeu nota máxima (10), pois apresenta o menor custo devido à sua estrutura simples, maturidade tecnológica e ausência de ímãs permanentes, favorecendo a fabricação em larga escala com custos reduzidos (MOGHADDAM *et al.*, 2020; YADAV; MANISHA, 2022). Esta topologia é amplamente reconhecida por estas características, o que justifica sua alta pontuação em termos de custo.

De forma análoga, a SynRM também obteve nota máxima (10). Esta pontuação reflete seu posicionamento como uma alternativa economicamente vantajosa, principalmente por dispensar o uso de ímãs de terras raras. Embora a fabricação do rotor exija precisão para otimizar a saliência e, conseqüentemente, o desempenho (HEIDARI *et al.*, 2021; MURATALIYEV *et al.*, 2022), o custo global do SynRM permanece altamente competitivo.

A PMSM, por outro lado, apresenta um custo de fabricação consideravelmente mais elevado, resultando na atribuição da nota 2. Esta desvantagem ocorre devido à dependência de ímãs de terras raras (como NdFeB), que são caros e impõem riscos de suprimento (ISLAM *et al.*, 2022; MOGHADDAM *et al.*, 2020; YADAV; MANISHA, 2022). Esforços para usar ímãs de ferrite ou reduzir a quantidade de terras raras podem diminuir o custo, mas geralmente impactam a densidade de potência.

A PMa-SynRM foi avaliada com a nota 7, refletindo uma posição intermediária em termos de custo. Essa topologia combina características do SynRM com o uso de ímãs, que podem ser de ferrite ou em menor quantidade de terras raras. Isso pode reduzir os custos em relação ao PMSM tradicional, embora envolva maior complexidade construtiva (HEIDARI *et al.*, 2021; MURATALIYEV *et al.*, 2022).

Por fim, a AFPM tende a apresentar o desempenho menos favorável no que tange ao custo de fabricação, recebendo a nota 1. A complexidade de montagem e o uso intensivo de material magnético, especialmente se forem ímãs de terras raras, elevam seu custo (ISLAM *et al.*, 2022; KARKI *et al.*, 2020). Adicionalmente, desafios no gerenciamento térmico podem requerer soluções mais elaboradas, fazendo com que seja a opção de custo mais elevado.

Tabela D6 – Resumo da literatura para o critério Densidade de Potência (C6)

Id.	Referência	Unidade/Escala	IM	SynRM	PMSM	PMa-SynRM	AFPM	Artigo	Comentários
1	(GENG <i>et al.</i> , 2023)	kW/kg	-	-	-	-	6,8	Periódico	Estudo comparativo (experimental X simulações)
2	(KANNOJIA; CHINMAYA, 2023)	máx=100	-	92	100	-	-	Conferência	Revisão comparativa e simulações no Ansys Maxwell
3	(ISLAM <i>et al.</i> , 2022)	kW/L	-	-	-	5,4	10,2	Conferência	Comparação PMa-SynRM e AFPM (FEA)
4	(YADAV; MANISHA, 2022)	[1-10]	7	-	10	-	-	Conferência	Análise comparativa (simulados no MATLAB/SIMULINK)
5	(KARKI <i>et al.</i> , 2020)	[1-5]	3	-	4,5	-	-	Periódico	Análise de revisão bibliográfica técnica
6	(MOGHADDAM <i>et al.</i> , 2020)	[1-5]	2	3	5	4	-	Conferência	Estudo comparativo (FEA)
7	(WANG; CHEN; WANG, 2019)	[1-5]	3,5	-	5	-	-	Periódico	Pesquisa (discussões comparativas)
8	(BOSTANCI <i>et al.</i> , 2017)	[1-10]	6	6	10	8	-	Periódico	Estudo comparativo abrangente e detalhado (FEM)
9	(BOLVASHENKOV; KAMMERMANN; HERZOG, 2018)	[1-10]	7	-	10	-	-	Conferência	Análise comparativa (modelos estocásticos)
10	(RIND <i>et al.</i> , 2017)	[1-5]	4	-	5	-	-	Periódico	Estudo de revisão
11	(ZERAOULIA; BENBOUZID; DIALLO, 2006)	[1-5]	3,5	-	5	-	-	Periódico	Estudo comparativo (revisão exaustiva do estado da arte)

Fonte: elaborado pela autora (2025).

$$\text{Posição na matriz de desempenho das alternativas para o critério Fator de Potência (C6)} = \begin{pmatrix} a_{16} = 5 \\ a_{26} = 5 \\ a_{36} = 9 \\ a_{46} = 7 \\ a_{56} = 10 \end{pmatrix}.$$

A topologia AFPM obteve o melhor desempenho (nota 10), destacando-se por sua elevada densidade de potência e compactação. A PMa-SynRM também apresentou bom desempenho (nota 7) nesse critério. A PMSM, amplamente reconhecida por sua alta eficiência e densidade de potência, recebeu nota 9. Já a SynRM e a IM receberam notas menores (5), refletindo suas limitações quanto à densidade de potência, ainda que se mantenham competitivas em aplicações onde outros critérios são prioritários.

Tabela D7 – Resumo da literatura para o critério Ondulação de Conjugado (C7)

Id.	Referência	Unidade/Escala	IM	SynRM	PMSM	PMa-SynRM	AFPM	Artigo	Comentários
1	(KANNOJIA; CHINMAYA, 2023)	máx=100	-	35	80	-	-	Conferência	Revisão comparativa e simulações no Ansys Maxwell
2	(ISLAM <i>et al.</i> , 2022)	[%]	-	-	-	4,9	3,1	Conferência	Comparação PMa-SynRM e AFPM (FEA)
3	(RADU <i>et al.</i> , 2019)	[%]	2,72	6	5,7	-	-	Conferência	Estudo comparativo (Maxwell Electromagnetics)
4	(BOSTANCI <i>et al.</i> , 2017)	[1-10]	8	5	8	6	-	Periódico	Estudo comparativo abrangente e detalhado (FEM)
5	(RIND <i>et al.</i> , 2017)	[1-5]	4,5	-	4,5	-	-	Periódico	Estudo comparativo (análise FEM)

Fonte: elaborado pela autora (2025).

$$\text{Posição na matriz de desempenho das alternativas para o critério Ondulação de Conjugado (C7)} = \begin{pmatrix} a_{17} = 8 \\ a_{27} = 5 \\ a_{37} = 8 \\ a_{47} = 6 \\ a_{57} = 8 \end{pmatrix}$$

Com base nas evidências da literatura, critério C7 reflete a variação do torque gerado, durante a rotação, por cada topologia. As alternativas IM, PMSM e AFPM demonstram um bom desempenho neste critério (nota 8), indicando menor ondulação de conjugado. A alternativa PMa-SynRM recebeu nota 6, refletindo um desempenho intermediário. Já a alternativa SynRM obteve a menor nota (5), devido à maior sensibilidade à ondulação de conjugado, associada à topologia de rotor com barreiras de fluxo.