

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**FLÁVIA SANTANA DE PAULA
JENNIFER AZEVEDO BATISTA**

**REVISÃO COMPARATIVA DE DESEMPENHO E ANÁLISE DE CONFIABILIDADE
DE MOTORES PMSM E PMSYNRM PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS DE PASSEIO
(M1/N1)**

**CURITIBA
2026**

**FLÁVIA SANTANA DE PAULA
JENNIFER AZEVEDO BATISTA**

**REVISÃO COMPARATIVA DE DESEMPENHO E ANÁLISE DE CONFIABILIDADE
DE MOTORES PMSM E PMSYNRM PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS DE PASSEIO
(M1/N1)**

**Comparative Performance Review and Reliability Analysis of PMSM and
PMSynRM Motors for Passenger Electric Vehicles (M1/N1)**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de
Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Dr. Carlos Henrique Mariano

CURITIBA

2026



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

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

**FLÁVIA SANTANA DE PAULA
JENNIFER AZEVEDO BATISTA**

**REVISÃO COMPARATIVA DE DESEMPENHO E ANÁLISE DE CONFIABILIDADE
DE MOTORES PMSM E PMSYNRM PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS DE PASSEIO
(M1/N1)**

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

Data de aprovação: 18/junho/2026

Emerson Rigoni
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ednilson Soares Maciel
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Carlos Henrique Mariano
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA
2026**

Dedicamos este trabalho às nossas famílias, pelo apoio, incentivo e por sempre acreditarem em nós, mesmo nos momentos mais desafiadores. Aos nossos parceiros, pela compreensão, carinho e por estarem ao nosso lado em cada etapa dessa jornada. Esta conquista também é de vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, aos nossos pais, Emerson, Raquel, Marilucia e Francisco por todo o amor, incentivo, apoio e compreensão ao longo desta jornada. A presença constante, o encorajamento nos momentos difíceis e a confiança depositada em nós foram fundamentais para a concretização deste trabalho.

Expressamos também nossa sincera gratidão aos nossos parceiros e amigos, em especial a João Felipe e João Pedro, pelas valiosas trocas de ideias, pelo apoio e pelo companheirismo durante todo o desenvolvimento desta pesquisa. Cada contribuição e palavra de incentivo fizeram diferença em nossa caminhada.

Por fim, agradecemos uma à outra pela parceria, dedicação, comprometimento e esforço compartilhado ao longo de todo este percurso acadêmico. A colaboração, o respeito mútuo e a determinação conjunta foram essenciais para a realização deste trabalho. Que nossa parceria acadêmica se estenda para muitas outras conquistas.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista, deixamos o nosso mais sincero agradecimento.

“O homem não é nada além daquilo que a
educação faz dele.”

(KANT, 1999 [1803], p.11).

RESUMO

A expansão dos veículos elétricos das categorias M1 e N1 impõe o desafio de desenvolver sistemas de propulsão eficientes, de baixo custo e com cadeias de suprimentos menos vulneráveis à escassez de materiais críticos. Este trabalho avalia comparativamente, por meio de revisão sistemática da literatura e de análise computacional probabilística de confiabilidade, os Motores Síncronos de Ímãs Permanentes (PMSM) e os Motores Síncronos de Relutância Assistidos por Ímãs Permanentes (PMSynRM), aplicados ao *powertrain* de automóveis elétricos de passeio e utilitários leves, segmento em que ambas as topologias competem na faixa de 60 kW a 150 kW. A análise computacional probabilística foi estruturada com base em um *powertrain* de referência de 35 kW, adotado como modelo conservador em escala reduzida, com dados de confiabilidade consolidados. Metodologicamente, a pesquisa foi dividida em duas fases: revisão sistemática da literatura, que sintetizou 47 estudos para identificar modos de falha e calibrar parâmetros de degradação, e modelagem probabilística por Diagramas de Blocos de Confiabilidade (RBD), no software ReliaSoft BlockSim. A literatura indica que o PMSynRM, ao combinar torque de relutância com assistência de ímãs de baixo custo, apresenta desempenho dinâmico competitivo com o PMSM em veículos M1/N1, com extensão adequada de enfraquecimento de campo, porém com maior ondulação de torque e menor densidade de torque volumétrica. Os resultados das análises de confiabilidade mostram que o PMSM apresenta superioridade nos parâmetros de sobrevivência, com Tempo Médio Até a Falha (MTTF) de 57.530 h e vida B10 de 20.387 h, frente a 54.544 h e 18.894 h do PMSynRM. Essa diferença é atribuída à maior complexidade geométrica do rotor do PMSynRM, que concentra tensões mecânicas e térmicas adicionais. A análise do *powertrain* completo demonstrou que a infraestrutura de suporte, especialmente o banco de baterias com BMS, domina a taxa de falha global nos estágios iniciais, reduzindo a diferença prática entre as topologias. Já a análise de arquiteturas multi-motor evidenciou que a redundância parcial 2-de-3 eleva a confiabilidade do PMSynRM a 77,21% em 35.000 horas e aumenta a vida B10 para 21.123 horas, superando o arranjo monomotor com PMSM. Ainda assim, o PMSM apresentou maior confiabilidade em todos os cenários analisados, refutando a hipótese de superioridade do PMSynRM nesse aspecto. Por outro lado, a viabilidade operacional comparável em desempenho eletromecânico foi confirmada. A literatura aponta vantagens do PMSynRM em custo e menor dependência de terras raras, aspectos não avaliados quantitativamente neste estudo e que permanecem como oportunidade para pesquisas futuras.

Palavras-chave: veículos elétricos M1/N1; PMSM; PMSynRM; engenharia de confiabilidade; redundância lógica.

ABSTRACT

The expansion of electric vehicles in the M1 and N1 categories poses the challenge of developing propulsion systems that are efficient, cost-effective, and less dependent on supply chains vulnerable to shortages of critical materials. This study comparatively evaluates Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) and Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motors (PMSynRM), applied to the powertrains of passenger electric cars and light commercial vehicles, where both topologies compete in the 60 kW to 150 kW range. The analysis is conducted through a systematic literature review and probabilistic computational reliability modeling. The probabilistic analysis was structured using a 35 kW reference powertrain as a conservative reduced-scale model, supported by consolidated reliability data from the literature. Methodologically, the research was divided into two stages: a systematic literature review, which synthesized 47 studies to identify dominant failure modes and statistically calibrate degradation parameters, followed by probabilistic modeling using Reliability Block Diagrams (RBD) implemented in ReliaSoft BlockSim. The literature indicates that PMSynRM, by combining reluctance torque with low-cost permanent magnet assistance, achieves dynamic performance comparable to PMSM in M1/N1 vehicles, with an adequate field-weakening range, albeit with higher torque ripple and lower torque density per unit volume. Reliability analysis results show that PMSM outperforms PMSynRM in survival metrics, with a Mean Time To Failure (MTTF) of 57,530 h and B10 life of 20,387 h, compared to 54,544 h and 18,894 h for PMSynRM. This difference is attributed to the greater geometric complexity of PMSynRM rotor flux barriers, which concentrate additional mechanical and thermal stresses. The analysis of the complete powertrain revealed that supporting infrastructure, particularly the battery pack with BMS, dominates the overall failure rate in the early stages, reducing the practical difference between motor topologies. Furthermore, multi-motor architecture analysis showed that partial redundancy (2-out-of-3 configuration) increases PMSynRM powertrain reliability to 77.21% at 35,000 hours and extends B10 life to 21,123 hours, surpassing the single-motor PMSM configuration. Nevertheless, PMSM demonstrated higher reliability across all evaluated scenarios, refuting the hypothesis that replacing PMSM with PMSynRM would improve operational reliability. On the other hand, the hypothesis of comparable operational feasibility in electromechanical performance was confirmed. The literature highlights strategic advantages of PMSynRM in manufacturing cost and reduced dependence on rare earth materials, aspects not quantitatively assessed in this study and identified as opportunities for future research.

Keywords: M1/N1 electric vehicles; PMSM; PMSynRM; reliability engineering; logical redundancy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas envoltórias de torque versus velocidade: comparação entre a referência de mercado (PMSM), a base tecnológica (SynRM) e a solução prospectiva (PMSynRM)	34
Figura 2 - Diagrama de blocos da arquitetura monomotor convencional.....	40
Figura 3 - Diagrama de blocos para arquitetura com dois motores em série....	41
Figura 4 - Arquitetura de tração distribuída com redundância parcial (2-de-3).	42
Figura 5 - Diagrama de blocos para arquitetura extrema com quatro motores.	43
Figura 6 - Diagrama de blocos do <i>powertrain</i> visão de primeiro nível – Sistemas	92
Figura 7 – Árvore de falhas do <i>powertrain</i>	93
Figura 8 - Diagrama de blocos do Subsistema Bateria.....	93
Figura 9 – Árvore de falhas do Subsistema Bateria.....	94
Figura 10 - Diagrama de blocos do Subsistema Controlador do Motor	94
Figura 11 - Árvore de falhas do Subsistema Controlador do Motor	95
Figura 12- Diagrama de blocos do Subsistema distribuição de potência.....	95
Figura 13- Árvore de falhas do Subsistema distribuição de potência.....	96
Figura 14 - Diagrama de blocos do Subsistema <i>Driver</i> do motor	96
Figura 15 – Árvore de Falhas do Subsistema <i>Driver</i> do motor	97
Figura 16 – Árvore de falhas do Conjunto GM1.....	97
Figura 17 – Confiabilidade em função do tempo (<i>Reliability vs. Time</i>)	100
Figura 18 – Inconfiabilidade em função do tempo (<i>Unreliability vs. Time</i>).	101
Figura 19 – Função Densidade de Probabilidade de falhas ($f(t)$).....	102
Figura 20 – Taxa de Falha em função do tempo (<i>Failure Rate vs. Time</i>).....	104
Figura 21 – Fluxograma Prisma	124

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparativo geral entre os motores PMSM, IPMSM, SynRM, PMSynRM e BLDC	31
Quadro 2 – Comparativo de indicadores de desempenho dinâmico entre PMSM, SynRM e PMSynRM.....	33
Quadro 3 – Decomposição das Taxas de Falha do <i>Powertrain</i>	44
Quadro 4 – Fluxo Metodológico da Parametrização	47
Quadro 5 – Levantamento das premissas para determinação dos modos de falha preponderantes	47
Quadro 6 – Síntese Interpretativa dos Parâmetros de Referência.....	58
Quadro 7 – Parâmetros de Forma por Modo de Falha e Interpretação Física ...	60
Quadro 8 – Comparativo Consolidado dos Parâmetros de Forma Adotados....	68
Quadro 9 – Penalidades nas Vidas Características das Topologias	74
Quadro 10 – Embasamento Bibliográfico dos Parâmetros de Forma (β)	89
Quadro 11 – Protocolo de Pesquisa	123
Quadro 12 – Relação final de artigos incluídos na Revisão Sistemática da Literatura (RSL).	126
Quadro 13 – Interpretação Física dos Modos de Falha via Parâmetro Comparativo de indicadores de desempenho β	144
Quadro 14 – Comportamento dos Modos de Falha em Motores de Tração.....	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Outros fatores de severidade operacional	49
Tabela 2 - Demonstrativo do uso da análise de riscos concorrente	59
Tabela 3 - Parâmetros para Composição do $\beta_{eff}(\text{SynRM})$	65
Tabela 4 - Parâmetros para Composição do $\beta_{eff}(\text{PMSM})$	66
Tabela 5 - Síntese da Penalização de η por Topologia de Motor	78
Tabela 6 - Matriz Consolidada de Parâmetros de Weibull por Topologia.....	82
Tabela 7 - Comparativo de Indicadores de Vida Média Resultantes.....	85
Tabela 8 - Estimativa de Vida Segura (B_{10}) das Topologias.....	88
Tabela 9 - Comparativo da confiabilidade do Subsistema <i>Driver</i>	98
Tabela 10 - Comparativo da confiabilidade do sistema <i>powertrain</i> completo.	105
Tabela 11 - Desempenho de confiabilidade para arquitetura com 1 motor.....	107
Tabela 12 - Desempenho de confiabilidade para arquitetura com 2 motores..	107
Tabela 13 - Desempenho de confiabilidade para arquitetura tolerante com 3 motores.	108
Tabela 14 - Desempenho de confiabilidade para arquitetura com 4 motores em série.....	109
Tabela 15 - Matriz consolidada de indicadores estatísticos das análises de modelagem computacionais de confiabilidade.	112
Tabela 16 – Exemplificação de Tempos Latentes vs. Tempo Observado	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Corrente Alternada
B10	Tempo para falha de 10% da população
B50	Vida mediana (50% de probabilidade de falha)
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i> (Veículo Elétrico a Bateria)
BLDC	<i>Brushless Direct Current</i> (Motor de Corrente Contínua sem Escovas)
BMS	<i>Battery Management System</i> (Sistema de Gerenciamento de Bateria)
BNEF	Bloomberg New Energy Finance
CAN-FD	<i>Controller Area Network with Flexible Data-Rate</i> (Rede de área de Controladores com taxa de Dados Flexível)
Coef.	Coeficiente
DC	Corrente Contínua
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> (Processador Digital de Sinais)
FOC	<i>Field-Oriented Control</i> (Controle por Campo Orientado)
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
FPMH	<i>Failures Per Million Hours</i> (Falhas por Milhão de Horas)
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i> (Análise por Árvore de Falhas)
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i> (Veículo Elétrico Híbrido)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICCT	The International Council on Clean Transportation
IEA	International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor Bipolar de Porta Isolada)
IPMSM	<i>Interior Permanent Magnet Synchronous Motor</i> (Motor Síncrono de Ímã Permanente Interior)
MEF	Método de Elementos Finitos

MLE	<i>Maximum Likelihood Estimation</i> (Estimativa de Máxima Verossimilhança)
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> (Transistor de Efeito de Campo Semicondutor de Óxido Metálico)
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i> (Tempo Médio Entre Falhas)
MTTF	<i>Mean Time to Failure</i> (Tempo Médio Até a Falha)
NBR	Normas Brasileiras
NdFeB	Neodímio-Ferro-Boro (Ímãs de Terras Raras)
NVH	<i>Noise, Vibration, and Harshness</i> (Ruído, Vibração e Aspereza)
OMS	Organização Mundial da Saúde
PDU	<i>Power Distribution Unit</i> (Unidade de Distribuição de Energia)
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i> (Veículo Elétrico Híbrido <i>Plug-in</i>)
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i> (Motor Síncrono de Ímãs Permanentes)
PMSynRM	<i>Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor</i> (Motor de Relutância Síncrona Assistido por Ímã Permanente)
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses</i> (Itens Preferenciais de Relato para Revisões Sistemáticas e Meta-Análises)
RBD	<i>Reliability Block Diagram</i> (Diagrama de Blocos de Confiabilidade)
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
SiC	Carbeto de Silício
SynRM	<i>Synchronous Reluctance Motor</i> (Motor de Relutância Síncrona)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VCU	<i>Vehicle Control Unit</i> (Unidade de Controle do Veículo)
VE	Veículo Elétrico

LISTA DE SÍMBOLOS

B_{10}	Tempo para falha de 10% da população
B_{50}	Tempo para falha de 50% da população (Vida mediana)
CIF	Função de incidência acumulada (Cumulative Incidence Function)
d	Eixo direto do rotor
$F(t)$	Função de distribuição acumulada de falhas
$h(t)$	Função de risco ou taxa de falha instantânea
k_s	Fator de severidade operacional
k_{top}	Fator de penalidade topológica
q	Eixo em quadratura do rotor
$R(t)$	Função de confiabilidade (probabilidade de sobrevivência)
t	Tempo de operação
T_{sys}	Tempo de vida observado do sistema
T_i	Tempo latente de falha de um modo específico
β	Parâmetro de forma da distribuição de Weibull
η	Parâmetro de escala ou vida característica de Weibull
λ	Taxa de falha constante (Distribuição Exponencial)
Γ	Função matemática Gama
ω	Fração de falha ou peso de incidência de um modo de falha

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Panorama da Mobilidade Elétrica e Contextualização do Estudo	18
1.2	Delimitação do Tema	19
1.3	Problema de Investigação	20
1.4	Objetivos	20
1.4.1	Objetivo Geral.....	20
1.4.2	Objetivos Específicos	21
1.5	Justificativa do Estudo	21
1.6	Metodologia	22
1.6.1	Revisão Sistemática: Metodologia e Análise	24
<u>1.6.1.1</u>	<u>Protocolo de Pesquisa</u>	<u>24</u>
1.6.1.1.1	<i>Questões de Pesquisa</i>	24
1.6.1.1.2	<i>Fontes de Dados e Estratégia de Busca</i>	25
1.6.1.1.3	<i>Critérios de Inclusão e Exclusão</i>	26
<u>1.6.1.2</u>	<u>Processos de Seleção e Extração de Dados</u>	<u>26</u>
<u>1.6.1.3</u>	<u>Análise e Síntese dos Resultados</u>	<u>27</u>
1.6.1.3.1	<i>Análise Descritiva</i>	27
1.6.1.3.2	<i>Análise Temática</i>	27
<u>1.6.1.4</u>	<u>Considerações Finais da Revisão</u>	<u>28</u>
2	FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA E DESEMPENHO DOS MOTORES	30
2.1	Tecnologias de Motores Síncronos aplicadas à Mobilidade Elétrica 30	
2.2	Análise Comparativa de Desempenho: Torque vs. Velocidade	32
2.2.1	Densidade de Torque e o Desafio da Relutância Pura.....	32
2.2.2	Estabilidade em Altas Velocidades e Enfraquecimento de Campo	32
2.2.3	Suavidade de Operação e <i>Ripple</i> de Torque	33
2.2.4	Síntese Comparativa: Relutância vs Ímãs Permanentes.....	33
2.3	Considerações sobre a Viabilidade das Topologias	35
2.4	Outras Topologias Síncronas: Motores BLDC e SynRM	36
3	ARQUITETURA DO <i>POWERTRAIN</i> E ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DOS COMPONENTES	37
3.1	Introdução	37
3.2	Arquitetura do Sistema de <i>Powertrain</i> em BEV	37

3.2.1	Sistema de Bateria e Gerenciamento (BMS).....	38
3.2.2	Unidade de Distribuição de Energia (PDU)	38
3.2.3	Controlador do Motor (Inversor de Tração)	38
3.2.4	Motor de Tração	38
3.3	Arquiteturas de Redundância e Distribuição de Tração	39
3.4	Distribuição e Análise de Falhas no <i>Powertrain</i>.....	43
3.4.1	Taxas de Falha por Subsistema	43
3.5	Considerações para o Estudo Comparativo (PMSM vs. PMSynRM).....	45
4	METODOLOGIA DE PARAMETRIZAÇÃO DOS MODELOS DE CONFIABILIDADE.....	46
4.1	Passo 1 - Levantamentos das premissas para escolha dos modos de falha	47
4.2	Passo 2 – Determinação do parâmetro de escala da distribuição Weibull	48
4.2.1	Conversão de MTTF para Parâmetro de Escala Weibull	49
4.2.2	Determinação da Vida Característica de Referência (η_{base})	51
4.2.3	Lógica de Transposição da Taxa de Falha para Métrica Temporal.....	51
4.2.4	Distinção Terminológica e a Transição entre MTBF e MTTF	52
4.2.5	Ajuste de Severidade Operacional e Transposição de Contexto	53
4.2.6	Cálculo da Vida Característica (η) da Distribuição de Weibull.....	53
4.2.7	Análise da Relação Proporcional entre o MTTF e a Vida Característica (η)	54
4.2.8	Interpretação Física do Parâmetro de Forma ($\beta = 2,8$).....	54
4.2.9	Justificativa, Consolidação E Síntese da Parametrização de Escala	55
4.3	Passo 3 — Composição de riscos concorrentes e determinação do β_{eff}	58
4.3.1	Caracterização e Interpretação Física dos Parâmetros de Forma Individuais (β_i).....	60
4.3.2	Definição e Atribuição dos Pesos de Incidência (ω_i).....	61
4.3.3	Justificativa Metodológica para a Escolha da Média Harmônica Ponderada	62
4.3.4	Formulação Matemática da Média Harmônica Ponderada.....	63
4.3.5	Sensibilidade da Média Harmônica aos Menores Coeficientes de Forma	64
4.3.6	Demonstração Prática do Cálculo: Topologia SynRM (Referência)	65
4.3.7	Demonstração do Cálculo para a Topologia PMSM.....	66
4.3.8	Interpretação Física e Comparativa dos Resultados de β_{eff}	67

4.3.9	Síntese Comparativa e Hierarquia dos Betas Efetivos	68
4.3.10	Justificativa da média harmônica e conservadorismo do modelo	69
4.3.11	Limitações do Método e Perspectiva de Rigor Estatístico	71
4.4	Penalização Topológica E Consolidação Dos Parâmetros Finais ...	73
4.4.1	Definição da Vida Característica de Referência (η_{base})	76
4.4.2	Conceituação e Aplicação da Penalidade Topológica (k_{top}).....	77
4.4.3	Justificativa Técnica e Determinação das Vidas Características (η)	78
4.4.4	Distinção Analítica entre os Ajustes de Forma (β) e Escala (η)	80
4.4.5	Consolidação e Interpretação Conjunta dos Parâmetros Weibull	81
4.4.6	Comportamento Dinâmico das Curvas de Confiabilidade	83
4.4.7	Distinção entre Vida Característica (η) e Tempo Médio até a Falha ($MTTF$) 85	
4.4.8	Natureza Heurística e dualidade do modelo.....	85
4.4.9	Distinção entre Métricas de Vida: L_{10} , B_{10} e η	86
4.4.10	Validação do Modelo: O Caso do Motor BLDC	87
4.4.11	Estimativa Comparativa de Vida B_{10} por Topologia	87
4.5	Embasamento Bibliográfico das Premissas de Parametrização.....	89
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	92
5.1	Arquitetura dos Diagramas de Blocos de Confiabilidade (RBD).....	92
5.2	Resultados das Análises de Confiabilidade Isoladas do Subistema <i>Driver</i>	98
5.3	Análise de Confiabilidade Integrada do <i>Powertrain</i>	105
5.4	Análise Computacional de Arquiteturas Multi-Motor	106
5.4.1	Configuração com Motor Único (Arranjo Monomotor)	106
5.4.2	Configuração com Arranjo de 2 Motores	107
5.4.3	Configuração com Arranjo de 3 Motores	108
5.4.4	Configuração com Arranjo de 4 Motores	109
5.5	Discussão Comparativa Prática entre PMSM e PMSynRM	109
5.6	Síntese dos Resultados e Discussão Final do Capítulo	111
5.6.1	O Efeito Dominante da Infraestrutura de Suporte	113
5.6.2	O Dilema Geométrico-Estrutural: PMSM versus PMSynRM	113
5.6.3	Redundância como Mecanismo de Viabilização Tecnológica	114
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
	REFERÊNCIAS.....	118
	APÊNDICE A - Protocolo de pesquisa e Fluxograma PRISMA.....	122
	APÊNDICE B - Artigos selecionados pela RSL.....	125

**APÊNDICE C - Fundamentos Teóricos da Análise de Riscos
Concorrentes 131**

1 INTRODUÇÃO

1.1 Panorama da Mobilidade Elétrica e Contextualização do Estudo

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e os impactos ambientais decorrentes do uso intensivo de combustíveis fósseis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias mais limpas e sustentáveis no setor automotivo (IEA, 2023). Nesse contexto, os veículos elétricos (VEs) emergem como uma alternativa promissora aos veículos movidos à combustão interna, oferecendo benefícios como redução de emissões de gases poluentes, maior eficiência energética, menor ruído e custo operacional reduzido (HUSAIN, 2011).

O avanço da mobilidade elétrica tem se consolidado de forma progressiva, impulsionado por políticas públicas, incentivos fiscais, metas globais de descarbonização e pela evolução tecnológica das baterias e sistemas de propulsão (LIAO et al., 2020). Atualmente, a indústria categoriza os veículos elétricos de acordo com sua utilidade e porte, sendo as principais classes: os veículos de passeio e utilitários leves, voltados ao transporte individual e urbano; os veículos de carga leve, como vans de entrega de "última milha"; e os veículos de carga pesada, com destaque para a eletrificação de frotas de ônibus urbanos, que representam um pilar estratégico para a redução de emissões em grandes metrópoles (EHSANI et al., 2018).

A constituição de um veículo elétrico baseia-se na integração de sistemas complexos que substituem a mecânica convencional por circuitos eletroeletrônicos de alta eficiência. Os principais sistemas incluem a Unidade de Controle do Veículo (VCU), o sistema de armazenamento de energia (Bateria), o sistema de gerenciamento térmico e o sistema de recarga. No cenário atual, coexistem diferentes arquiteturas de propulsão, desde os veículos híbridos (HEVs), híbridos *plug-in* (PHEVs) até os veículos elétricos a bateria (BEV, do inglês *Battery Electric Vehicle*), que representam o estágio máximo de descarbonização ao eliminar completamente o motor a combustão interna (CHAU; CHAN, 2007).

Dentre esses sistemas, o destaque central recai sobre o *powertrain* (sistema de tração), que é o coração tecnológico do veículo. O *powertrain* é composto por subsistemas críticos que devem trabalhar em perfeita sincronia: o banco de baterias, a Unidade de Distribuição de Energia (PDU), o Controlador do Motor (Inversor), o *Driver* do Motor e o Motor Elétrico. O motor elétrico, nesse cenário, constitui o

elemento central de conversão de energia do veículo, sendo determinante para o desempenho, a autonomia, o custo e a confiabilidade do sistema (CHAU; CHAN, 2007).

O presente estudo concentra-se exclusivamente em veículos elétricos de passeio das categorias M1 e N1, segmento que representa grande parcela de crescimento no mercado automotivo global e onde as decisões sobre eficiência, custo e confiabilidade são mais críticas para a viabilidade comercial (IEA, 2023; BLOOMBERGNEF, 2023).

1.2 Delimitação do Tema

Esta pesquisa delimita-se à avaliação de confiabilidade e desempenho das topologias PMSM e PMSynRM aplicadas ao *powertrain* de veículos elétricos das categorias M1 (automóveis de passeio) e N1 (utilitários leves), na faixa de 60 kW a 150 kW. Para fins de modelagem estocástica, adota-se como modelo de referência o *powertrain* de 35 kW fundamentado em Tang et al. (2021), interpretado aqui como um *proxy* conservador para sistemas de maior potência em escala reduzida, visando a análise comparativa probabilística.

Os Motores Síncronos de Ímãs Permanentes (PMSM – *Permanent Magnet Synchronous Motors*) e os Motores Síncronos de Relutância Síncrona com Ímãs Permanentes (PMSynRM – *Permanent Magnet Synchronous Reluctance Motors*), duas alternativas que combinam eficiência elevada, controle preciso e boa resposta dinâmica (MILLER, 2010). No entanto, apresentam diferenças significativas quanto à dependência de materiais críticos, custo de fabricação e robustez operacional (KRISHNAN, 2017).

A análise será limitada às topologias mais representativas para essa aplicação:

- Motor Síncrono de Ímãs Permanentes (PMSM), com ênfase no tipo IPMSM (*Interior Permanent Magnet Synchronous Motor*), amplamente empregado em veículos elétricos de alto desempenho (CHEN et al., 2019);
- Motor Síncrono de Relutância Síncrona com Ímãs Permanentes (PMSynRM), alternativa que busca reduzir o uso de terras raras e otimizar o equilíbrio entre eficiência e custo (VAS, 2013).

1.3 Problema de Investigação

A transição energética global impulsiona a substituição de motores de combustão interna por soluções elétricas mais eficientes e ambientalmente responsáveis (IEA, 2023). Entretanto, a tecnologia de propulsão elétrica ainda enfrenta desafios relacionados à disponibilidade de materiais, ao desempenho dinâmico e à confiabilidade sistêmica (HOFMANN; LIU, 2018).

Os PMSMs tornaram-se padrão de referência no setor automotivo devido à sua alta eficiência e densidade de potência (KRISHNAN, 2017). No entanto, sua dependência de ímãs de terras raras, como neodímio e disprósio, gera preocupações quanto ao impacto ambiental da mineração e à vulnerabilidade da cadeia de suprimentos global (USGS, 2022). Além disso, a presença massiva de ímãs no rotor pode influenciar os modos de falha e a vida útil operacional do motor sob condições severas de uso.

Nesse cenário, os motores síncronos de relutância assistidos por ímãs permanentes (PMSynRM) surgem como uma alternativa promissora, ao reduzirem a quantidade de ímãs permanentes utilizados sem comprometer significativamente o desempenho global da máquina elétrica (BOLDEA; TUTELEA, 2010). Assim, a primeira hipótese desta pesquisa consiste em investigar se os PMSynRMs representam uma alternativa tecnicamente mais viável em comparação aos motores síncronos de ímãs permanentes convencionais (PMSM).

Uma segunda hipótese do estudo consiste na utilização de motores síncronos de relutância assistidos por ímãs permanentes (PMSynRM) em substituição aos motores síncronos de ímãs permanentes convencionais (PMSM) poderá proporcionar melhoria na confiabilidade do *powertrain* do veículo elétrico.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Analisar comparativamente, por meio de síntese bibliográfica e modelagem computacional de confiabilidade, o desempenho eletromecânico e a confiabilidade operacional de motores PMSynRM em relação aos motores PMSM considerando sua aplicação em *powertrains* de veículos elétricos de passeio das categorias M1 e N1.

1.4.2 Objetivos Específicos

a. Caracterizar, com base na literatura técnica e científica, as topologias de motores PMSM e PMSynRM aplicadas a tração elétrica veicular.

b. Comparar aspectos de desempenho eletromecânico das topologias PMSM e PMSynRM, considerando parâmetros como torque, eficiência, região de enfraquecimento de campo e ondulação de torque.

c. Identificar os principais modos de falha associados aos motores PMSM e PMSynRM, com ênfase em rolamentos, isolamento elétrico, desmagnetização e efeitos da geometria do rotor.

d. Modelar e comparar, por meio de Diagramas de Blocos de Confiabilidade e Análise por Árvores de Falhas, o impacto da adoção de motores PMSynRM em relação aos motores PMSM na confiabilidade do powertrain.

e. Discutir, com base na literatura, as implicações técnicas da redução do uso de ímãs permanentes em motores PMSynRM, especialmente quanto à dependência de terras raras, ao desempenho eletromecânico e à confiabilidade operacional.

1.5 Justificativa do Estudo

O crescimento da mobilidade elétrica tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas de tração cada vez mais eficientes, compactos e confiáveis. Nesse contexto, os motores síncronos de ímãs permanentes (PMSM) consolidaram-se como uma das principais soluções empregadas em veículos elétricos devido à elevada densidade de potência, alta eficiência energética e excelente desempenho dinâmico, características amplamente discutidas na literatura técnica voltada à propulsão elétrica veicular (CHAU; CHAN; LIU, 2008, p. 2247; ZHU; HOWE, 2007, p. 748).

Entretanto, a forte dependência de materiais de terras raras utilizados na fabricação dos ímãs permanentes, especialmente neodímio e disprósio, tem despertado preocupações relacionadas ao impacto ambiental da mineração, à instabilidade da cadeia global de suprimentos e ao aumento dos custos de fabricação de máquinas elétricas para aplicações veiculares (EL-REFAIE, 2010, p. 109). Além disso, condições severas de operação, como ciclos térmicos repetitivos, vibração mecânica e elevadas densidades de corrente, podem influenciar mecanismos de degradação associados aos ímãs permanentes e aos sistemas de isolamento,

afetando diretamente a confiabilidade operacional do *powertrain* (HUANG et al., 2015, p. 2).

Nesse cenário, os motores síncronos de relutância assistidos por ímãs permanentes (PMSynRM) surgem como uma alternativa tecnologicamente promissora, uma vez que possibilitam a redução da quantidade de material magnético empregado sem comprometer significativamente o desempenho eletromecânico da máquina (BOLDEA; TUTELEA, 2010, p. 312). A combinação entre torque de relutância e assistência magnética permite obter estruturas rotóricas potencialmente mais robustas sob o ponto de vista térmico e mecânico, além de reduzir a dependência de materiais críticos utilizados em motores PMSM convencionais.

Sob a perspectiva da confiabilidade, o estudo de arquiteturas alternativas de motorização torna-se particularmente relevante em veículos elétricos de passeio e utilitários leves, nos quais limitações de custo, massa, eficiência energética e robustez operacional possuem impacto direto sobre a viabilidade operacional do sistema de tração. Estudos recentes em confiabilidade aplicada a sistemas eletromecânicos automotivos destacam que falhas associadas ao motor elétrico e ao inversor de potência representam parcela significativa das indisponibilidades do *powertrain* elétrico (MA et al., 2021, p. 1189). Dessa forma, investigações relacionadas aos modos de falha, comportamento térmico e degradação operacional das máquinas elétricas assumem importância crescente no desenvolvimento de veículos elétricos mais confiáveis.

Complementarmente, a fim de enriquecer a fundamentação técnica e oferecer um panorama comparativo mais abrangente, este estudo apresenta breves referências às tecnologias BLDC e SynRM puro. Essas topologias servem como marcos de referência para simplicidade e robustez, respectivamente, permitindo uma análise mais rica sobre como o motor de relutância assistido (PMSynRM) se posiciona em relação às soluções de micromobilidade e aos sistemas industriais de alta confiabilidade.

1.6 Metodologia

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza aplicada, visto que busca avaliar de forma analítica e simulatória a utilização de motores síncronos de relutância assistidos por ímãs permanentes (*Permanent Magnet Assisted*

Synchronous Reluctance Motors – PMSynRM) em substituição aos motores síncronos de ímãs permanentes convencionais (*Permanent Magnet Synchronous Motors* – PMSM) no contexto de *powertrain* de veículos elétricos de passeio das categorias M1 e N1. Do ponto de vista de seus objetivos, a investigação assume caráter exploratório e descritivo (GIL, 2017), uma vez que visa mapear, pormenorizar e comparar o comportamento das duas tecnologias sob as óticas de desempenho eletromecânico e engenharia de confiabilidade sistêmica.

A abordagem metodológica adota uma perspectiva mista, de caráter qualitativo e quantitativo. A dimensão qualitativa compreende a análise comparativa estrutural das diferentes topologias de rotor, as características construtivas e o mapeamento físico dos modos de falha dominantes que acometem as máquinas em operação automotiva urbana. A dimensão quantitativa, por sua vez, consolida-se por meio do processamento computacional de indicadores probabilísticos de degradação temporal e da análise de métricas como o Tempo Médio Até a Falha (*Mean Time To Failure* – MTTF) e os tempos de vida segura (B_{10}) e mediana (B_{50}).

Os procedimentos técnicos fundamentaram-se em uma abordagem integrada dividida em duas grandes fases complementares:

- Fase Primária (Secundária de Base): A condução de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), estruturada através de protocolos internacionais de busca, filtragem e mineração de dados em bases científicas globais.
- Fase Secundária (Simulatória Aplicada): A modelagem matemática e análise estocástica por Diagramas de Blocos de Confiabilidade (*Reliability Block Diagrams* – RBD) e Análise por Árvore de Falhas (*Fault Tree Analysis* – FTA) utilizando o *software* ReliaSoft BlockSim. Nesta etapa, os subsistemas estruturais do *powertrain* (Bateria, Controlador, Distribuição de Potência e *Driver*) foram submetidos a testes de estresse estocástico ao longo de uma missão de longo prazo de até 35.000 horas.

Assim, a metodologia adotada possibilita uma análise comparativa entre as tecnologias PMSM e PMSynRM, combinando evidências teóricas e modelagem de confiabilidade. Os procedimentos descritos servem de base para a apresentação e discussão dos resultados obtidos nesta pesquisa.

1.6.1 Revisão Sistemática: Metodologia e Análise

A fundamentação teórica desta pesquisa e a validação das hipóteses que norteiam o problema de investigação deste trabalho foram conduzidas por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL). A RSL constitui um método de pesquisa secundária padronizado. Sua aplicação visa sintetizar, categorizar e auditar as informações disponíveis na literatura científica internacional sobre determinado tema, mitigando vieses de seleção e garantindo a reprodutibilidade e a objetividade na análise dos metadados extraídos (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003; KITCHENHAM; CHARTERS, 2007).

No presente estudo, o propósito central da RSL foi triplo:

1. Mapear os avanços de projeto e controle dos motores PMSM e PMSynRM aplicados à mobilidade elétrica leve;
2. Extrair dados quantitativos sobre a frequência de modos de falha e mecanismos de desgaste físico de rotores e estatores;
3. Subsidiar de forma empírica a calibração paramétrica dos modelos de confiabilidade matemática que alimentaram as análises de modelagem computacionais do *software* BlockSim.

Desta forma, a RSL proporcionou um conjunto de evidências científicas acerca das tecnologias PMSM e PMSynRM, identificando tendências de desenvolvimento, mecanismos predominantes de falha e parâmetros relevantes para a modelagem de confiabilidade. Os resultados obtidos nesta etapa constituíram a base teórica e quantitativa necessária para o desenvolvimento das análises de confiabilidade e comparativas realizadas nas fases subsequentes da pesquisa.

1.6.1.1 Protocolo de Pesquisa

O protocolo de pesquisa estabeleceu a estratégia formal de busca (Apêndice A), seleção e extração, submetendo os artigos selecionados a um modelo padronizado de auditoria denominado formulário de extração (*Extraction Form*), conforme Quadro 11.

1.6.1.1.1 *Questões de Pesquisa*

As perguntas norteadoras (*Research Questions* – RQ) foram formuladas com o escopo de direcionar a coleta de evidências para responder ao problema de investigação:

- RQ1: Quais as principais vantagens técnicas, econômicas e de eficiência operacional da topologia PMSynRM frente ao PMSM convencional no cenário de veículos elétricos de passeio e utilitários leves (categorias M1 e N1)?
- RQ2: Quais são os principais avanços reportados em termos de algoritmos de controle eletrônico e metodologias de fabricação do rotor para mitigar o torque pulsante (*ripple*) e aumentar a estabilidade mecânica do PMSynRM?
- RQ3: Quais são as tendências temporais e de distribuição geográfica das publicações científicas sobre essas tecnologias?
- RQ4: Quais são os modos de falha dominantes identificados na literatura técnica para ambas as máquinas e como eles afetam a vida útil sob regimes operacionais severos?

As questões de pesquisa constituem o eixo orientador desta Revisão Sistemática da Literatura, direcionando a obtenção de evidências relevantes para a análise comparativa das tecnologias estudadas e para a construção dos modelos de confiabilidade desenvolvidos.

1.6.1.1.2 Fontes de Dados e Estratégia de Busca

A busca eletrônica cobriu as principais bases indexadas de relevância científica e tecnológica global: *IEEE Xplore*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, *MDPI*, *SciELO* e *Web of Science*. Como fontes secundárias para complementar a varredura e capturar a produção acadêmica nacional, incluíram-se o *Google Scholar* e os repositórios digitais de teses e dissertações da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

A estratégia de busca executou a seguinte *string* de pesquisa booleana:

("synchronous reluctance motor" OR "permanent magnet assisted synchronous reluctance motor" OR "reluctance motor") AND ("electric vehicle" OR "light electric vehicle" OR "e-mobility" OR "electric scooter" OR "electric bike") AND ("comparison" OR "performance" OR "design" OR "control" OR "efficiency" OR "PMSM")

1.6.1.1.3 Critérios de Inclusão e Exclusão

Como critérios de inclusão, definiram-se: artigos técnicos publicados em periódicos (*journals*) ou anais de congressos (*proceedings*) de relevância na área de engenharia no intervalo temporal entre 2014 e 2026; redigidos nos idiomas inglês ou português; e que apresentassem foco na análise comparativa de desempenho, parametrização ou modelagem de motores síncronos de relutância (puros ou assistidos) e PMSM aplicados ao setor de transporte elétrico. Foram excluídos estudos com foco exclusivo em eletrônica de potência isolada, modelagens puramente magnéticas sem correlação com o sistema de tração veicular ou artigos duplicados entre bases.

1.6.1.2 Processos de Seleção e Extração de Dados

O rastreamento e a seleção das evidências científicas seguiram rigidamente as quatro etapas recomendadas pelo fluxo *PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)* conforme detalhado no Apêndice A:

1. Identificação: A busca automatizada nas bases de dados retornou um montante inicial de 113 artigos científicos.
2. Triagem: Realizou-se a leitura sistemática de títulos e resumos para avaliar o alinhamento temático bruto. Nesta etapa, descartaram-se estudos tangenciais, resultando em 68 artigos pré-selecionados, os quais foram catalogados e registrados no *Extraction Form*.
3. Elegibilidade: Os 68 artigos remanescentes foram submetidos à leitura integral e crítica de seus textos. Desses, 21 foram excluídos por não apresentarem dados comparativos robustos ou parâmetros quantitativos aplicáveis. Assim, consolidou-se um grupo de 47 artigos considerados elegíveis como base teórica e empírica final.
4. Inclusão: Os dados contidos nos 47 artigos elegíveis (Apêndice B – Quadro 12) foram processados de forma padronizada. Esse procedimento permitiu a tabulação cruzada dos parâmetros elétricos e das distribuições de falhas, minimizando vieses interpretativos na formulação da análise comparativa final.

1.6.1.3 Análise e Síntese dos Resultados

1.6.1.3.1 *Análise Descritiva*

A avaliação quantitativa dos metadados revelou importantes tendências para a engenharia automotiva:

- **Distribuição Temporal:** Evidenciou-se um crescimento exponencial no volume de publicações a partir do ano de 2021. O pico histórico concentrou-se no ano de 2023, registrando 17 publicações, seguido de perto pelos anos de 2022 e 2024, com 13 publicações cada. Esse comportamento estatístico reflete o aquecimento do mercado global de veículos elétricos e a corrida industrial por motores alternativos eficientes.
- **Distribuição Geográfica:** A liderança científica no setor é exercida pela China e pelos Estados Unidos, acumulando 14 artigos de relevância cada, seguidos pela Índia, com 11 artigos. Esses países figuram como os epicentros de desenvolvimento de soluções de mobilidade urbana sustentável de alta eficiência e baixo custo.
- **Metodologias Aplicadas:** As pesquisas baseadas em análises de modelagem computacionais avançadas (como Método de Elementos Finitos – MEF e análises de dinâmica sistêmica) predominam em 34,33% do portfólio selecionado, enquanto as análises experimentais em bancadas e dinamômetros respondem por 19,4% dos estudos. O equilíbrio entre análises de modelagem computacionais de projeto e validações práticas demonstra que a tecnologia dos motores de relutância assistida está em fase avançada de maturação e consolidação industrial.

Os resultados da análise descritiva confirmam a expansão global das pesquisas relacionadas aos motores síncronos aplicados à mobilidade elétrica, evidenciando a relevância tecnológica e científica do tema e justificando sua investigação neste estudo.

1.6.1.3.2 *Análise Temática*

O agrupamento crítico das evidências científicas resultou em quatro eixos temáticos fundamentais que justificam e embasam as hipóteses deste TCC:

- **Custo e Sustentabilidade:** A literatura aponta que a topologia PMSynRM possibilita uma redução de custos de fabricação que varia entre 25% e 30% em relação ao PMSM tradicional (FAVOT; MASSARUTTO, 2019). Esse ganho decorre diretamente da substituição parcial do torque de origem magnética pelo torque de relutância, mitigando a dependência severa de ímãs de terras raras (*NdFeB*) e protegendo os fabricantes contra a volatilidade da cadeia de suprimentos.
- **Desempenho Eletromecânico:** Ambas as topologias alcançam níveis de eficiência energética em regime permanente acima de 95%. No entanto, as evidências denotam que, devido ao menor torque específico por unidade de volume intrínseco à relutância, o PMSynRM demanda um discreto sobredimensionamento volumétrico e de massa para igualar o torque de pico do PMSM (BOLDEA; TUTELEA, 2010; KRISHNAN, 2017).
- **Métricas de NVH (*Noise, Vibration, and Harshness*):** O maior torque pulsante (*ripple*) e as forças radiais assimétricas manifestam-se como o principal desafio de projeto do PMSynRM, exigindo técnicas avançadas de controle vetorial e otimização geométrica do rotor (como a inclinação de canais ou *skewing*).
- **Robustez e Confiabilidade:** O eixo de maior contribuição para este trabalho revela que o PMSynRM apresenta comportamento superior sob condições térmicas extremas. A ausência ou redução drástica de massas concentradas de ímãs no rotor minimiza o risco de falhas por desmagnetização sob sobrecorrentes ou picos de temperatura, conferindo à máquina características intrínsecas de alta tolerância a falhas e robustez mecânica.

Em síntese, os resultados da análise temática insicam que a substituição parcial dos PMSM por PMSynRM envolve um equilíbrio entre desempenho, custo e confiabilidade. As evidências encontradas sugerem que os ganhos em sustentabilidade, robustez térmica e independência de materiais críticos podem compensar as limitações associados ao torque específico e ao comportamento vibracional, fornecendo suporte teórico às hipóteses investigadas nesta pesquisa.

1.6.1.4 Considerações Finais da Revisão

As evidências consolidadas pela RSL confirmam a viabilidade da hipótese deste trabalho. Enquanto o motor PMSM permanece como a solução de referência

para cenários que exigem densidade de potência e desempenho dinâmico extremos, o motor PMSynRM consolida-se como a alternativa mais equilibrada e sustentável para o segmento de veículos elétricos de passeio e utilitários leves (categorias M1 e N1) operando sob regimes de tráfego urbano intermitente.

A maior contribuição desta revisão sistemática deste TCC reside no fornecimento do lastro empírico e estatístico para o capítulo de análise de confiabilidade. Ao mapear as distribuições temporais e os pesos de falhas industriais (rolamentos, isolamento elétrico e desmagnetização magnética), a RSL permitiu abandonar hipóteses puramente hipotéticas ou arbitradas de literatura (como o uso de um fator de forma, da Distribuição de Weibull, genérico fixo ($\beta = 1,6$)).

Em vez disso, os metadados da revisão atuaram como dados de entrada (*inputs*) fundamentais para modelar o comportamento de riscos concorrentes através da formulação da média harmônica ponderada. Esse procedimento viabilizou a calibração do parâmetro de forma efetivo da Distribuição de Weibull ($\beta_{eff} = 2,30$ para o PMSynRM e $\beta_{eff} = 2,40$ para o PMSM) e o cálculo das vidas características finais (η), os quais alimentaram as análises de modelagem computacionais em Diagrama de Blocos de Confiabilidade (*RBD*) executadas no *software* ReliaSoft BlockSim. Assim, a RSL forneceu o embasamento empírico para a calibração dos parâmetros de degradação utilizados na análise computacional trazendo resultados analíticos e preditivos discutidos no Capítulo 4.

2 FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA E DESEMPENHO DOS MOTORES

2.1 Tecnologias de Motores Síncronos aplicadas à Mobilidade Elétrica

O funcionamento dos motores elétricos fundamenta-se na conversão eletromecânica de energia, processo que ocorre pela interação entre campos magnéticos gerados no estator e no rotor. Esse fenômeno é regido por leis fundamentais, como a Lei de Faraday da Indução Eletromagnética, que estabelece a indução de uma força eletromotriz a partir da variação do fluxo magnético, e a Lei de Lenz, que descreve a oposição dessa força à variação que a produziu (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2013; ALEXANDER; SADIKU, 2017). No âmbito dos veículos elétricos, os motores síncronos ganharam protagonismo por permitirem que o rotor gire em sincronismo com o campo magnético girante do estator, resultando em um controle preciso de velocidade e elevada eficiência energética (BOLDEA; NASAR, 2010).

Dentre as topologias síncronas, os Motores Síncronos de Ímãs Permanentes (PMSM) estabeleceram-se como o padrão de referência da indústria automotiva. Sua proeminência deve-se à superior densidade de potência e torque, viabilizada pelo uso de ímãs de alta energia, como o Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB), que produzem um campo magnético constante sem a necessidade de corrente de excitação no rotor (KRISHNAN, 2017; RAHMAN et al., 2016). Sob o controle vetorial de campo orientado (*Field-Oriented Control* – FOC), essas máquinas apresentam resposta dinâmica rápida, sendo o tipo IPMSM (*Interior Permanent Magnet Synchronous Motor*) a configuração preferida em modelos de alto desempenho, como o Tesla *Model 3* e o Nissan *Leaf*, por proteger os ímãs contra forças centrífugas e otimizar o torque de relutância adicional (BLAABJERG; CHEN, 2018; WANG et al., 2016).

Entretanto, a dependência estratégica de materiais de terras raras e a volatilidade de seus custos impulsionaram o desenvolvimento de alternativas como o Motor Síncrono de Relutância com Ímãs Permanentes (PMSynRM). Esta tecnologia representa uma evolução híbrida que combina o torque de relutância, gerado pela geometria de barreiras de fluxo no rotor, com o torque magnético proveniente de pequenas inserções de ímãs (BOLDEA; TUTELEA, 2010; VAS, 2013). Diferente do PMSM convencional, o PMSynRM busca reduzir drasticamente a quantidade de

material magnético caro, oferecendo maior robustez mecânica e térmica, além de um excelente custo-benefício (ZHANG et al., 2020). Estudos apontam que o PMSynRM pode atingir níveis de eficiência de até 97% utilizando apenas uma fração da massa de ímãs exigida por um PMSM equivalente, o que o torna uma solução altamente sustentável (CHEN et al., 2019).

Nesse contexto, a aplicação dessas máquinas em veículos elétricos convencionais exige um equilíbrio rigoroso entre desempenho, custo e confiabilidade sistêmica (CHAU; CHAN, 2007). Enquanto o PMSM continua a dominar o segmento onde a densidade de potência máxima é o requisito primordial, o PMSynRM tem ganhado espaço como a solução prospectiva para a produção em larga escala, visando mitigar impactos ambientais da mineração e garantir a viabilidade comercial sem comprometer a autonomia do veículo (HOFMANN; LIU, 2018; WANG et al., 2016). A escolha tecnológica, portanto, deixa de ser meramente baseada em curvas de torque e velocidade, passando a integrar análises de confiabilidade e disponibilidade de materiais no ciclo de vida do *powertrain* elétrico.

No Quadro 1 podemos observar um comparativo geral entre os motores discutidos nesse trabalho.

Quadro 1 – Comparativo geral entre os motores PMSM, IPMSM, SynRM, PMSynRM e BLDC

Topologia	Característica principal	Observação
PMSM	Utiliza ímãs permanentes no rotor	Alta densidade de torque
IPMSM	Ímãs permanentes internos ao rotor	Muito usado em veículos elétricos
SynRM	Não usa ímãs permanentes	Torque por relutância
PMSynRM	Usa relutância e pequena assistência por ímãs	Reduz a dependência de terras raras
BLDC	Motor com ímãs permanentes e comutação eletrônica	Mais comum em aplicações de menor porte

Fonte: Autoria própria (2026).

2.2 Análise Comparativa de Desempenho: Torque vs. Velocidade

A análise da relação entre torque e velocidade é o ponto central para compreender a viabilidade operacional das máquinas de relutância frente aos motores de ímãs permanentes (PMSM). Historicamente, motores de relutância pura eram vistos como limitados em densidade de torque e estabilidade em altas rotações. No entanto, o caráter "prospectivo" deste estudo reside na evolução dessas máquinas para a topologia de relutância assistida (PMSynRM).

2.2.1 Densidade de Torque e o Desafio da Relutância Pura

Conforme apontado por Lavrinovicha e Dirba (2014), a capacidade de gerar torque por unidade de volume é um dos principais critérios de seleção para veículos elétricos convencionais. Em motores de pequena e média potência (1 kW a 2,5 kW), a relutância pura (SynRM) apresenta uma desvantagem volumétrica: o motor PMSM com ímãs de Neodímio consegue produzir um torque 1,55 vezes superior para o mesmo volume físico (LAVRINOVICHA; DIRBA, 2014).

Essa diferença ocorre porque o motor de relutância depende exclusivamente da anisotropia magnética do rotor (diferença de relutância entre os eixos). Para mitigar essa limitação sem recorrer ao uso massivo de terras raras, a indústria prospecta o uso do PMSynRM, que utiliza pequenas quantidades de ímãs (muitas vezes de ferrite) para preencher as barreiras de fluxo, elevando o torque em cerca de 15% sem alterar o tamanho da máquina (LARQVIST; ÖSTERGREN, 2017).

2.2.2 Estabilidade em Altas Velocidades e Enfraquecimento de Campo

Um dos maiores trunfos da tecnologia de relutância assistida surge na região de altas rotações, conhecida como região de enfraquecimento de campo (*field weakening*). Motores de relutância síncrona puros (SynRM) sofrem uma queda de torque muito mais acentuada após a velocidade nominal, o que limita sua performance em rodovias (LARQVIST; ÖSTERGREN, 2017).

A inclusão de ímãs de baixo custo no rotor de relutância (transformando-o em um PMSynRM) altera esse perfil. De acordo com Larqvist e Östergren (2017), é demonstrado que a assistência por ímãs permite que o motor mantenha uma entrega de potência muito mais estável em altas rotações, aproximando-se do comportamento

do motor PMSM de alto desempenho, mas com um custo de material e impacto ambiental significativamente menores.

2.2.3 Suavidade de Operação e *Ripple* de Torque

Apesar da eficiência competitiva observada em testes laboratoriais — onde o motor de relutância pode atingir índices próximos a 88% (PATIL; SAXENA; PAHARIYA, 2023) — a produção de torque baseada em relutância tende a apresentar um maior *ripple* (oscilação de torque).

Patil, Saxena e Pahariya (2023) destacam que, enquanto o PMSM oferece uma transição suave de torque devido à sua força contra-eletromotriz senoidal, os motores que dependem fortemente da relutância exigem algoritmos de controle mais avançados (como o controle vetorial por FPGA ou DSP) para minimizar vibrações e ruídos acústicos. Essa necessidade de controle preciso é o que define o estágio atual de desenvolvimento prospectivo das máquinas de relutância assistida.

2.2.4 Síntese Comparativa: Relutância vs Ímãs Permanentes

Como forma de consolidar as análises anteriores, o Quadro 2 resume as principais métricas de desempenho. Complementarmente, a Figura 1 que ilustra o comportamento dinâmico dessas tecnologias, destacando como a assistência por ímãs de ferrite no motor PMSynRM é capaz de estender o regime de torque constante e estabilizar a curva de potência em altas rotações.

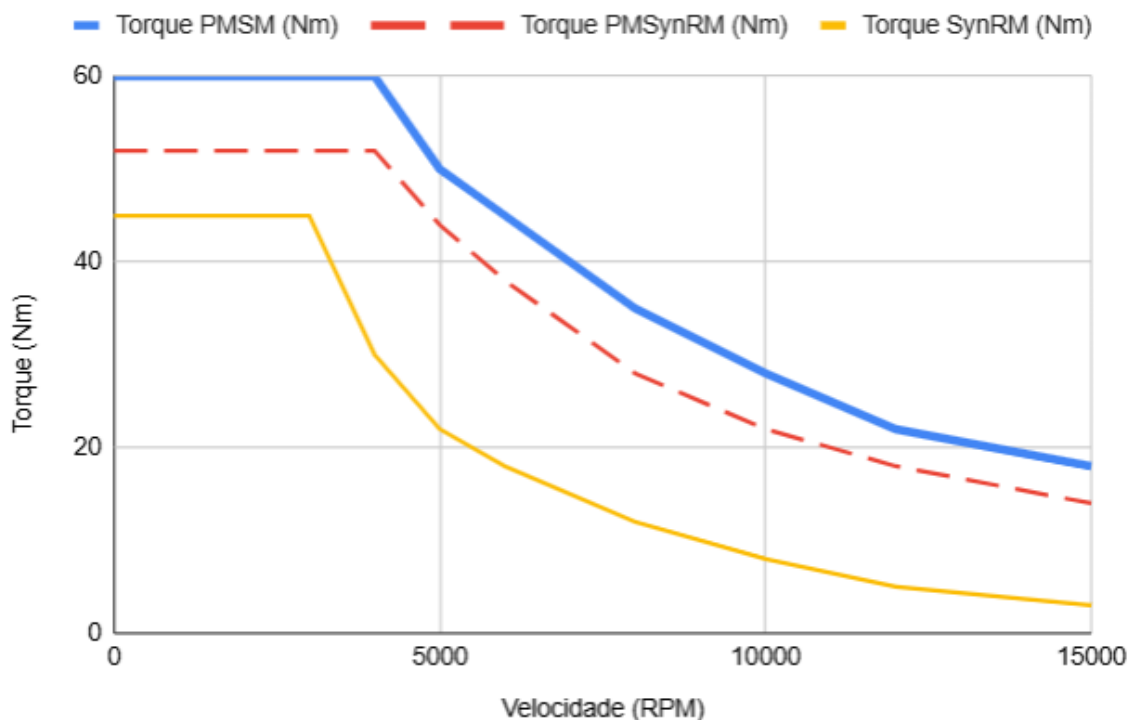
Quadro 2 – Comparativo de indicadores de desempenho dinâmico entre PMSM, SynRM e PMSynRM

Parâmetro de Desempenho	PMSM (Referência)	SynRM (Relutância Pura)	PMSynRM (Prospectivo)
Torque de Partida	Máximo (LAVRINOVICHA, 2014)	Moderado	Elevado (Assiste a partida)
Queda de Torque em Alta Rotação	Suave / Estável	Brusca / Acentuada	Estabilizada pelos ímãs

Linearidade do Torque	Alta (Baixo <i>ripple</i>)	Baixa (Alto <i>ripple</i>)	Moderada
Independência de Terras Raras	Baixa (Dependente)	Total (100% livre)	Alta (Usa ímãs simples)
Eficiência em Ciclo Urbano	Excelente	Boa	Excelente (LARQVIST, 2017)

Fonte: Autoria própria (2026) com base em Patil et al. (2023), Larqvist e Östergren (2017) e Lavrinovicha e Dirba (2014)

Figura 1 - Curvas envoltórias de torque versus velocidade: comparação entre a referência de mercado (PMSM), a base tecnológica (SynRM) e a solução prospectiva (PMSynRM)



Fonte: Autoria própria (2026) com base em Patil et al. (2023), Larqvist e Östergren (2017) e Lavrinovicha e Dirba (2014)

A Figura 1 apresenta o comportamento comparativo de torque em função da rotação, consolidando o caráter prospectivo deste estudo ao demonstrar a evolução do desempenho das máquinas de relutância. A análise visual desta curva envoltória permite compreender as limitações e potencialidades de cada tecnologia ao longo de todo o regime operacional:

1. Região de Torque Constante (0 a 4.000 RPM): Nesta fase inicial, observa-se que a linha azul, que representa o motor PMSM (NdFeB), e a linha vermelha

tracejada, que representa o PMSynRM (Ferrite), mantêm um patamar de torque elevado e estável. Isso demonstra a superioridade dos motores assistidos por ímãs em vencer a inércia do veículo com maior eficiência. Já a linha amarela, referente ao motor de relutância pura (SynRM), inicia a operação em um nível inferior por depender exclusivamente da anisotropia magnética do rotor.

2. Velocidade Base e Início do Enfraquecimento de Campo: À medida que a velocidade aumenta, nota-se que a linha amarela (SynRM) é a primeira a declinar, atingindo sua velocidade nominal precocemente (por volta de 3.000 RPM). Conforme discutido por Larqvist e Östergren (2017), a ausência de ímãs limita a gestão do fluxo em altas rotações, resultando em uma perda de torque prematura. Em contraste, a assistência magnética permite que as linhas azul e vermelha sustentem o torque máximo por mais tempo, até aproximadamente 4.000 RPM.
3. Região de Alta Velocidade (Acima de 5.000 RPM): Este é o ponto onde o motor PMSynRM justifica sua viabilidade estratégica. Enquanto a linha amarela (SynRM) sofre uma queda brusca e acentuada, tornando-se ineficaz para velocidades rodoviárias elevadas, a linha vermelha (PMSynRM) consegue manter uma curva de decaimento suave e muito próxima à da linha azul (PMSM).

Essa proximidade entre a linha vermelha e a azul prova que a simples adição de ímãs de baixo custo (ferrite) no rotor de relutância é capaz de mitigar a queda de performance em altas rotações. Como resultado, o motor PMSynRM apresenta-se como uma alternativa tecnicamente equilibrada, oferecendo um desempenho competitivo com a tecnologia de ímãs de neodímio, porém com menor custo e maior sustentabilidade (LARQVIST; ÖSTERGREN, 2017; LAVRINOVICHA; DIRBA, 2014).

2.3 Considerações sobre a Viabilidade das Topologias

De acordo com os tópicos discutidos nas seções anteriores deste capítulo, observa-se que o motor PMSM oferece um desempenho consolidado e elevada densidade de potência, estabelecendo-se como a referência atual de mercado. Em contrapartida, as análises demonstram que o PMSynRM apresenta-se como uma alternativa estratégica superior no que tange à redução de custos e à mitigação da

dependência de terras raras, mantendo níveis de eficiência semelhantes (BOLDEA; TUTELEA, 2010; WANG et al., 2016).

Contudo, apesar da equivalência em termos de eficiência energética, as evidências levantadas na literatura indicam que ainda existem lacunas quanto ao comportamento dessas topologias em termos de confiabilidade sistêmica e custo de ciclo de vida. Tais fatores justificam o aprofundamento técnico que será realizado nas etapas seguintes deste trabalho, por meio da análise de arquiteturas de *powertrain* e das análises de modelagem computacionais de confiabilidade operacional (LEE; LIM; NAM, 2019).

2.4 Outras Topologias Síncronas: Motores BLDC e SynRM

Para fins de enriquecimento desta análise, cabe mencionar as tecnologias BLDC (*Brushless DC*) e SynRM (*Synchronous Reluctance Motor*) puro. O motor BLDC é amplamente utilizado em aplicações de baixa potência e veículos elétricos convencionais devido à sua simplicidade de controle e custo reduzido, embora apresente modos de falha específicos associados a sensores Hall e exposição de ímãs superficiais (KRISHNAN, 2017). Já o SynRM puro, caracterizado pela ausência total de ímãs no rotor, representa o limite superior da robustez mecânica e térmica, eliminando perdas Joule no rotor e riscos de desmagnetização, o que o torna um padrão de referência para durabilidade em ciclos operacionais severos, apesar de sua menor densidade de torque em relação às máquinas assistidas (MILLER, 2010; BOLDEA; TUTELEA, 2010).

3 ARQUITETURA DO *POWERTRAIN* E ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DOS COMPONENTES

3.1 Introdução

A transição dos veículos com motor de combustão interna para veículos elétricos a bateria (BEV, do inglês *Battery Electric Vehicle*) exige uma reavaliação completa da arquitetura de propulsão. Diferente dos sistemas mecânicos complexos dos motores de combustão interna, o *powertrain* elétrico caracteriza-se por uma maior integração eletromecânica e pelo uso intensivo de eletrônica de potência.

Este capítulo tem como objetivo detalhar a arquitetura típica de um *powertrain* aplicado a veículos elétricos de passeio e utilitários leves (categorias M1 e N1), descrevendo o fluxo de energia e a função de cada subsistema. Adicionalmente, será apresentada uma caracterização das taxas de falha destes componentes, baseada em estudos de caso e normas internacionais. Estes dados fundamentarão a análise comparativa de confiabilidade entre topologias de motores (PMSM e PMSynRM) e configurações de tração que será desenvolvida.

3.2 Arquitetura do Sistema de *Powertrain* em BEV

O sistema de *powertrain* de um veículo elétrico é o responsável por converter a energia química armazenada nas baterias em energia mecânica para as rodas. Embora existam diversas configurações possíveis (um motor central, motores nas rodas, eixos eletrificados), a arquitetura canônica para veículos elétricos convencionais segue um fluxo lógico de energia e sinal.

De acordo com a literatura especializada (EHSANI et al., 2018; TANG et al., 2021), o sistema pode ser dividido em quatro subsistemas principais interconectados:

1. Sistema de Bateria (Battery System): Fonte primária de energia.
2. Unidade de Distribuição de Energia (PDU - Power Distribution Unit): Gerencia a alta tensão.
3. Controlador do Motor (Motor Controller/Inversor): Converte DC para AC e controla o torque/velocidade.
4. Motor de Tração (*Drive Motor*): Conversor eletromecânico (foco deste estudo: PMSM ou PMSynRM).

3.2.1 Sistema de Bateria e Gerenciamento (BMS)

Responsável pelo armazenamento de energia, é composto por módulos de células de íons de lítio e pelo Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS, do inglês *Battery Management System*). O BMS monitora variáveis críticas como tensão, corrente e temperatura, garantindo a operação dentro dos limites de segurança (RAHMAN et al., 2016). Conforme observado em estudos de confiabilidade, este é frequentemente o subsistema com maior densidade de componentes e sensibilidade a falhas catastróficas (SHU et al., 2020).

3.2.2 Unidade de Distribuição de Energia (PDU)

A PDU atua como uma caixa de junção inteligente. Ela recebe a alta tensão da bateria e a distribui para o controlador do motor e outros auxiliares (como o compressor do ar-condicionado ou aquecedor PTC). Seus principais componentes são relés de alta potência, fusíveis de proteção e conectores de intertravamento (TANG et al., 2021). Falhas aqui geralmente resultam na perda total de propulsão por questões de segurança.

3.2.3 Controlador do Motor (Inversor de Tração)

Este subsistema é composto por eletrônica de potência, principalmente módulos de transistores bipolares de porta isolada (IGBTs) ou *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* MOSFETs de Carbetto de Silício (SiC), além de capacitores de *DC-link*.

Para os motores objeto deste estudo (PMSM e PMSynRM), o controlador desempenha um papel vital. Ele executa algoritmos vetoriais complexos (como FOC - *Field Oriented Control*) para gerenciar as correntes de eixo direto (d) e em quadratura (q). No caso do PMSynRM, a confiabilidade do controlador é ainda mais exigida, visto que o fator de potência tipicamente menor demanda correntes mais elevadas para o mesmo torque, aumentando o estresse térmico nos semicondutores (HUSAIN, 2010).

3.2.4 Motor de Tração

O motor converte a energia elétrica em mecânica. A estrutura física básica de um motor de tração inclui o estator (bobinamentos), rotor (com ímãs no PMSM ou barreiras de fluxo no PMSynRM), rolamentos, eixo e sensores de posição (*Resolver*

ou *Encoder*). Embora motores elétricos sejam robustos, eles estão sujeitos a estresses térmicos no isolamento e estresses mecânicos nos rolamentos devido a altas rotações (WANG et al., 2016).

Enquanto o estator é geralmente comum a ambas as tecnologias, o rotor diferencia o desempenho e a confiabilidade:

- PMSM: Utiliza ímãs permanentes inseridos ou sobrepostos ao rotor, apresentando alta densidade de potência, mas vulnerabilidade térmica (KRISHNAN, 2017).
- PMSynRM: Baseia-se no torque de relutância gerado por barreiras de fluxo no rotor, o que permite uma construção mecanicamente mais robusta e menor dependência de materiais críticos (BOLDEA; TUTELEA, 2010; WANG et al., 2016).

3.3 Arquiteturas de Redundância e Distribuição de Tração

A modularidade inerente aos sistemas de propulsão elétrica permite que veículos modernos migrem de uma arquitetura centralizada (monomotor) para sistemas de tração distribuída, utilizando múltiplas unidades de tração (Inversor + Motor). Do ponto de vista da Engenharia de Confiabilidade, o aumento do número de motores possibilita a configuração de sistemas do tipo k -de- n , nos quais o sistema total permanece funcional desde que uma quantidade mínima (k) de componentes entre o total disponível (n) opere corretamente (ZHU et al., 2021).

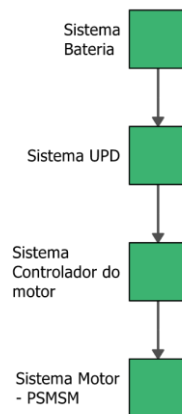
Na configuração clássica de motor único ($1 \times$ *powertrain*), como a encontrada no Nissan *Leaf*, o sistema opera estritamente em série, onde a falha de qualquer subsistema interrompe a tração. Em contrapartida, arquiteturas com dois motores (AWD - *All Wheel Drive*), comuns em modelos como o Tesla *Model 3*, introduzem uma redundância do tipo 1-de-2 para a função de tração por eixo, permitindo que o veículo mantenha a mobilidade básica em modo de emergência mesmo após a avaria de um dos motores (EHSANI et al., 2018).

O avanço para configurações de três motores (um frontal e dois traseiros, como no Tesla *Model S Plaid*) ou quatro motores (um por roda ou *in-wheel*, como na Rivian R1T) representa o caráter prospectivo da eletrificação. Estas arquiteturas não apenas otimizam a dinâmica veicular através da vetorização de torque (*torque vectoring*), mas elevam significativamente os índices de confiabilidade operacional. Segundo Tang et

al. (2021), embora a multiplicação de unidades de tração aumente a complexidade do sistema de distribuição (PDU) e das comunicações em tempo real (como o uso de protocolos Controller Area Network *with Flexible Data-Rate CAN-FD* ou *Ethernet*), ela mitiga o impacto de falhas isoladas, permitindo que algoritmos de controle tolerantes a falhas (*Fault Tolerant Control*) redistribuam o torque e garantam a sobrevivência da missão em cenários de degradação parcial. Esta premissa de redundância será a variável central para a análise de confiabilidade apresentada no próximo capítulo. Para fins de modelagem e análise computacional, este trabalho definiu quatro topologias de arranjo de motores, cujas conexões lógicas determinam a sobrevivência do sistema.

A Figura 2 apresenta a Arquitetura Monomotor, que serve como linha de base para o estudo. Nela, o fluxo de energia é estritamente linear, e a falha de qualquer subsistema interrompe integralmente a tração do veículo.

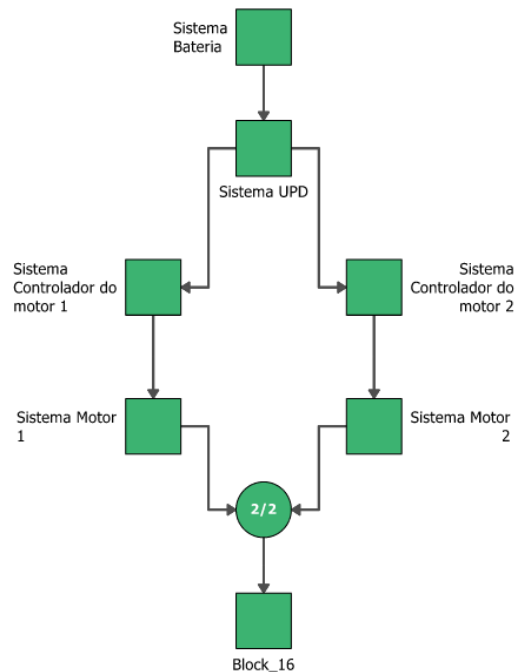
Figura 2 - Diagrama de blocos da arquitetura monomotor convencional.



Fonte: Autoria própria (2026), com base em TANG et al. (2021), utilizando o software ReliaSoft BlockSim.

Em seguida, a Figura 3 ilustra a Arquitetura de 2 Motores. Conforme indicado pelo bloco lógico '2/2', esta configuração opera em série do ponto de vista da confiabilidade sistêmica para tração integral: ambos os motores devem estar operacionais para garantir a dirigibilidade projetada.

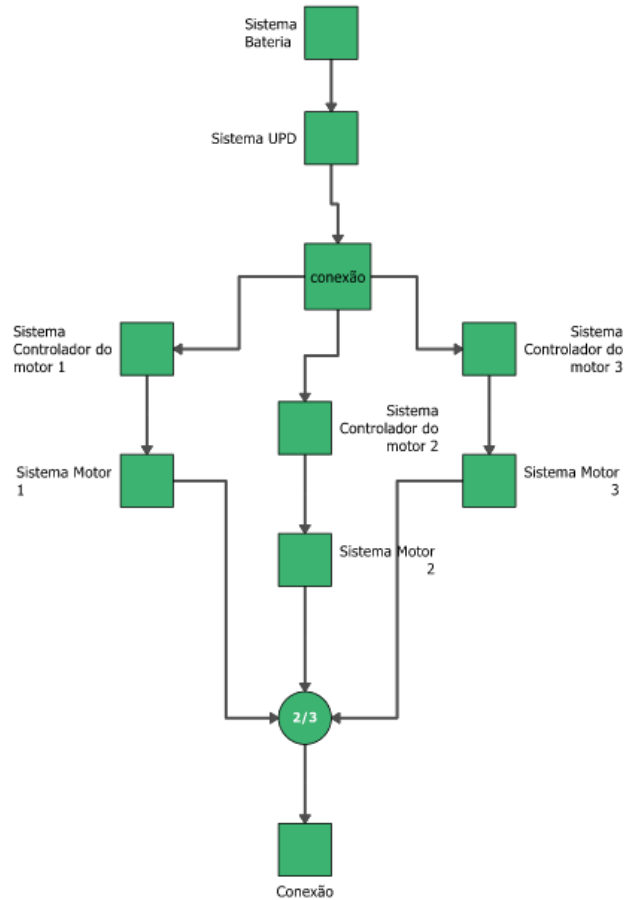
Figura 3 - Diagrama de blocos para arquitetura com dois motores em série.



Fonte: Autoria própria (2026), com base em TANG et al. (2021), utilizando o *software* ReliaSoft BlockSim.

A configuração que representa o maior salto de disponibilidade para a tecnologia PMSynRM é o Arranjo de 3 Motores, detalhado na Figura 4. Diferente das anteriores, esta arquitetura utiliza uma lógica de redundância parcial (2-de-3). Isso significa que, em caso de falha de uma das unidades motrizes, o sistema de controle isola o motor avariado e mantém a missão de transporte com as duas unidades remanescentes, mitigando a menor robustez intrínseca dos motores de relutância assistida.

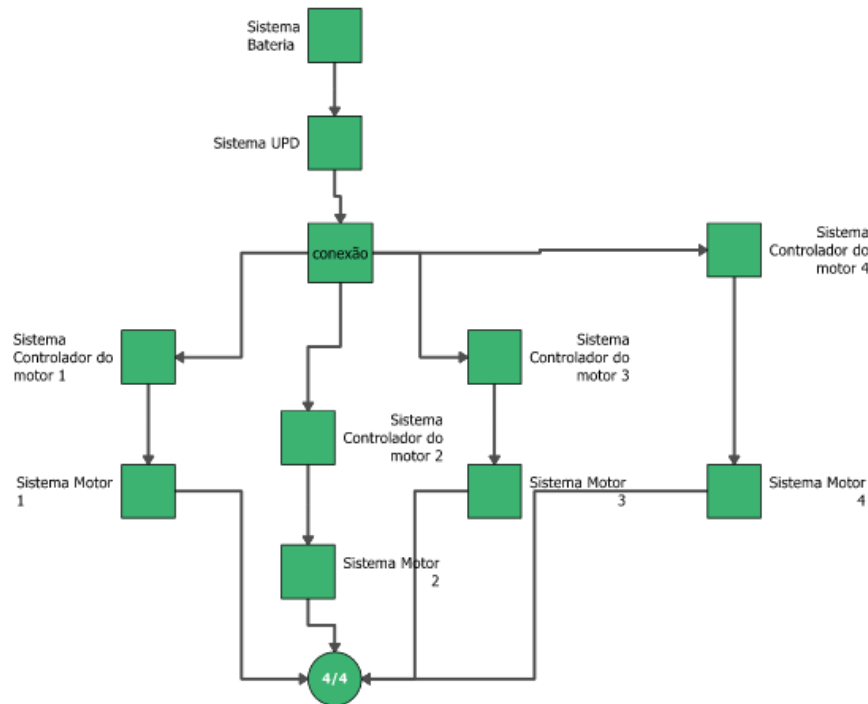
Figura 4 - Arquitetura de tração distribuída com redundância parcial (2-de-3).



Fonte: Autoria própria (2026), com base em TANG et al. (2021), utilizando o software ReliaSoft BlockSim

Por fim, a Figura 5 exibe o Arranjo de 4 Motores, comum em sistemas de alto desempenho com motores nas rodas (*in-wheel*). Contudo, sob a lógica '4/4' simulada, a complexidade do sistema aumenta o risco de indisponibilidade, visto que o colapso de qualquer um dos quatro braços de tração compromete a estabilidade dinâmica do veículo.

Figura 5 - Diagrama de blocos para arquitetura extrema com quatro motores.



Fonte: Autoria própria (2026), com base em TANG et al. (2021), utilizando o software ReliaSoft BlockSim

3.4 Distribuição e Análise de Falhas no *Powertrain*

As diferentes taxas de falhas que fundamentam este estudo foram especificadas no artigo de Tang et al. (2021). Os autores conduziram um estudo de caso detalhado utilizando normas como IEC TR62308 e MIL-HDBK-217F para decompor um *powertrain* típico de 35 kW, observando que a confiabilidade não é uniforme entre os componentes. A seguir, apresenta-se a decomposição das falhas que servirão de base para os cálculos deste estudo.

3.4.1 Taxas de Falha por Subsistema

A análise realizada por Tang et al. (2021) demonstra que, ao contrário do senso comum de que a bateria é o único ponto de atenção, o sistema de tração como um todo possui vulnerabilidades distribuídas. Os dados coletados e calculados por Tang et al. (2021) indicam as seguintes taxas de falha agregadas (λ_s):

- Sistema de Bateria (λ_{s1}): Apresenta a maior taxa de falha, estimada em 9,251 falhas por milhão de horas (FPMH). Isso se deve à complexidade das células eletroquímicas e à eletrônica do BMS.

- Motor de Tração ($\lambda s4$): É o segundo subsistema mais crítico, com 5,990 FPMH.
- Controlador do Motor ($\lambda s3$): Apresenta uma taxa de 1,715 FPMH.
- PDU ($\lambda s2$): É o componente mais robusto, com 0,954 FPMH.

O Quadro 3 resume a contribuição de falha dos componentes críticos dentro de cada subsistema, permitindo identificar os "elos fracos" da cadeia de tração, demonstradas por Tang, et al. 2021.

Quadro 3 – Decomposição das Taxas de Falha do *Powertrain*

Subsistema	Componente Crítico	Causa Principal / Observação	Taxa de Falha do Subsistema (FPMH)
Sistema de Bateria	Módulo de Bateria	Degradação química e falhas de conexão entre células. É o item mais vulnerável de todo o veículo.	9,251
Motor de Tração	Vedação e Rolamentos	Desgaste mecânico e fadiga. O retentor de óleo (oil seal) e rolamentos representam a maior parte das falhas mecânicas.	5,990
Controlador (Inversor)	Módulo de Controle e IGBTs	Estresse térmico nos semicondutores (ciclagens de temperatura).	1,715
PDU	Fusíveis	Fadiga térmica devido à passagem de alta corrente.	0,954

Fonte: Adaptado de Tang et al. (2021).

Assim, as taxas de falha apresentadas constituem os parâmetros de entrada utilizados na modelagem de confiabilidade dos subsistemas do powertrain. A adoção

desses valores, obtidos na literatura, assegura consistência técnica à construção dos modelos probabilísticos empregados nas análises subsequentes.

3.5 Considerações para o Estudo Comparativo (PMSM vs. PMSynRM)

As taxas de falha dos subsistemas que compõem o *powertrain*, apresentadas no Quadro 3, fornecem os parâmetros iniciais de referência para a modelagem computacional de confiabilidade desenvolvida no Capítulo 4. Embora a arquitetura geral (Bateria -> PDU -> Inversor -> Motor) seja idêntica para veículos equipados com PMSM ou PMSynRM, a distribuição de falha do Motor e do inversor sofrerá alterações dependendo da tecnologia escolhida:

- No PMSM: Há o risco adicional de desmagnetização dos ímãs permanentes sob altas temperaturas ou correntes de falha, um modo de falha inexistente em motores puramente de relutância, mas presente nos híbridos (TANG et al., 2021; KRISHNAN, 2017).
- No PMSynRM: A ausência ou redução de ímãs diminui riscos no rotor, mas a demanda por maior corrente de magnetização pode elevar a taxa de falha (λ) dos módulos IGBT no inversor e aumentar o estresse no isolamento do estator (TANG et al., 2021; HUSAIN, 2011).

Portanto, a modelagem de confiabilidade apresentada na sequência integra os dados estatísticos extraídos da literatura para projetar o comportamento de sobrevivência do veículo. Essa análise permite avaliar o impacto real de cada topologia de motor na confiabilidade global do sistema, considerando tanto a configuração de motor único quanto arranjos com múltiplos motores.

4 METODOLOGIA DE PARAMETRIZAÇÃO DOS MODELOS DE CONFIABILIDADE

Neste trabalho adotou-se a distribuição Weibull de dois parâmetros, assumindo Tempo Livre de Falha $\Gamma=0$. Essa escolha foi feita em razão da ausência de dados experimentais de falha que permitissem estimar de forma robusta um tempo livre de falha. Assim, os resultados obtidos devem ser interpretados de forma conservadora, pois não consideram eventual período mínimo de operação sem falhas que poderia ser identificado em ensaios de vida ou dados de campo.

Antes da descrição do processo de cálculo, é necessário definir o significado físico e a influência dos parâmetros que compõem a função de densidade de probabilidade de Weibull:

- **Parâmetro de Forma (β):** É um valor adimensional que determina o comportamento da taxa de falha ao longo do tempo.
 - **Influência:** Se $\beta < 1$, o sistema apresenta taxa de falha decrescente (mortalidade infantil). Se $\beta = 1$, a taxa é constante (falhas aleatórias). Neste estudo, utiliza-se $\beta > 1$, o que modela um regime de taxa de falha crescente, refletindo o desgaste mecânico e a degradação do isolamento térmico típicos de motores síncronos.
- **Parâmetro de Escala (η):** Também chamado de vida característica, é expresso em unidades de tempo (horas).
 - **Influência:** Representa o marco temporal em que se espera que **63,2%** da população de motores tenha falhado. Ele "estica" ou "encolhe" a distribuição ao longo do eixo do tempo, definindo a escala de durabilidade da tecnologia analisada.

A derivação desses parâmetros seguiu um fluxo estruturado em cinco etapas encadeadas. O Quadro 4 apresenta uma síntese deste fluxo, explicitando os requisitos de entrada e os resultados esperados de cada fase, servindo como guia para o detalhamento metodológico apresentado a seguir.

Quadro 4 – Fluxo Metodológico da Parametrização

Passo	Descrição	Entradas (Inputs)	Saídas (Outputs)
1	Levantamento das premissas e modos de falha	Revisão bibliográfica e dados de fabricantes.	Definição das falhas críticas.
2	Seleção da base de tempo referencial	Dados históricos e normas técnicas.	Vida característica base (η_{ref}).
3	Atribuição de severidade tecnológica	Análise construtiva (PMSM vs PMSynRM vs BLDC).	Fatores de ajuste de vida.
4	Cálculo dos parâmetros finais (β e η)	Algoritmo de parametrização.	Parâmetros de Weibull específicos.
5	Validação e Consolidação	Tabela de parâmetros finais.	Base de dados pronta para simulação.

Fonte: Autoria Própria (2026).

Com base na estrutura lógica estabelecida no Quadro 4, as seções subsequentes detalham o rigor técnico e as fontes de dados utilizadas em cada uma das cinco etapas de parametrização. O processo inicia-se pelo levantamento das premissas que definem os modos de falha preponderantes para as máquinas elétricas analisadas, conforme descrito a seguir.

4.1 Passo 1 - Levantamentos das premissas para escolha dos modos de falha

A distribuição dos modos de falha preponderantes baseia-se nos dados compilados no Quadro 5.

Quadro 5 – Levantamento das premissas para determinação dos modos de falha preponderantes

Dado extraído	Valor	Implicação para o modelo
Falhas de rolamentos	50–70 %	Modo dominante $\rightarrow \beta > 2$ (<i>wear-out</i>)
Falhas de enrolamento/isolação	20–30 %	Segundo modo mais frequente
Taxa de falha λ (mot. síncronos, utilidade)	0,0762 fal/un·ano	Base para estimar MTBF e η

Taxa de falha λ (mot. indução industriais)	0,0714–0,0824 fal/un·ano	Faixa de referência para motores ≤ 55 kW
--	--------------------------	---

Fontes: IEEE 493(2007), Albrecht et al. (1986) e Motor Reliability Working Group (1985)

4.2 Passo 2 – Determinação do parâmetro de escala da distribuição Weibull

Para fundamentar a análise computacional em dados operacionais reais, a determinação do parâmetro de escala (η) da distribuição Weibull foi realizada a partir de uma taxa de falha anual de referência extraída do IEEE Std 493-2007 (Gold Book). O procedimento metodológico consistiu na conversão de taxas de falha populacionais em um tempo médio de vida alvo (MTTF), seguido pelo ajuste estatístico para a escala Weibull.

Inicialmente, considerou-se a taxa de falha anual para motores síncronos industriais de grande porte (geralmente acima de 200 hp ou de classe de tensão superior), estabelecida em $\lambda = 0,0762$ falhas por unidade ao ano. Sob a premissa inicial de uma função densidade de probabilidade de falha exponencial e portanto, com taxa de falha constante para fins de referência, o Tempo Médio Entre Falhas (MTBF) é calculado pelo inverso da taxa de falha, conforme a Equação (1):

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (1)$$

Substituindo-se o valor da taxa de falha:

$$MTBF = \frac{1}{0,0762} = 13,1 \text{ anos}$$

Considerando o regime de operação padrão de 8.760 horas anuais, o valor equivalente em horas é:

$$MTBF = 13,1 * 8760 \approx 114.800 \text{ horas}$$

Todavia, os dados de referência do IEEE representam motores de grande porte utilizados em aplicações de utilidade pública ou infraestrutura pesada. Para motores de tração elétrica veicular na faixa de 60 kW a 150 kW, que operam sob alta densidade de potência, ciclos térmicos intermitentes e vibrações mecânicas inerentes ao tráfego urbano, aplicou-se um fator de severidade operacional ($k_s = 0,61$). Este ajuste, fundamentado em estudos de transposição de confiabilidade para regime severo, reduz a vida média esperada para refletir a realidade das categorias M1 e N1. O tempo médio de vida alvo ($MTTF_{alvo}$) foi definido por:

$$MTTF_{alvo} = 114.800 * 0,61$$

$$MTTF_{alvo} \approx 70.000 \text{ horas}$$

O fator de severidade operacional adotado neste estudo foi utilizado como coeficiente de transposição entre o regime de operação de motores industriais de referência e o regime mais severo de motores de tração veicular. A adoção de ($k_s = 0,61$) representa uma redução conservadora da vida média de referência, de 114.800 horas para aproximadamente 70.000 horas, refletindo os efeitos combinados de maior densidade térmica, operação intermitente, vibrações mecânicas, ciclos de carga variáveis e restrições de dissipação térmica típicas de aplicações automotivas. Por se tratar de um coeficiente heurístico de modelagem, seu valor não deve ser interpretado como constante universal, mas como uma hipótese de engenharia destinada a evitar a superestimação da confiabilidade do motor em regime veicular

Partindo da hipótese adotada de severidade operacional igual a 0,61, observa-se que ao modificar essa hipótese o valor do tempo médio de vida ajustado também varia. Essa influência é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Outros fatores de severidade operacional

k_s	$MTTF_{ajustado}$
0,50	57.400h
0,61	70.028h
0,70	80.360h
0,80	91.840h

Fonte: Autoria própria (2026).

4.2.1 Conversão de MTTF para Parâmetro de Escala Weibull

Para uma distribuição Weibull de dois parâmetros, o tempo médio até a falha é definido pela Equação (2):

$$MTTF = \eta * \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2)$$

onde:

- $MTTF$ = tempo médio até a falha;
- η = parâmetro de escala da Weibull;
- β = parâmetro de forma;

- $\Gamma(\cdot)$ = função Gama.

Adotando-se o valor dominante $\beta = 2,8$, obteve-se:

$$\Gamma\left(1 + \frac{1}{2,8}\right) = 0,891$$

Desta forma, o parâmetro de escala de referência (η_{base}) é obtido isolando-se a variável de escala, conforme a Equação (3):

$$\eta_{base} = \frac{MTTF_{alvo}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta_{dom}}\right)} \quad (3)$$

Substituindo os valores:

$$\eta_{base} = \frac{70.000}{0,891}$$

$$\eta_{base} \approx 78.563h$$

Por critério de arredondamento, fixou-se o valor de $\eta_{base} = 80.000h$ como o parâmetro de escala inicial. Este valor serve como a linha de base para o motor de maior robustez estrutural (SynRM), sobre o qual são aplicadas as penalidades relativas à introdução de ímãs e complexidades rotóricas das topologias PMSM e PMSynRM.

A utilização de $\beta = 2,8$ indica que o sistema é modelado sob um regime de taxa de falha crescente, o que é condizente com os mecanismos de degradação física (fadiga e isolamento térmico) que predominam em motores síncronos após o período de mortalidade infantil. Desta forma, o modelo permite uma análise preditiva da vida B_{10} e da confiabilidade da missão de tração ao longo do tempo.

A taxa de falha da literatura foi usada apenas para obter uma vida média de referência. A forma da distribuição (β) não foi herdada dessa taxa, ela foi definida posteriormente com base na física dos modos de falha predominantes, como: desgaste de rolamentos, degradação de isolamento e desmagnetização.

A taxa de falha anual de referência foi utilizada apenas como métrica agregada para estimar uma vida média inicial. A partir dessa vida média, adotou-se uma distribuição de Weibull com parâmetro de forma $\beta > 1$, definido com base nos modos físicos de falha predominantes, de modo a representar o comportamento de desgaste progressivo dos motores. Assim, a taxa de falha de referência não implica que o modelo final seja exponencial, ela apenas fornece uma ancoragem temporal para a parametrização da Weibull.

4.2.2 Determinação da Vida Característica de Referência (η_{base})

Para a calibração inicial do modelo probabilístico, adotou-se como parâmetro de partida a taxa de falha anual (λ) de 0,0762 falhas por unidade ao ano. Este valor fundamenta-se nos levantamentos estatísticos consolidados pelo IEEE Std 493-2007 (Gold Book). Sob a perspectiva da análise populacional, este índice estabelece que, em uma amostra de 100 motores operando sob condições similares durante o período de um ano, a ocorrência esperada é de aproximadamente 7,62 falhas.

A escolha deste parâmetro justifica-se por sua compatibilidade com registros históricos de máquinas síncronas e de indução de grande porte (potência superior a 200 hp) e classes de tensão entre 1.000 V e 5.000 V, cujas taxas de falha típicas situam-se na faixa de 0,07 a 0,08 falhas/unidade·ano. Especificamente, a literatura técnica de referência cita o valor de 0,0762 como a métrica de maior acurácia para motores síncronos industriais.

Embora o escopo deste estudo contemple motores de tração na faixa de 60 kW a 150 kW, a adoção desse dado como *baseline* provê uma base estatística robusta e conservadora. Para transpor esse cenário de utilidade pública para o regime de operação veicular severo das categorias M1/N1, procedeu-se ao cálculo do Tempo Médio Entre Falhas (MTBF)

Este montante representa o tempo médio de vida esperado antes da aplicação dos fatores de severidade e ajustes de topologia rotórica, servindo como o lastro empírico para a derivação dos parâmetros de Weibull utilizados nas análises de modelagem computacionais subsequentes.

4.2.3 Lógica de Transposição da Taxa de Falha para Métrica Temporal

A conversão da taxa anual λ para o valor de MTBF em horas baseia-se na premissa inicial de uma distribuição exponencial, na qual a taxa de falha é considerada constante ao longo do tempo. Esta etapa é fundamental para estabelecer uma ancoragem temporal a partir de dados puramente populacionais. Ao aplicar a relação $MTBF = 1/\lambda$, o objetivo é sintetizar a experiência de campo acumulada em registros industriais — que são apresentados como uma média agregada de falhas por unidade-ano — em um valor discreto de tempo médio.

É importante ressaltar que, nesta fase do desenvolvimento, o dado ainda é tratado sob uma perspectiva de taxa média populacional. Essa ponte metodológica é

necessária para transpor uma estatística de serviço para uma métrica de projeto. Embora o modelo final de análise computacional utilize a distribuição de Weibull para representar o desgaste físico, o cálculo do MTBF em horas serve como o parâmetro de centralidade bruta.

Dessa forma, o valor arredondado de 114.800 horas não representa ainda a vida característica do motor, mas sim o ponto de partida cronológico derivado da literatura. Sobre este valor, serão aplicados os ajustes de severidade operacional e a modelagem de riscos concorrentes, permitindo que a taxa de falha deixe de ser constante (Exponencial) e passe a ser crescente (Weibull), refletindo o envelhecimento real dos componentes do motor nas categorias M1/N1.

4.2.4 Distinção Terminológica e a Transição entre MTBF e MTTF

A fundamentação estatística deste estudo exige a distinção entre os termos *Mean Time Between Failures* (MTBF) e *Mean Time To Failure* (MTTF). Na engenharia de confiabilidade, o MTBF é a métrica aplicada a sistemas reparáveis, indicando o tempo médio esperado entre eventos de falha sucessivos em um equipamento que retorna à operação após a manutenção. Em contraste, o MTTF refere-se ao tempo médio até a ocorrência da primeira falha em uma unidade, sendo a medida padrão para análises de vida de componentes e ensaios de degradação.

O dado inicial extraído do *IEEE Gold Book* é derivado de uma lógica de confiabilidade de equipamentos em serviço industrial. Como motores elétricos em plantas fabris são tipicamente reparados e mantidos, os registros históricos são apresentados naturalmente sob a forma de MTBF. Todavia, para a construção dos Diagramas de Blocos de Confiabilidade (RBD) e para a parametrização da distribuição de Weibull, o foco da análise recai sobre a sobrevivência da unidade até sua avaria primária.

Dessa forma, este trabalho estabelece uma "ponte metodológica" na qual o MTBF de referência é reinterpretado como um MTTF alvo equivalente. Essa aproximação é uma prática aceitável para fins de parametrização inicial, permitindo converter um dado agregado em uma estimativa de vida característica para a modelagem estocástica. Esta reinterpretação é o que viabiliza a transposição de estatísticas de manutenção para parâmetros de projeto, ancorando a análise computacional de vida útil do motor no *powertrain* veicular.

A relação $MTBF = 1/\lambda$ foi usada apenas para transformar uma taxa média anual de falha, extraída da literatura, em uma escala temporal inicial. Esse valor não define a distribuição final do componente, nem implica que o motor seja modelado como exponencial. Ele serve apenas como uma métrica de centralidade para posterior parametrização da Weibull, cuja forma é definida separadamente com base nos modos físicos de falha.

4.2.5 Ajuste de Severidade Operacional e Transposição de Contexto

A aplicação de dados de confiabilidade para o cenário de veículos elétricos das categorias M1 e N1 exige um ajuste de severidade, dada a discrepância entre os regimes de operação e as características construtivas. Para este fim, adotou-se um fator de severidade operacional (k_s) de 0,61, de natureza heurística e fundamentado em estudos de transposição para regimes industriais contínuos (MOTOR RELIABILITY WORKING GROUP, 1985).

Do ponto de vista matemático, a aplicação do fator $k_s = 0,61$ sobre o MTBF de referência (114.800 h) resulta em um $MTTF_{alvo}$ de aproximadamente 70.000 horas. Esta redução de 39% na vida média equivale, inversamente, a um aumento na taxa de falha de aproximadamente 64% ($1/k_s \approx 1,64$). Sob essa nova parametrização, a taxa de falha ajustada ($\lambda_{ajustada}$) eleva-se para cerca de 0,125 falhas/unidade·ano.

Essa readequação é fundamental para o realismo da análise computacional, pois assume-se que motores compactos operando em regime severo apresentam uma vida média inferior à de motores de infraestrutura. O valor resultante de 70.000 horas (equivalente a aproximadamente 8 anos de operação em regime contínuo) estabelece o limite superior de sobrevivência que será utilizado para calibrar o parâmetro de escala da distribuição de Weibull no modelo final.

4.2.6 Cálculo da Vida Característica (η) da Distribuição de Weibull

A etapa final da parametrização consiste na conversão do tempo médio alvo ($MTTF_{alvo}$) no parâmetro de escala (η) da distribuição de Weibull de dois parâmetros. Enquanto o MTTF representa a média aritmética dos tempos até a falha, o parâmetro η , também denominado vida característica, indica o tempo necessário para que 63,2% da população atinja a falha sob uma determinada forma de desgaste (β).

A função de confiabilidade de Weibull é definida por $R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$, e a relação matemática entre a média e a escala é governada pela função Gama (Γ).

4.2.7 Análise da Relação Proporcional entre o MTTF e a Vida Característica (η)

Na distribuição de Weibull, o parâmetro de escala (η) não representa a média aritmética dos tempos de falha, mas sim a denominada vida característica. Este parâmetro define o ponto temporal no qual a probabilidade de sobrevivência do componente é de exatamente $1/e$ ($\approx 36,8\%$), o que implica que, no tempo $t = \eta$, aproximadamente 63,2% das unidades da população já atingiram a falha.

A relação entre o tempo médio (MTTF) e a escala (η) é modulada pelo parâmetro de forma (β). Para a topologia de referência deste estudo (PMSynRM), adotou-se $\beta = 2,8$, refletindo um sistema com o menor número de modos de falha concorrentes e dominância de desgaste mecânico. Sob esta condição, a função Gama (Γ) que vincula as duas variáveis resulta em um valor inferior à unidade:

$$\Gamma\left(1 + \frac{1}{2,8}\right) = 0,891$$

Consequentemente, para distribuições que modelam o envelhecimento e desgaste progressivo ($\beta > 1$), a média aritmética (MTTF) ocorrerá invariavelmente antes da vida característica (η), uma vez que $MTTF = \eta \cdot 0,891$.

Este fenômeno estatístico justifica por que o alvo de projeto de 70.000 horas (derivado do ajuste de severidade sobre os dados do IEEE) resulta em um parâmetro de escala de 80.000 horas para a alimentação do modelo computacional.

Para o cálculo da vida característica de referência, adotou-se inicialmente $\beta = 2,8$, associado ao comportamento de desgaste predominante do motor de referência. A partir do MTTF ajustado de 70.000 h, obteve-se $\eta_{ref} \approx 80.000h$.

4.2.8 Interpretação Física do Parâmetro de Forma ($\beta = 2,8$)

A definição do parâmetro de forma β é o que caracteriza o comportamento da taxa de falha do sistema ao longo do tempo. Na engenharia de confiabilidade, valores de $\beta > 1$ indicam que o componente está operando na fase de desgaste e envelhecimento (*wear-out*) da curva da banheira. O valor adotado de $\beta = 2,8$ estabelece um regime de taxa de falha crescente, o que é fisicamente condizente com os mecanismos de degradação dominantes em máquinas elétricas rotativas.

Este valor modela processos de fadiga mecânica em rolamentos, degradação acumulada de lubrificantes e envelhecimento térmico do sistema de isolamento do estator. A dinâmica desse comportamento é descrita pela função de risco ou taxa de falha instantânea de Weibull ($h(t)$), conforme Equação (4):

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

Pela análise da equação, observa-se que para $\beta = 2,8$, o expoente ($\beta - 1$) resulta em um valor positivo (1,8), garantindo que a taxa de falha $h(t)$ cresça de forma acelerada com o tempo. Isso reflete o fato de que, quanto maior o tempo de serviço do motor, maior a probabilidade de ocorrência de uma falha por desgaste físico.

Desta forma, a premissa adotada para a análise computacional consiste em representar o motor através de uma distribuição de Weibull dominada por mecanismos de desgaste. A calibração conjunta de $\beta = 2,8$ e $\eta = 80.000\text{h}$ garante que o sistema apresente um tempo médio de vida (MTTF) de aproximadamente 70.000 horas, provendo um modelo matemático que não apenas quantifica a vida útil, mas também descreve qualitativamente a natureza do envelhecimento das topologias PMSM e PMSynRM analisadas.

4.2.9 Justificativa, Consolidação E Síntese da Parametrização de Escala

A estruturação dos parâmetros de confiabilidade seguiu um fluxo lógico-matemático sequencial, permitindo a transposição de dados históricos populacionais para um modelo de análise computacional de vida útil aplicável ao *powertrain* veicular. A cadeia completa do método pode ser sintetizada nas seguintes etapas:

1. Levantamento de Dados Primários: Adoção da taxa de falha anual de referência para motores síncronos ($\lambda = 0,0762\text{falhas/unidade*ano}$).
2. Determinação do Tempo Médio de Base: Conversão da taxa anual em uma métrica horária através do inverso da taxa ($MTBF = 1/\lambda$), resultando em aproximadamente 114.800 horas.
3. Ajuste de Contexto Operacional: Aplicação do fator de severidade heurístico ($k_s = 0,61$) para adequar a vida média de motores de utilidade pública à realidade de motores de tração compactos em regime severo, definindo o $MTTF_{alvo} \approx 70.000$ horas.

4. Modelagem de Degradação (Weibull): Conversão do tempo médio para a vida característica da distribuição de Weibull, utilizando o parâmetro de forma $\beta = 2,8$, resultando no valor calculado de $\eta \approx 78.500$ horas.
5. Fixação de Parâmetros de Análise Computacional: Adoção do valor arredondado de $\eta_{base} = 80.000$ horas por critério de conservadorismo de engenharia.

Com a vida característica de referência estabelecida, procede-se à aplicação das penalidades topológicas específicas para cada tecnologia de motor.

Do ponto de vista estatístico, o fator de severidade $k_s = 0,61$ atua como um mecanismo de transposição de contexto operacional. É imperativo reconhecer que os dados originais do *IEEE Std 493* derivam de um universo de motores de grande porte (geralmente acima de 200 hp), instalados em ambientes de utilidade pública ou infraestrutura pesada, onde as condições de instalação, ventilação e manutenção são rigorosamente controladas e otimizadas. Nestes cenários, o valor de 114.800 horas de vida média reflete uma operação em regime ideal.

A hipótese deste estudo, voltada para motores de tração veicular nas categorias M1 e N1 (na faixa de 60 kW a 150 kW), exige uma modelagem mais conservadora e aderente à realidade do setor automotivo. Diferente das máquinas de utilidade pública, os motores de tração apresentam:

- Alta Densidade Térmica: Devido ao seu design compacto para integração no chassi, operam com menores áreas de dissipação por unidade de potência.
- Menor Robustez Relativa: Motores compactos possuem sistemas de isolamento e estruturas mecânicas sujeitas a maiores esforços proporcionais.
- Severidade Ambiental: Exposição constante a vibrações mecânicas, contaminantes (poeira e umidade), desalinhamentos dinâmicos e variações bruscas de torque e carga.
- Regimes Transitórios e Manutenção: Operação intermitente com partidas frequentes e condições de manutenção que nem sempre atingem os padrões ideais de grandes usinas ou indústrias de base.

Portanto, a utilização direta do MTTF de 114.800 horas representaria um cenário excessivamente otimista para o *powertrain* de um veículo elétrico. A aplicação do fator de 0,61 funciona como uma penalização técnica necessária, "degradando" o dado de referência para o patamar de 70.000 horas.

Estatisticamente, esse ajuste assegura que o modelo de confiabilidade não ignore os riscos inerentes às máquinas compactas operando sob estresse. Ao optar por um ponto de partida menos idealizado, a análise computacional ganha realismo e fornece resultados mais seguros para a tomada de decisão em engenharia, garantindo que a análise comparativa entre as topologias PMSM e PMSynRM seja pautada por uma margem de segurança operacional condizente com a vida útil projetada para veículos de passeio e utilitários leves.

Em síntese, o método proposto para a definição da vida característica de referência fundamentou-se em uma lógica de degradação controlada de dados ideais da literatura técnica para a realidade do *powertrain* veicular. O processo iniciou-se com a taxa de falha de referência $\lambda = 0,0762$ falhas/unidade·ano, associada a motores síncronos nos levantamentos de confiabilidade do IEEE Gold Book. A conversão inicial forneceu um $MTBF = 1/\lambda \approx 13,1$ anos, equivalente a aproximadamente 114.800 horas.

Considerando que este valor se refere a motores de maior porte e contextos operacionais estáveis, adotou-se o fator de severidade $k_s = 0,61$ para representar a transposição para motores compactos em regime severo. Assim, obteve-se um $MTTF_{alvo} \approx 70.000$ horas. Para parametrizar a distribuição de Weibull com $\beta = 2,8$, utilizou-se a relação $MTTF = \eta \cdot \Gamma(1 + 1/\beta)$, resultando em $\eta \approx 78.500$ horas. Por fim, por critério de arredondamento de engenharia e margem de segurança, adotou-se $\eta_{base} = 80.000$ horas.

O Quadro 6 apresenta a síntese interpretativa final dos parâmetros que servirão de base para a alimentação das análises de modelagem computacionais:

Quadro 6 – Síntese Interpretativa dos Parâmetros de Referência

Parâmetro	Valor	Interpretação Técnica
λ (taxa de falha)	0,0762 falhas/ano	Taxa média anual de falhas de referência obtida na literatura especializada.
<i>MTBF</i>	114.800 h	Tempo médio entre falhas equivalente da população de motores considerada antes da aplicação de fatores de severidade operacional.
k_s	0,61	Fator de penalização utilizado para ajustar os dados de confiabilidade às condições reais de operação mais severas.
$MTTF_{alvo}$	70.000 h	Tempo médio até a falha adotado como meta para representar o regime operacional estudado.
β	2,8	Parâmetro de forma da distribuição Weibull, caracterizando predominância de falhas por desgaste progressivo (<i>wear-out</i>).
η	80.000 h	Parâmetro de escala da distribuição Weibull calculado para que a vida média da distribuição corresponda ao $MTTF$ alvo estabelecido.

Fonte: Autoria própria (2026).

Esta estrutura de parametrização assegura que a modelagem estocástica possua um ponto de ancoragem, permitindo que as análises subsequentes sobre as topologias PMSM e PMSynRM reflitam não apenas grandezas estatísticas, mas o comportamento físico esperado para o ciclo de vida de veículos elétricos das categorias M1 e N1.

4.3 Passo 3 — Composição de riscos concorrentes e determinação do β_{eff}

Uma máquina elétrica automotiva não falha por um mecanismo isolado, mas sim pela interação de diversos processos degradativos que competem entre si (corrida de falhas), tais como o desgaste mecânico de rolamentos, a degradação térmica do isolamento e a desmagnetização de componentes magnéticos. Para representar essa complexidade em um modelo simplificado de dois parâmetros para alimentação do *software* ReliaSoft BlockSim, adotou-se a Análise de Riscos Concorrentes para derivar um parâmetro de forma equivalente, denominado β efetivo (β_{eff}).

O β_{eff} não representa o comportamento físico de um único mecanismo, mas sim um parâmetro estatístico equivalente, utilizado para descrever, de forma

agregada, a mistura de vários mecanismos de falha operando simultaneamente. Para consolidar esses múltiplos riscos em uma única distribuição de Weibull representativa, utilizou-se a média harmônica ponderada pela fração de falhas (w_i) de cada modo i , conforme Equação (5):

$$\beta_{eff} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \left(\frac{w_i}{\beta_i}\right)} \quad (5)$$

A utilização da média harmônica justifica-se metodologicamente por sua sensibilidade aos menores valores de β . Como os valores aparecem no denominador (w_i/β_i), os modos de falha com comportamento menos envelhecido ou mais disperso (como falhas eletrônicas ou desmagnetização, com β entre 1,4 e 1,6) exercem uma influência maior no resultado final, diminuindo o β_{eff} . Essa propriedade é essencial onde a heterogeneidade dos mecanismos de falha reduz o caráter de desgaste puro da curva agregada. A Tabela 2 apresenta o demonstrativo do cálculo para as topologias analisadas.

Tabela 2 - Demonstrativo do uso da análise de riscos concorrente

Motor	w_1 $\beta=2,8$	rol. isol. $\beta=2,5$	w_2 isol. $\beta=2,5$	w_3 demag./ Hall	$\Sigma(w_i/\beta_i)$	$\beta_{eff}=1/\Sigma$	β adotado
SynRM	0,70		0,30	—	0,250+0,120=0,370	2,70	2,80
PMSM	0,55		0,25	0,20 ($\beta=1,6$)	0,196+0,100+0,125=0,421	2,38	2,40
PMSyn RM	0,55		0,25	0,20 ($\beta=1,4$)	0,196+0,100+0,143=0,439	2,28	2,30
BLDC	0,45		0,20	0,20 SPM(1,4)+ 0,15 Hall(1,6)	0,161+0,080+0,143+0,094 =0,478	2,09	2,10

Fonte: Autoria própria (2026).

A análise dos resultados indica que, quanto maior a participação de modos de falha adicionais (além do binômio rolamento/isolação), menor é o β_{eff} da topologia, o que reflete um padrão agregado de falha menos concentrado em desgaste puro e mais influenciado por mecanismos heterogêneos.

A ordem hierárquica estabelecida ($\beta_{SynRM} > \beta_{PMSM} > \beta_{PMSynRM} > \beta_{BLDC}$) consolida a tese física de que o motor de relutância pura (SynRM) possui uma dispersão estatística menor, com falhas concentradas no envelhecimento previsível de seus componentes mecânicos. Em contrapartida, a introdução de ímãs em geometrias complexas e sensores eletrônicos reduz o β adotado, pois a sobreposição

de estresses mecânicos, térmicos e eletrônicos concorrentes torna o comportamento de falha mais disperso temporalmente. Este ajuste paramétrico é o que confere realismo à análise computacional comparativa de confiabilidade operacional do *powertrain*.

4.3.1 Caracterização e Interpretação Física dos Parâmetros de Forma Individuais (β_i)

Para a execução da análise de riscos concorrentes, assume-se que cada modo de falha i possui um comportamento de vida próprio, regido por uma distribuição de Weibull independente com função de confiabilidade $R_i(t) = e^{-(t/\eta_i)^{\beta_i}}$. O parâmetro de forma β_i atua como o determinante da dinâmica da taxa de falha para cada mecanismo específico.

Considerando que, para todos os modos analisados neste estudo, $\beta_i > 1$, define-se que os componentes operam em um regime de taxa de falha crescente, característico da fase de envelhecimento e acúmulo de dano (*wear-out*). No entanto, a magnitude de β_i diferencia a intensidade e a previsibilidade temporal de cada processo degradativo, conforme detalhado no Quadro 7.

Quadro 7 – Parâmetros de Forma por Modo de Falha e Interpretação Física

Modo de Falha	β_i	Interpretação Técnica e Física
Rolamentos	2,8	Desgaste e fadiga mecânica de contato por rolamento. Representa uma degradação acentuada e concentrada no tempo
Isolamento	2,5	Degradação termoelétrica progressiva do sistema dielétrico. Reflete um envelhecimento térmico acelerado e crescente.
Desmagnetização / sensores Hall	1,4 a 1,6	Comportamento menos influenciado pelo envelhecimento puro. Indica uma falha mais dispersa, sujeita a transientes térmicos ou falhas de natureza aleatória (degradação branda).

Fonte: Autoria própria (2026).

A análise comparativa dos valores revela que os modos de falha puramente mecânicos (rolamentos) e dielétricos (isolamento) apresentam os parâmetros de forma mais elevados. Isso ocorre porque tais mecanismos são governados por processos físicos de desgaste previsível. Em contrapartida, os modos associados a componentes magnéticos (ímãs) e eletrônicos (sensores) tendem a apresentar valores de β inferiores, aproximando-se do comportamento de falhas aleatórias.

Portanto, a inclusão desses últimos mecanismos no modelo agregado de uma topologia (como no PMSM ou PMSynRM) tem o efeito estatístico de reduzir o β_{eff} do motor. Fisicamente, isso significa que a presença de ímãs e sensores torna o padrão de falha global da máquina menos concentrado em desgaste mecânico puro e mais suscetível a uma gama heterogênea de riscos, resultando em uma curva de sobrevivência mais suave e temporalmente dispersa.

4.3.2 Definição e Atribuição dos Pesos de Incidência (ω_i)

Na análise de riscos concorrentes, os pesos ω_i representam a fração de falhas atribuída a cada modo específico para motores operando em condições similares. Esses coeficientes quantificam a importância relativa de cada mecanismo de degradação na composição da taxa de falha global do sistema.

A atribuição desses pesos baseia-se em dados de literatura técnica, refletindo a probabilidade de que uma falha observada tenha sido causada por um componente específico. Por definição estatística, a soma das frações de falha de todos os modos concorrentes de uma topologia deve ser unitária, satisfazendo a condição de fechamento, conforme a Equação (6):

$$\sum_{i=1}^k \omega_i = 1 \quad (6)$$

No caso da topologia de relutância pura (SynRM), por exemplo, a ausência de ímãs e sensores simplifica o modelo para apenas dois modos mecânicos e elétricos dominantes. Na composição adotada, estabeleceu-se que 70% das falhas são atribuídas aos rolamentos ($\omega_1 = 0,70$) e 30% ao sistema de isolamento ($\omega_2 = 0,30$), totalizando 1,00.

Em contraste, topologias mais complexas como o motor BLDC exigem a redistribuição desses pesos para acomodar riscos adicionais. Neste cenário, a partilha de responsabilidade pelas falhas torna-se mais fragmentada:

- Rolamentos: 45% ($\omega = 0,45$)
- Isolamento: 20% ($\omega = 0,20$)
- Ímãs Superficiais (SPM): 20% ($\omega = 0,20$)
- Sensores Hall: 15% ($\omega = 0,15$)

Desta forma, os pesos ω_i atuam como os coeficientes de ponderação na média harmônica discutida anteriormente. A ausência de determinados modos em

certas topologias (como a falta de ímãs no SynRM) resulta em pesos nulos para esses fatores, concentrando a probabilidade de falha nos componentes remanescentes. Essa modelagem permite que o β_{eff} resultante seja uma representação fiel da arquitetura física do motor, capturando como a complexidade do rotor altera o perfil de confiabilidade da máquina.

4.3.3 Justificativa Metodológica para a Escolha da Média Harmônica Ponderada

Considerando que cada modo de falha possui seu próprio parâmetro de forma β_i , surge o desafio de definir qual valor de β deve representar o motor de forma unitária no modelo de confiabilidade. Embora a resposta matematicamente exata exigisse o ajuste numérico de uma distribuição equivalente à sobrevivência composta do sistema — definida pelo produto das sobrevivências individuais $R_{sys}(t) = \prod R_i(t)$ através de métodos como Máxima Verossimilhança (MLE) ou Mínimos Quadrados — tal abordagem demandaria uma complexidade computacional excessiva para fins de comparação entre topologias.

Dessa forma, para uma abordagem didática e operacionalmente viável, optou-se pela construção de um β_{eff} por meio de uma média ponderada. A escolha recaiu sobre a Média Harmônica Ponderada, após a análise comparativa entre as três principais possibilidades estatísticas:

1. Média Aritmética Ponderada ($\sum \omega_i \beta_i$): Tende a valorizar diretamente os valores mais altos de β . No contexto de confiabilidade, isso poderia superestimar o caráter de envelhecimento do sistema, ignorando a influência de falhas mais aleatórias.
2. Média Geométrica Ponderada ($\prod \beta_i^{\omega_i}$): Apresenta um comportamento intermediário, sendo comumente utilizada para combinar fatores multiplicativos, mas com sensibilidade moderada a valores extremos.
3. Média Harmônica Ponderada ($1/\sum(\omega_i/\beta_i)$): Caracteriza-se por penalizar mais fortemente os valores elevados de β quando em presença de valores reduzidos.

A opção pela Média Harmônica justifica-se por ser a abordagem mais conservadora e fisicamente plausível para a análise de riscos concorrentes. Como os termos β_i aparecem no denominador da expressão, os modos de falha com menores

parâmetros de forma (como desmagnetização ou falhas de sensores, com β entre 1,4 e 1,6) exercem um peso desproporcionalmente maior no resultado final.

A média harmônica ponderada foi adotada como uma aproximação operacional para estimar um parâmetro de forma equivalente β_{eff} a partir de diferentes modos de falha concorrentes. Essa escolha não corresponde ao ajuste estatístico exato da sobrevivência composta do sistema, mas fornece uma estimativa conservadora, pois atribui maior influência aos modos de falha com menores valores de β , geralmente associados a comportamentos mais dispersos e menos previsíveis. Assim, o parâmetro (β_{eff}) deve ser interpretado como um índice comparativo de primeira ordem, utilizado para diferenciar as topologias de motor na modelagem computacional, e não como uma constante física universal da máquina.

Fisicamente, essa escolha reflete o fato de que a presença de um único modo de falha com comportamento menos envelhecido ou mais disperso é suficiente para alterar significativamente a "assinatura" de confiabilidade de toda a máquina. Portanto, a média harmônica garante que o β_{eff} resultante não mascare os riscos adicionais das topologias PMSM e PMSynRM, provendo uma base sólida para a comparação da confiabilidade operacional do *powertrain*.

4.3.4 Formulação Matemática da Média Harmônica Ponderada

A média harmônica é uma medida de tendência central utilizada em situações onde se deseja combinar grandezas que exercem influência inversamente proporcional ao seu valor, ou quando se pretende que os menores valores de um conjunto possuam um peso preponderante no resultado final. Diferente da média aritmética, a harmônica é calculada pela razão entre o número de elementos e a soma dos inversos desses elementos.

Para um caso simplificado envolvendo dois valores, a e b , a média harmônica (H) é definida pela Equação (7):

$$H = \frac{2}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b}} \quad (7)$$

No contexto da engenharia de confiabilidade aplicada a múltiplos modos de falha, utiliza-se a versão ponderada desta média. Considerando que a soma dos pesos de incidência é unitária ($\sum \omega_i = 1$), a formulação geral para k modos de falha é expressa pela Equação (8):

$$H = \frac{1}{\frac{\omega_1}{a_1} + \frac{\omega_2}{a_2} + \dots + \frac{\omega_k}{a_k}} \quad (8)$$

Ao transpor esta definição para o cálculo do parâmetro de forma equivalente deste estudo, substitui-se a variável genérica a_i pelo parâmetro de forma individual β_i . Dessa forma, a equação que rege a determinação do β efetivo é consolidada pela Equação (9):

$$\beta_{eff} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\omega_i}{\beta_i} \right)} \quad (9)$$

Esta estrutura matemática é o que permite ao modelo capturar a sensibilidade do sistema aos riscos de menor β (como desmagnetização e falhas de sensores). Ao posicionar o parâmetro de forma no denominador, garante-se que qualquer redução na previsibilidade de um modo de falha individual resulte em uma redução imediata e perceptível na robustez estatística do β_{eff} da topologia analisada.

4.3.5 Sensibilidade da Média Harmônica aos Menores Coeficientes de Forma

A escolha da média harmônica ponderada fundamenta-se em sua propriedade intrínseca de conferir maior relevância aos menores valores de um conjunto. Matematicamente, essa sensibilidade decorre do fato de os parâmetros β_i estarem posicionados no denominador da expressão de ponderação conforme Equação (10):

$$\frac{\omega_i}{\beta_i} \quad (10)$$

Dessa forma, quanto menor o valor de β_i , maior será a magnitude do termo resultante no denominador da equação global, exercendo uma influência desproporcional no valor final de β_{eff} . Para ilustrar esse comportamento, pode-se comparar as contribuições individuais de dois modos de falha com o mesmo peso de incidência:

- Para um modo dominante de desgaste (rolamentos) com $\beta = 2,8$, a contribuição unitária é $1/2,8 \approx 0,357$.
- Para um modo de falha mais disperso (desmagnetização em barreiras) com $\beta = 1,4$, a contribuição unitária é $1/1,4 \approx 0,714$.

Neste cenário, observa-se que o modo com $\beta = 1,4$ contribui com exatamente o dobro do valor para a soma do denominador em relação ao modo com $\beta = 2,8$.

Como o resultado final da média harmônica é o inverso dessa soma, o β_{eff} é "puxado para baixo" pela presença de mecanismos com menor parâmetro de forma.

Esta propriedade é extremamente útil para a modelagem de confiabilidade do *powertrain* veicular. Ela garante que um modo de falha com comportamento menos envelhecido, mais disperso ou próximo da aleatoriedade — características típicas de falhas em ímãs permanentes e sensores — reduza a previsibilidade estatística de todo o sistema. Assim, o modelo evita o risco de superestimar a robustez de topologias complexas (como PMSM e PMSynRM), refletindo com maior acurácia a realidade de que a confiabilidade global é limitada pela incerteza do seu modo de falha menos previsível.

4.3.6 Demonstração Prática do Cálculo: Topologia SynRM (Referência)

A aplicação do modelo de riscos concorrentes para a obtenção do β efetivo pode ser ilustrada através da topologia de relutância pura (SynRM). Por não possuir ímãs permanentes ou sensores eletrônicos de posição no rotor, esta máquina é considerada a referência de maior robustez estrutural, sendo sujeita apenas aos modos de falha mecânicos e dielétricos.

Para o cálculo, foram adotados os pesos de incidência e os parâmetros de forma individuais detalhados na Tabela 3:

Tabela 3 - Parâmetros para Composição do β_{eff} (SynRM)

Modo de Falha (<i>i</i>)	Peso de Incidência (ω_i)	Parâmetro de Forma (β_i)
1. Rolamentos	0,70	2,8
2. Isolamento	0,30	2,5
Total	1,00	—

Fonte: Autoria própria (2026).

A determinação do β efetivo seguiu o procedimento de média harmônica ponderada:

$$\beta_{eff} = \frac{1}{\left(\frac{0,70}{2,8} + \frac{0,30}{2,5}\right)}$$

Onde as contribuições individuais para o denominador são:

- Contribuição do Rolamento: $0,70/2,8 = 0,250$
- Contribuição do Isolamento: $0,30/2,5 = 0,120$

Somando-se os termos, obtém-se o denominador total de 0,370. O valor resultante para o parâmetro de forma equivalente é:

$$\beta_{eff} = \frac{1}{0,370} \approx 2,7027$$

Para fins de análise computacional, adotou-se o valor arredondado de $\beta = 2,80$. Esta decisão fundamenta-se em um critério técnico-conservador, aproximando o comportamento agregado da máquina ao seu modo de falha amplamente dominante (rolamentos, com 70% de incidência). Este ajuste garante que o modelo de referência preserve a característica de desgaste mecânico acentuado, servindo como uma linha de base sólida para contrastar com as topologias que apresentam maior dispersão de falhas devido à presença de componentes magnéticos.

4.3.7 Demonstração do Cálculo para a Topologia PMSM

A topologia PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motor*) introduz um risco concorrente adicional em relação ao motor de relutância pura: a falha por desmagnetização dos ímãs internos (IPM) e, em muitos casos, a falha dos sensores de posição/térmicos integrados. Para a determinação do seu β efetivo, os pesos de incidência foram redistribuídos para contemplar este terceiro modo de falha, conforme apresentado na Tabela 4:

Tabela 4 - Parâmetros para Composição do β_{eff} (PMSM)

Modo de Falha (i)	Peso de Incidência (ω_i)	Parâmetro de Forma (β_i)
1. Rolamentos	0,55	2,8
2. Isolamento	0,25	2,5
2. Desmagnetização / Hall	0,20	1,6
Total	1,00	—

Fonte: Autoria própria (2026).

O cálculo da média harmônica ponderada para a obtenção do parâmetro de forma equivalente seguiu a formulação:

$$\beta_{eff} = \frac{1}{\left(\frac{0,55}{2,8} + \frac{0,25}{2,5} + \frac{0,20}{1,6}\right)}$$

O processamento dos termos individuais do denominador resulta em:

- Contribuição do Rolamento: $0,55/2,8 \approx 0,196$
- Contribuição do Isolamento: $0,25/2,5 = 0,100$

- Contribuição de Desmagnetização/Sensores: $0,20/1,6 = 0,125$

A somatória dos inversos ponderados resulta em um denominador total de 0,421. Logo, o valor do parâmetro de forma efetivo é:

$$\beta_{eff} = \frac{1}{0,421} \approx 2,375$$

Dessa forma, obteve-se um β_{eff} de aproximadamente 2,38. Para fins de padronização nas análises de modelagem computacionais do *software* BlockSim, adotou-se o valor arredondado de $\beta = 2,40$. Comparativamente ao motor SynRM ($\beta = 2,80$), observa-se uma redução significativa no parâmetro de forma. Fisicamente, este resultado demonstra que a presença de ímãs e eletrônica de sensoriamento — mecanismos que possuem uma taxa de falha menos abrupta e mais dispersa ($\beta = 1,6$) — "suaviza" a curva de sobrevivência do motor PMSM. Estatisticamente, isso indica que motores PMSM apresentará uma maior heterogeneidade de falhas ao longo do tempo, perdendo o caráter de desgaste puramente mecânico concentrado que caracteriza a topologia de relutância pura.

4.3.8 Interpretação Física e Comparativa dos Resultados de β_{eff}

A análise comparativa entre os valores de β_{eff} obtidos para as topologias SynRM (2,70) e PMSM (2,38) revela uma distinção fundamental no comportamento de falha dessas máquinas sob condições operacionais. Fisicamente, a redução do parâmetro de forma no motor PMSM é a consequência direta da inclusão do modo de falha associado à desmagnetização e ao sensoriamento, que possui um β individual de 1,6.

O impacto dessa redução no modelo agregado pode ser interpretado sob dois aspectos principais:

1. Heterogeneidade: Enquanto o motor de relutância pura (SynRM) apresenta um comportamento "puramente envelhecido", onde as falhas são previsíveis e concentradas no final da vida útil (dominadas pelo desgaste mecânico dos rolamentos), o motor PMSM apresenta uma composição de falhas mais heterogênea. A presença de ímãs permanentes e sensores introduz riscos que podem se manifestar de forma mais dispersa ao longo do tempo, suavizando a inclinação da curva de sobrevivência.

2. Diluição do Desgaste Mecânico: No PMSM, a "assinatura" de desgaste dos rolamentos e do isolamento é estatisticamente diluída pela incerteza associada aos componentes magnéticos e eletrônicos. Isso significa que a falha de um motor PMSM é menos correlacionada apenas ao tempo de rodagem mecânica do que em um motor SynRM, sendo influenciada por uma gama mais vasta de estresses concorrentes.

Este mesmo fenômeno de "achatamento" do β efetivo observa-se nas demais topologias analisadas (PMSynRM e BLDC). À medida que se adicionam novos modos de falha com baixos parâmetros de forma (como ímãs em barreiras estreitas ou sensores *Hall*), a média harmônica é sucessivamente reduzida.

Em termos de engenharia de manutenção e garantia para veículos das categorias M1/N1, essa interpretação indica que, quanto mais complexa a tecnologia do motor (maior uso de ímãs e sensores), menos abrupto será o processo de quebra, mas também menos previsível será o instante exato da avaria primária. Desta forma, a parametrização do β_{eff} captura com precisão como a escolha tecnológica do rotor altera não apenas o desempenho, mas a própria natureza estatística da degradação do *powertrain*.

4.3.9 Síntese Comparativa e Hierarquia dos Betas Efetivos

A consolidação dos cálculos de riscos concorrentes permite estabelecer uma hierarquia de previsibilidade e envelhecimento para as topologias estudadas. O Quadro 8 resume os valores de β_{eff} obtidos e a interpretação qualitativa associada ao comportamento de falha de cada máquina.

Quadro 8 – Comparativo Consolidado dos Parâmetros de Forma Adotados

Tecnologia de Motor	β_{eff} Calculado	β Adotado	Interpretação do Padrão de Falha
SynRM (Relutância Pura)	2,70	2,80	Falhas concentradas em desgaste mecânico e térmico (rolamentos e isolamento).
PMSM (Ímãs Internos)	2,38	2,40	A presença de ímãs permanentes e sensores reduz a inclinação da curva de falhas, tornando o padrão menos concentrado.
PMSynRM (Relutância Assistida)	2,28	2,30	A possibilidade de desmagnetização em barreiras estreitas amplia a dispersão temporal das falhas.

Tecnologia de Motor	β_{eff} Calculado	β Adotado	Interpretação do Padrão de Falha
BLDC (Ímãs Superficiais)	2,09	2,10	Maior heterogeneidade dos modos de falha, resultando em comportamento agregado mais disperso.

Fonte: Autoria própria (2026).

A análise dos dados revela a ordem de grandeza $\beta_{SynRM} > \beta_{PMSM} > \beta_{PMSynRM} > \beta_{BLDC}$. Essa sequência sugere que, à medida que a complexidade do rotor aumenta com a introdução de assistência magnética e sensoriamento eletrônico, o comportamento de falha se afasta do modelo de "desgaste puro" (β elevado) e se aproxima de um regime de maior incerteza e dispersão.

Para o SynRM, o valor de 2,80 indica uma degradação progressiva e previsível, onde a maioria das falhas ocorre em uma janela temporal estreita ao final da vida útil. Em contrapartida, o motor BLDC, com o menor parâmetro (2,10), apresenta uma curva de sobrevivência mais achatada, indicando que as falhas são causadas por uma mistura mais complexa de estresses, resultando em avarias mais prematuras e distribuídas.

Desta forma, a parametrização do β efetivo encerra a etapa de caracterização da forma do envelhecimento. Com esses valores definidos, torna-se possível prosseguir para a aplicação das penalidades de escala (η), completando o conjunto de dados necessário para a análise da confiabilidade do *powertrain* veicular.

4.3.10 Justificativa da média harmônica e conservadorismo do modelo

Para validar a escolha da média harmônica ponderada como a ferramenta de composição dos riscos concorrentes, torna-se necessário contrastá-la com o resultado que seria obtido através da média aritmética simples. Tomando como exemplo a topologia PMSM, a aplicação da média aritmética ponderada, conforme a Equação (11), resultaria no seguinte cálculo:

$$\beta_{arit} = \sum_{i=1}^k \omega_i \beta_i \quad (11)$$

$$\beta_{arit} = (0,55 \cdot 2,8) + (0,25 \cdot 2,5) + (0,20 \cdot 1,6)$$

$$\beta_{arit} = 1,54 + 0,625 + 0,32 = 2,485$$

Comparativamente, enquanto a média aritmética fornece um valor de aproximadamente 2,49, a média harmônica adotada resultou em 2,38. Essa

discrepância numérica revela uma diferença conceitual profunda na modelagem de confiabilidade:

1. Superestimação do Envelhecimento: A média aritmética resulta em um valor mais elevado porque ela suaviza excessivamente a influência do modo de falha com menor β (desmagnetização/sensores). Ao fazer isso, ela tende a superestimar o caráter de envelhecimento previsível do sistema, apresentando uma curva de falhas mais abrupta e concentrada do que a realidade física sugere.
2. Reconhecimento do Risco Dispersas: A média harmônica, por sua natureza matemática, reconhece que um modo de falha com β baixo (próximo de 1,0), mesmo possuindo um peso de incidência moderado (20%), altera significativamente a forma da distribuição agregada. Ela "puxa" o resultado para baixo, refletindo que a introdução de um componente menos previsível aumenta a heterogeneidade das falhas.

Portanto, a opção pela média harmônica é uma decisão de projeto que prioriza o realismo e o conservadorismo. Na engenharia de confiabilidade, não se deve mascarar a influência de mecanismos de falha aleatórios ou dispersos através de médias que privilegiem os modos dominantes de desgaste. Ao utilizar a harmônica, garante-se que o β_{eff} capture a vulnerabilidade introduzida pela complexidade do rotor, provendo um modelo de análise computacional que descreve com maior acurácia a incerteza operacional do *powertrain*.

A utilização da média harmônica ponderada para a determinação do β_{eff} não constitui apenas uma escolha matemática, mas uma decisão de engenharia fundamentada em critérios de conservadorismo e plausibilidade física. Esta abordagem faz sentido no contexto de *powertrains* para veículos elétricos por cinco razões fundamentais:

1. Penalização da Dispersão Temporal: A média harmônica penaliza modos com menor β , que são justamente aqueles que aumentam a incerteza e a dispersão temporal das falhas. Em confiabilidade, o aumento da aleatoriedade é um risco que deve ser evidenciado, não camuflado.
2. Mitigação do Efeito de Mascaramento: Em motores síncronos, o modo de falha de rolamentos é frequentemente dominante ($\omega = 0,55$ a $0,70$). O uso da harmônica evita que o elevado β deste modo mascare a presença de

mecanismos adicionais menos previsíveis, como a desmagnetização térmica.

3. Sensibilidade à Heterogeneidade: O β_{eff} resultante torna-se um indicador sensível da diversidade de mecanismos de falha. Quanto mais heterogênea for a física da falha de uma topologia, mais "puxado para baixo" será o parâmetro de forma, refletindo com maior acurácia a complexidade do sistema.
4. Coerência com a Teoria de Riscos Concorrentes: O modelo respeita a hipótese de que a introdução de um novo "caminho de falha" altera a forma global da curva de sobrevivência. Se um motor possui mais componentes vulneráveis, sua distribuição de falhas agregada deve, necessariamente, apresentar uma dispersão distinta daquela observada em motores mais simples.
5. Hierarquização Tecnológica Intuitiva: O método gera uma ordenação lógica entre as topologias. Fica estabelecido que, quanto maior o número de modos de falha adicionais e menor a sua forma individual, menor será o β_{eff} final, permitindo uma comparação entre a robustez do SynRM e a complexidade do PMSM ou do BLDC.

Em linguagem direta, a média harmônica foi aplicada porque, ao modelar os riscos concorrentes, os modos de falha com comportamento menos previsível (menor β) não devem ser diluídos. Eles precisam exercer uma influência redutora sobre o parâmetro global, sinalizando que a composição tecnológica do rotor torna o comportamento de falha do sistema menos concentrado em desgaste mecânico puro e mais suscetível a intercorrências dispersas ao longo do ciclo de vida.

4.3.11 Limitações do Método e Perspectiva de Rigor Estatístico

Embora a média harmônica ponderada constitua uma ferramenta robusta para a síntese dos parâmetros de forma em análises comparativas, é necessário ressaltar que sua aplicação possui limites metodológicos. Em uma análise de confiabilidade de rigor matemático absoluto, a determinação de uma distribuição equivalente deveria considerar fatores adicionais complexos, tais como:

- As distribuições específicas de cada modo de falha;

- A interação entre os valores individuais de vida característica (η_i) e parâmetros de forma (β_i);
- A faixa de tempo operacional analisada;
- Os critérios de ajuste estatístico e os pesos efetivamente observados em campo;
- O tratamento de dados censurados;
- A dependência estocástica entre os modos de falha e a própria definição formal da Weibull equivalente.

Diante dessas variáveis, é mais rigoroso afirmar que a média harmônica ponderada, conforme aplicada neste estudo, é uma aproximação operacional para a obtenção de um β_{eff} de primeira ordem. Esta formulação é considerada mais segura e adequada para o escopo desta pesquisa, pois provê uma métrica sensível aos modos de falha de menor β , permitindo representar a composição de riscos concorrentes por meio de uma única distribuição de Weibull equivalente sem a necessidade de modelagens numéricas exaustivas.

Desta forma, o parâmetro de forma adotado cumpre sua função primordial: diferenciar o comportamento estatístico das topologias síncronas de forma fisicamente plausível, garantindo que a complexidade do rotor seja devidamente penalizada na análise comparativa de confiabilidade operacional do *powertrain*.

A determinação de parâmetros equivalentes para sistemas sujeitos a riscos concorrentes possui um caminho matemático de alto rigor. O procedimento estatístico exato para a consolidação dos múltiplos modos de falha em uma única representação de Weibull seguiria as etapas descritas abaixo:

1. Definição das Distribuições Individuais: Caracterização de cada modo de falha i através de sua função de confiabilidade de Weibull, conforme Equação (12):

$$R_i(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{\beta_i}} \quad (12)$$

2. Composição da Sobrevivência do Sistema: Sob a premissa de independência entre os modos, a sobrevivência global do motor seria o produto das sobrevivências individuais, conforme Equação (13):

$$R_{sys}(t) = \prod_{i=1}^k R_i(t) \quad (13)$$

3. Obtenção da Função Composta: Resultando na Equação (14) onde os riscos se somam no expoente:

$$R_{sys}(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^k \left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{\beta_i}\right) \quad (14)$$

4. Ajuste de uma Weibull Equivalente: Definição de uma função de forma simplificada que melhor se aproxime da curva composta, conforme Equação (15):

$$R_{eq}(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta_{eff}}\right)^{\beta_{eff}}} \quad (15)$$

5. Estimação Numérica dos Parâmetros: A obtenção de η_{eff} e β_{eff} exigiria a aplicação de métodos de otimização numérica, como a minimização da soma dos quadrados dos resíduos entre a curva sistêmica e a equivalente, conforme Equação (16):

$$\min_{\eta_{eff}, \beta_{eff}} \sum_j [R_{sys}(t_j) - R_{eq}(t_j)]^2 \quad (16)$$

Embora este seja o caminho estatisticamente mais rigoroso, a sua implementação exige dados de falha em campo extremamente granulares ou análises de modelagem computacionais numéricas exaustivas de cada componente. Nesse contexto, a Média Harmônica Ponderada surge como uma aproximação operacional de primeira ordem, sendo uma ferramenta valiosa para fins de pré-modelagem, construção didática e, principalmente, para a comparação qualitativa entre diferentes topologias de motor (SynRM, PMSM, PMSynRM e BLDC).

Esta simplificação permite capturar a sensibilidade do sistema aos riscos de menor β sem incorrer na complexidade de ajustes numéricos ponto a ponto, provendo uma base de dados coerente para a alimentação dos diagramas de blocos no *software* ReliaSoft BlockSim. Assim, garante-se o equilíbrio entre o rigor da engenharia de confiabilidade e a viabilidade prática da análise comparativa proposta neste TCC.

4.4 Penalização Topológica E Consolidação Dos Parâmetros Finais

Após a definição do parâmetro de forma equivalente (β_{eff}) através da análise de riscos concorrentes, a etapa final da parametrização consiste no ajuste da vida característica (η). Este procedimento visa diferenciar as topologias não apenas pela

dinâmica de seu envelhecimento, mas também pela escala temporal absoluta de sua durabilidade, considerando as vulnerabilidades intrínsecas de cada arquitetura de rotor.

O ajuste é realizado através da aplicação de um fator de penalidade topológica (k_{top}) sobre a vida característica de referência ($\eta_{base} = 80.000h$). A lógica do modelo baseia-se na transposição do par de referência para um par final específico para cada tecnologia:

$$(\beta_{base}, \eta_{base}) \rightarrow (\beta_{eff}, \eta_{final})$$

Onde a vida característica final é definida pela Equação (17):

$$\eta_{final} = \eta_{base} \cdot k_{top} \quad (17)$$

O Quadro 9 detalha os fatores adotados, as justificativas técnicas para a penalização e os valores finais de η resultantes.

Quadro 9 – Penalidades nas Vidas Características das Topologias

Tecnologia	η_{base}	Fator (k_{top})	Justificativa Técnica da Penalidade	η_{final}
SynRM	80.000 h	1,00	Modo único dominante (sem ímãs permanentes). Topologia de referência e maior robustez estrutural.	80.000 h
PMSM	80.000 h	0,90	Configuração IPM (ímãs internos), protegidos pelo núcleo ferromagnético e beneficiados por melhor gestão térmica.	72.000 h
PMSynRM	80.000 h	0,85	Ímãs posicionados em barreiras estreitas, sujeitos a elevada ciclagem térmica e tensões de fadiga mecânica localizadas.	68.000 h
BLDC	80.000 h	0,75	Ímãs superficiais (SPM) mais expostos a efeitos térmicos e mecânicos, além da presença de sensores Hall suscetíveis a falhas.	60.000 h

Fonte: Autoria própria (2026).

A parametrização final de Weibull por topologia de motor utiliza dois ajustes distintos e complementares para capturar a física da falha:

1. Ajuste de Forma (β): Representa a natureza do envelhecimento. A redução de β nas topologias mais complexas (como no PMSM e PMSynRM) indica que, ao adicionar modos concorrentes como desmagnetização e falhas de sensoriamento, o comportamento deixa de ser dominado exclusivamente por desgaste mecânico concentrado e torna-se mais heterogêneo e disperso temporalmente.
2. Ajuste de Escala (η): Representa o horizonte temporal de falha. A aplicação do fator $k_{top} < 1$ desloca a curva de confiabilidade para a esquerda no eixo do tempo. Isso reflete a premissa de engenharia de que a complexidade construtiva — como a inserção de ímãs em barreiras de fluxo estreitas ou a exposição de ímãs superficiais — reduz a durabilidade característica da máquina sob as mesmas condições de estresse operacional.

A combinação desses dois parâmetros define a função de confiabilidade final de cada motor, $R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta}$, que será integrada ao Diagrama de Blocos de Confiabilidade (RBD).

O motor SynRM permanece como a referência de maior robustez, mantendo a maior escala de vida ($\eta = 80.000 \text{ h}$) e um padrão de falha fortemente associado ao desgaste previsível de rolamentos e isolamento ($\beta = 2,80$). No extremo oposto, o motor BLDC recebe a maior penalização conjunta: seu η reduzido para 60.000 h, aliado ao menor β (2,10), resulta em uma curva de sobrevivência que decai mais precocemente e de forma mais dispersa. Este modelo é consistente com referências de mercado que apontam vidas úteis de rolamentos (L_{10}) para motores BLDC na faixa de 20.000 a 50.000 horas, validando o realismo estatístico da parametrização adotada.

Desta forma, os parâmetros finais consolidados no Quadro 7 proveem o lastro técnico necessário para que a análise computacional no *software* ReliaSoft BlockSim discrimine com precisão o impacto de cada escolha tecnológica na confiabilidade operacional do *powertrain* para veículos elétricos das categorias M1 e N1.

4.4.1 Definição da Vida Característica de Referência (η_{base})

A determinação da vida característica de referência (η_{base}) constitui o ponto de ancoragem temporal de toda a modelagem comparativa. Para este estudo, optou-se por utilizar o motor síncrono de relutância pura (SynRM) como a referência tecnológica de base. Esta decisão fundamenta-se na maior simplicidade construtiva desta máquina, que, por não possuir ímãs permanentes nem sensores eletrônicos de posição (*Hall*) integrados ao rotor, apresenta o menor número de modos de falha concorrentes e, conseqüentemente, a maior robustez estrutural intrínseca entre as topologias analisadas.

Matematicamente, o valor de η_{base} foi derivado do tempo médio de vida alvo ($MTTF_{alvo} \approx 70.000$ horas) estabelecido na seção anterior (item 4.2.1), o qual já incorpora o fator de severidade operacional para o contexto veicular. Para a transposição desse valor médio para o parâmetro de escala da distribuição de Weibull, utilizou-se a relação fundamental mostrada na Equação (18):

$$MTTF = \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (18)$$

Isolando-se o parâmetro de escala (η), temos a Equação (19):

$$\eta = \frac{MTTF}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)} \quad (19)$$

Considerando o parâmetro de forma adotado para o motor de referência, $\beta = 2,8$ (característico de dominância de desgaste mecânico concentrado), o cálculo da função Gama resulta em:

$$\Gamma\left(1 + \frac{1}{2,8}\right) = \Gamma(1,3571) \approx 0,891$$

Substituindo-se os valores na equação, obtém-se o valor calculado para a vida característica:

$$\eta = \frac{70.000}{0,891} \approx 78.563 \text{ h}$$

Por critério de arredondamento técnico e conservadorismo de engenharia, fixou-se o valor de $\eta_{base} = 80.000$ horas para a alimentação dos modelos no *software* ReliaSoft BlockSim. Este montante representa a escala de tempo sobre a qual a topologia SynRM atinge o patamar de 63,2% de falhas acumuladas, servindo como a linha de base idealizada sobre a qual serão aplicadas as penalidades topológicas

decorrentes da introdução de ímãs permanentes e complexidades rotóricas nas demais topologias (PMSM e PMSynRM).

4.4.2 Conceituação e Aplicação da Penalidade Topológica (k_{top})

A penalidade topológica é definida neste estudo como um fator multiplicativo (k_{top}) aplicado sobre a vida característica de referência (η_{base}) com o objetivo de quantificar a redução da durabilidade esperada em função da complexidade construtiva e das vulnerabilidades intrínsecas de cada tecnologia de rotor. Enquanto o parâmetro β ajusta a forma da distribuição (natureza do envelhecimento), o fator k_{top} atua diretamente na escala temporal da falha, deslocando a curva de confiabilidade para a esquerda no eixo cronológico.

A formulação matemática para o cálculo da vida característica final (η_{final}) de cada topologia é expressa pela Equação (20):

$$\eta_{final} = \eta_{base} \cdot k_{top} \quad (20)$$

Onde k_{top} assume valores situados no intervalo [0,1], representando o percentual de preservação da vida útil em relação ao modelo de referência mais robusto (SynRM). A gradação desses fatores reflete o compromisso entre o ganho de desempenho eletromagnético e o aumento do risco mecânico e térmico:

- $k_{top} = 1,00$: Indica a ausência de penalidade. Atribuído à topologia de referência, assumindo que esta preserva 100% da vida característica projetada.
- $k_{top} = 0,90$: Representa uma redução de 10% na vida característica devido à introdução de ímãs internos protegidos.
- $k_{top} = 0,85$: Representa uma penalidade intermediária de 15%, associada a geometrias de barreiras de fluxo mais complexas e sensíveis.
- $k_{top} = 0,75$: Indica uma redução severa de 25% na vida característica, decorrente da maior exposição de componentes críticos (ímãs superficiais e sensores).

A Tabela 5 sintetiza os valores resultantes desta parametrização, estabelecendo os limites temporais que serão utilizados para a análise computacional da confiabilidade operacional do *powertrain*.

Tabela 5 - Síntese da Penalização de η por Topologia de Motor

Motor	Vida de Referência (η_{base})	Fator Topológico (k_{top})	Vida Característica Final (η_{final})
SynRM	80.000 h	1,00	80.000 h
PMSM	80.000 h	0,90	72.000 h
PMSynRM	80.000 h	0,85	68.000 h
BLDC	80.000 h	0,75	60.000 h

Fonte: Autoria própria (2026).

A aplicação desses fatores permite que o modelo probabilístico discrimine, com clareza, o impacto das escolhas de projeto. Embora todas as máquinas operem sob a mesma carga e regime de severidade, a topologia PMSynRM (representada pelo PMSynRM na tabela) é modelada com uma escala de vida de 68.000 horas, refletindo a premissa de que sua estrutura rotórica, otimizada para o torque de relutância, introduz pontos de fragilidade térmica e mecânica que antecipam o tempo característico de falha em relação ao PMSM tradicional (72.000 h) e à referência SynRM (80.000 h).

4.4.3 Justificativa Técnica e Determinação das Vidas Características (η)

A transposição dos fatores de penalidade topológica para valores numéricos de vida característica permite diferenciar o horizonte temporal de falha de cada motor. A seguir, detalham-se os cálculos e as premissas de engenharia adotadas para cada topologia analisada.

Para o motor síncrono de relutância pura (SynRM), não foi aplicada qualquer penalização sobre a vida característica de base, uma vez que esta máquina é tratada como o padrão de robustez do modelo.

$$\eta_{SynRM} = 80.000 \times 1,00 = 80.000 \text{ h}$$

A ausência de ímãs permanentes e de sensores eletrônicos de posição no rotor elimina riscos associados à desmagnetização térmica e falhas de sinal, resultando em uma estrutura mecânica mais íntegra e com menor temperatura de operação no rotor, o que justifica a preservação integral da escala de vida de referência.

No motor síncrono de ímãs permanentes (PMSM), aplicou-se uma penalidade moderada de 10% sobre a escala de vida original.

$$\eta_{PMSM} = 80.000 \times 0,90 = 72.000 \text{ h}$$

Esta redução justifica-se pela introdução de ímãs de Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB). No entanto, como a configuração analisada é do tipo IPM (*Interior Permanent Magnet*), os ímãs encontram-se blindados pelo núcleo de aço do rotor, conferindo proteção contra forças centrífugas e permitindo uma gestão térmica mais eficiente em aplicações de alto desempenho. Dessa forma, a degradação da vida característica é limitada, mantendo um elevado índice de durabilidade.

Para o motor de relutância assistido por ímãs (PMSynRM), adotou-se uma penalidade intermediária de 15% em relação à referência.

$$\eta_{PMSynRM} = 80.000 \times 0,85 = 68.000 \text{ h}$$

A justificativa técnica reside na complexidade geométrica do rotor. Nesta tecnologia, os ímãs são inseridos em barreiras de fluxo estreitas, o que exige a presença de "pontes de ferro" muito finas para minimizar o vazamento magnético. Essa configuração eleva a sensibilidade do rotor a tensões mecânicas localizadas (concentradores de tensão) e fadiga por ciclagem térmica severa. Além disso, por se tratar de uma solução voltada ao equilíbrio entre custo e desempenho, assume-se uma maior vulnerabilidade a variações de qualidade construtiva em comparação ao PMSM premium.

O motor de corrente contínua sem escovas (BLDC) recebeu a maior penalização do estudo, com uma redução de 25% na sua escala de vida.

$$\eta_{BLDC} = 80.000 \times 0,75 = 60.000 \text{ h}$$

Esta severidade justifica-se pela combinação de múltiplas vulnerabilidades:

- a. o uso de ímãs montados na superfície do rotor (SPM), que ficam diretamente expostos a esforços de cisalhamento centrífugo e estresse térmico;
- b. a dependência de sensores de efeito Hall para a comutação, componentes que apresentam modos de falha eletrônicos adicionais;
- c. a aplicação frequente em sistemas de menor custo, onde a vida útil dos rolamentos é frequentemente o fator limitante. O valor de 60.000 h mostra-se consistente com dados experimentais que

apontam vidas úteis (L_{10}) de rolamentos para esta classe de motor entre 20.000 e 50.000 horas.

Desta forma, a parametrização dos valores de η final consolida a base de dados para a análise computacional, garantindo que o modelo discrimine a robustez relativa das tecnologias conforme a complexidade de seus respectivos projetos mecânicos e magnéticos.

4.4.4 Distinção Analítica entre os Ajustes de Forma (β) e Escala (η)

A modelagem probabilística executada nesta pesquisa opera em duas dimensões estatísticas complementares, cujos efeitos sobre a curva de confiabilidade são distintos e refletem diferentes aspectos da física da falha das máquinas síncronas. A compreensão da dualidade entre os parâmetros β e η é o que permite interpretar corretamente os resultados das análises de modelagem computacionais.

O parâmetro de forma β atua como o determinante da natureza do envelhecimento da máquina. Ele responde à questão qualitativa: o padrão de falha é concentrado e previsível (desgaste puro) ou é disperso e influenciado por múltiplos fatores concorrentes?

Conforme estabelecido pela análise de riscos concorrentes (Seção 4.3), os valores de β foram sucessivamente reduzidos conforme a complexidade do motor aumentava:

- SynRM ($\beta = 2,80$): Indica que a falha é dominada por mecanismos de desgaste mecânico concentrado.
- PMSM ($\beta = 2,40$), PMSynRM ($\beta = 2,30$) e BLDC ($\beta = 2,10$): A redução progressiva de β reflete a inclusão de modos concorrentes como desmagnetização e falhas eletrônicas.

Fisicamente, essa redução de β sinaliza que o comportamento do sistema torna-se mais heterogêneo. À medida que ímãs e sensores são adicionados, o motor perde sua "assinatura" de desgaste puramente mecânico e passa a ser suscetível a uma mistura mais complexa de estresses, resultando em uma curva de confiabilidade mais "achatada" e com falhas distribuídas de forma menos abrupta ao longo do tempo.

Enquanto β altera a inclinação da curva, o parâmetro de escala η determina o deslocamento cronológico das falhas. Ele responde à questão quantitativa: em qual faixa de tempo a maioria das falhas irá ocorrer?

A aplicação das penalidades topológicas (Seção 4.4.2) resultou em uma redução da vida característica conforme a vulnerabilidade do projeto rotórico:

- SynRM ($\eta = 80.000$ h)
- PMSM ($\eta = 72.000$ h)
- PMSynRM ($\eta = 68.000$ h)
- BLDC ($\eta = 60.000$ h)

Estatisticamente, a redução de η desloca a curva de sobrevivência integralmente para a esquerda no eixo das abscissas. Isso significa que, independentemente da forma da distribuição, o motor BLDC foi modelado para apresentar falhas mais precoces em comparação às demais topologias, refletindo a premissa de que ímãs superficiais e sensores *Hall* operando sob vibração e calor antecipam o fim da vida útil da unidade.

Dessa forma, a parametrização final de cada motor é o resultado de uma interação entre forma e escala. O motor SynRM (referência) possui a curva de sobrevivência mais à direita (maior η) e mais inclinada (maior β), caracterizando um sistema de alta durabilidade e desgaste previsível. Em contrapartida, o motor PMSynRM apresenta uma curva deslocada para a esquerda e com inclinação reduzida, refletindo que a escolha tecnológica da relutância assistida traz consigo não apenas uma vida característica menor, mas também uma maior dispersão estatística nas avarias de veículos M1 e N1.

4.4.5 Consolidação e Interpretação Conjunta dos Parâmetros Weibull

A caracterização probabilística de cada tecnologia de motor é consolidada pela função de confiabilidade de Weibull, expressa por $R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta}$. A combinação dos ajustes de forma e escala resulta na matriz de parâmetros apresentada na Tabela 6, que constitui o conjunto de dados final para o processamento das análises de modelagem computacionais de confiabilidade operacional.

Tabela 6 - Matriz Consolidada de Parâmetros de Weibull por Topologia

Motor	Parâmetro de Forma (β)	Vida Característica (η)
SynRM (Referência)	2,80	80.000 h
PMSM	2,40	72.000 h
PMSynRM	2,30	68.000 h
BLDC	2,10	60.000 h

Fonte: Autoria própria (2026).

A análise conjunta desses parâmetros permite uma leitura física aprofundada sobre a robustez e o comportamento de falha esperado para cada tecnologia no *powertrain* de veículos elétricos das categorias M1 e N1:

1. SynRM (Relutância Pura): Representa o cenário de maior confiabilidade sistêmica. Possui a maior escala de vida (η) e uma falha fortemente dominada por mecanismos de desgaste mecânico e térmico previsíveis (β elevado), refletindo a ausência de componentes magnéticos e sensores no rotor.
2. PMSM (Ímãs Internos): Apresenta uma redução moderada em ambos os parâmetros. A presença de ímãs de terras raras inseridos no rotor introduz uma pequena penalidade na escala temporal e aumenta a dispersão das falhas (redução do β), embora a proteção mecânica conferida pelo núcleo de aço preserve índices elevados de sobrevivência.
3. PMSynRM (Relutância Assistida): Demonstra uma vulnerabilidade estatística superior à do PMSM convencional. A penalidade de escala é mais acentuada devido à sensibilidade das finas barreiras de fluxo magnético à ciclagem térmica e fadiga. O parâmetro de forma reduzido para 2,30 sinaliza que o comportamento de falha desta tecnologia é mais influenciado por mecanismos heterogêneos decorrentes da complexidade geométrica do rotor.
4. BLDC (Módulo de Controle e Sensores): Configura a topologia de maior risco operacional no modelo. A combinação de ímãs superficiais expostos e a dependência de sensores *Hall* resulta na menor escala de vida útil

(60.000 h) e no maior grau de incerteza temporal das falhas (β mínimo), refletindo a multiplicidade de modos de falha concorrentes.

Em suma, a Tabela 6 traduz a arquitetura física das máquinas para a linguagem probabilística. Enquanto o motor SynRM puro é modelado como um sistema de desgaste "abrupto" e tardio, o motor PMSynRM é caracterizado por um processo de degradação mais precoce e disperso. Esta diferenciação paramétrica é fundamental para que os resultados das análises de modelagem computacionais em Diagramas de Blocos (RBD) reflitam as reais limitações e potencialidades de cada tecnologia sob condições de uso automotivo urbano.

4.4.6 Comportamento Dinâmico das Curvas de Confiabilidade

A tradução dos parâmetros numéricos de Weibull para o domínio gráfico permite visualizar como a confiabilidade de cada topologia decai ao longo do tempo. A função de confiabilidade, $R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta}$, é governada pela interação entre a escala (η) e a forma (β), resultando em trajetórias de sobrevivência distintas para cada tecnologia de motor:

1. Deslocamento Temporal (η): A redução da vida característica provoca um deslocamento da curva para a esquerda. Assim, motores com menor η (como o BLDC e o PMSynRM) apresentam uma queda de confiabilidade cronologicamente anterior à referência SynRM.
2. Dispersão da Taxa de Falha (β): A redução do parâmetro de forma torna a curva menos abrupta e mais "achatada". Enquanto o SynRM apresenta um decaimento súbito ao final da vida útil (típico de desgaste concentrado), as topologias com menor β apresentam falhas distribuídas de forma mais heterogênea ao longo do ciclo de operação.

Para validar a hierarquia de robustez, realizou-se o cálculo pontual da confiabilidade para um tempo de missão de 20.000 horas, representativo do estágio inicial de operação do *powertrain*. Os resultados demonstram a superioridade estatística das máquinas com menor complexidade rotórica:

- SynRM: $R(20.000) = e^{-\left(\frac{20.000}{80.000}\right)^{2,8}} \approx 0,980$
- PMSM: $R(20.000) = e^{-\left(\frac{20.000}{72.000}\right)^{2,4}} \approx 0,953$
- PMSynRM: $R(20.000) = e^{-\left(\frac{20.000}{68.000}\right)^{2,3}} \approx 0,940$

- BLDC: $R(20.000) = e^{-\left(\frac{20.000}{60.000}\right)^{2,1}} \approx 0,906$

Nesta fase, a ordem de sobrevivência ($R_{SynRM} > R_{PMSM} > R_{PMSynRM} > R_{BLDC}$) confirma que o motor síncrono de relutância pura preserva a maior integridade operacional, enquanto o motor BLDC já apresenta um parâmetro de falhas acumuladas próximo a 10%.

À medida que o tempo de operação avança para 60.000 horas, as diferenças entre as tecnologias tornam-se mais acentuadas, revelando nuances importantes sobre a inclinação das curvas:

- SynRM: $R(60.000) = e^{-\left(\frac{60.000}{80.000}\right)^{2,8}} \approx 0,439$
- PMSM: $R(60.000) = e^{-\left(\frac{60.000}{72.000}\right)^{2,4}} \approx 0,331$
- PMSynRM: $R(60.000) = e^{-\left(\frac{60.000}{68.000}\right)^{2,3}} \approx 0,284$
- BLDC: $R(60.000) = e^{-\left(\frac{60.000}{60.000}\right)^{2,1}} = e^{-1} \approx 0,368$

A análise desse estágio revela um fenômeno estatístico sofisticado: embora o motor BLDC possua a menor vida característica ($\eta = 60.000$ h), sua confiabilidade aos 60.000 h (36,8%) é numericamente superior à do PMSynRM e do PMSM no mesmo instante.

Este comportamento decorre da interação conjunta de β e η . Como o BLDC possui o menor parâmetro de forma, sua curva de decaimento é mais suave (maior dispersão), o que gera uma "cauda" de sobrevivência mais longa para as unidades remanescentes. Em contrapartida, os motores PMSM e PMSynRM, por possuírem um β mais elevado, apresentam um processo de falha mais concentrado e abrupto próximo ao fim da vida útil, resultando em uma queda de sobrevivência mais célere nesse intervalo específico.

Esta dinâmica demonstra que os parâmetros β e η devem ser invariavelmente interpretados de forma indissociável. A parametrização adotada assegura que o modelo de análise computacional capture não apenas a "morte prematura" das topologias mais complexas, mas também a incerteza e a dispersão temporal das falhas.

Com a validação desses comportamentos individuais, a pesquisa prossegue para a análise computacional do sistema integral no *software* ReliaSoft BlockSim, onde o impacto do motor será ponderado em conjunto com a bateria, o inversor e a

unidade de distribuição, sob diferentes arquiteturas de tração e lógicas de redundância, definindo a viabilidade industrial do motor PMSynRM para as categorias veiculares M1 e N1.

4.4.7 Distinção entre Vida Característica (η) e Tempo Médio até a Falha ($MTTF$)

É imperativo ressaltar que, na distribuição de Weibull, o parâmetro de escala η não deve ser confundido com a média aritmética dos tempos de falha ($MTTF$). Enquanto η representa o tempo necessário para que aproximadamente 63,2% da população atinja o estado de falha, o $MTTF$ é uma função dependente tanto da escala quanto da forma (β), calculada pela Equação (21):

$$MTTF = \eta \Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right) \quad (21)$$

Conseqüentemente, como cada topologia de motor possui pares (β, η) distintos, cada uma apresentará seu próprio $MTTF$ resultante. A Tabela 7 apresenta o comparativo desses indicadores, demonstrando que a penalização aplicada em η reflete-se proporcionalmente na redução da vida média esperada.

Tabela 7 - Comparativo de Indicadores de Vida Média Resultantes

Tecnologia	β	η (h)	MTTF Resultante (h)
SynRM (Ref.)	2,80	80.000	≈ 71.300
PMSM	2,40	72.000	≈ 63.800
PMSynRM	2,30	68.000	≈ 60.200
BLDC	2,10	60.000	≈ 53.200

Fonte: Aatoria própria (2026).

4.4.8 Natureza Heurística e dualidade do modelo

Os fatores de penalidade adotados (1,00,0,90,0,85 e 0,75) não constituem constantes universais da literatura, mas sim hipóteses de engenharia estabelecidas nesta pesquisa. Eles representam decisões de modelagem baseadas em julgamento técnico e evidências extraídas da revisão sistemática, funcionando como coeficientes de severidade topológica (k_{top}).

A magnitude dessas penalidades é uma simplificação necessária para a análise computacional comparativa, reconhecendo que a robustez real de um motor depende de uma multiplicidade de variáveis extrínsecas, tais como: a qualidade dos

processos de fabricação, o regime de carga térmica, a eficiência do sistema de ventilação, o perfil de missão urbana (ciclo de condução), o nível de proteção mecânica dos ímãs e a precisão do controle vetorial. Assim, os fatores de penalidade atuam como *proxies* para essas incertezas, permitindo uma análise de sensibilidade entre as arquiteturas de rotor.

A parametrização executada neste estudo integra dois níveis de racionalidade que se complementam para conferir realismo ao modelo de confiabilidade:

1. Penalidade Física (Engenharia de Produto): Fundamenta-se na vulnerabilidade construtiva. Justifica porque ímãs internos (IPM) são mais resilientes que ímãs superficiais (SPM), ou porque a complexidade geométrica das barreiras de fluxo no PMSynRM eleva a concentração de tensões mecânicas e térmicas.
2. Penalidade Estatística (Engenharia de Confiabilidade): Traduz a vulnerabilidade física para o domínio probabilístico. A redução de η antecipa a ocorrência das falhas na linha do tempo, enquanto a redução de β altera a inclinação da curva, sinalizando que a introdução de novos componentes (ímãs e sensores) torna o padrão de falha mais heterogêneo e disperso.

4.4.9 Distinção entre Métricas de Vida: L_{10} , B_{10} e η

A validação dos parâmetros de Weibull exige a distinção rigorosa entre diferentes terminologias de vida útil utilizadas na indústria e na estatística. É comum a ocorrência de confusões conceituais entre a vida nominal de rolamentos, o tempo de falha de componentes e a escala da distribuição, conceitos que este estudo diferencia conforme segue:

1. L_{10} (Vida Nominal de Rolamentos): É uma métrica específica da engenharia mecânica (padronizada pela norma ISO 281), que define o tempo no qual se espera que 90% de um grupo de rolamentos idênticos sobreviva sob condições de carga específicas.
2. B_{10} (Vida Segura do Sistema): Utilizado na engenharia de confiabilidade para designar o tempo no qual 10% da população de um determinado item (neste caso, o motor completo) atingirá a falha. Embora numericamente

análogo ao L_{10} , o B_{10} é uma métrica sistêmica que engloba todos os modos de falha concorrentes.

3. η (Vida Característica): Representa o parâmetro de escala da distribuição de Weibull, definindo o tempo necessário para que 63,2% da amostra falhe.

É imperativo salientar que $B_{10} \neq \eta$. A relação entre a vida segura para um percentual de falha p e os parâmetros de Weibull é governada pela Equação (22):

$$B_p = \eta \cdot [-\ln(1 - p)]^{1/\beta} \quad (22)$$

Para o cálculo da vida B_{10} ($p = 0,10$), a expressão simplifica-se utilizando o termo $-\ln(0,90) \approx 0,10536$, conforme Equação (23):

$$B_{10} = \eta \cdot [0,10536]^{1/\beta} \quad (23)$$

4.4.10 Validação do Modelo: O Caso do Motor BLDC

Para verificar a aderência da parametrização adotada à realidade industrial, aplicou-se a equação do B_{10} ao motor BLDC, que recebeu as maiores penalizações de forma e escala ($\beta = 2,1; \eta = 60.000$ h). O cálculo resulta em:

$$B_{10} = 60.000 \cdot [0,10536]^{\frac{1}{2,1}} \approx 20,520 \text{ h}$$

Este resultado, de aproximadamente 20.600 horas, demonstra a consistência do modelo. Referências técnicas e guias de fabricantes de motores DC sem escovas apontam que a vida útil L_{10} típica de seus rolamentos situa-se na faixa de 20.000 a 50.000 horas em velocidades moderadas. O fato de o B_{10} calculado situar-se no limite inferior desta faixa valida a premissa de severidade operacional adotada para o contexto veicular M1/N1, confirmando que a combinação dos parâmetros (β, η) reflete com acurácia o comportamento de degradação esperado.

4.4.11 Estimativa Comparativa de Vida B_{10} por Topologia

A aplicação da equação de vida segura para todas as tecnologias analisadas permite quantificar o impacto das penalidades topológicas no horizonte de operação confiável. A Tabela 8 consolida as estimativas de B_{10} , evidenciando como a complexidade do rotor antecipa a necessidade de intervenções de manutenção.

Tabela 8 - Estimativa de Vida Segura (B_{10}) das Topologias

Tecnologia	β	η (h)	MTTF Resultante (h)	Vida B_{10} (h)
SynRM (Ref.)	2,80	80.000	\approx 71.300	35.800
PMSM	2,40	72.000	\approx 63.800	28.225
PMSynRM	2,30	68.000	\approx 60.200	25.680
BLDC	2,10	60.000	\approx 53.200	20.875

Fonte: Autoria própria (2026).

A análise dos resultados permite concluir que a aplicação conjunta das penalidades em escala (η) e forma (β) produz um efeito sinérgico na redução da vida segura. O motor PMSynRM (relutância assistida) apresenta uma redução de aproximadamente 28% no tempo B_{10} em relação à referência de relutância pura, e de cerca de 9% em relação ao PMSM tradicional.

Esta métrica é de suma importância para o projeto de veículos das categorias M1 e N1, pois o B_{10} define o limite de segurança para o acionamento de garantias e planos de manutenção preventiva. Desta forma, a parametrização técnica encerra-se com a confirmação de que, embora o PMSynRM ofereça vantagens em custo e materiais, sua maior vulnerabilidade intrínseca deve ser compensada no nível de projeto sistêmico, justificativa que fundamenta a análise de redundância nas análises de modelagem computacionais subsequentes.

A obtenção dos dados de entrada para a análise computacional sistêmica foi processada em duas etapas encadeadas:

- Etapa I (Ajuste de Forma): Estimou-se o β_{eff} para cada topologia através da composição ponderada de riscos concorrentes. Este procedimento garantiu que motores com mecanismos de falha adicionais (desmagnetização e sensoramento) apresentassem um comportamento agregado mais disperso temporalmente, refletindo com falhas menos previsíveis.
- Etapa II (Ajuste de Escala): Aplicou-se o fator topológico multiplicativo (k_{top}) sobre a vida característica de referência ($\eta_{base} = 80.000$ h). Esta etapa quantificou a redução da escala temporal de vida associada à complexidade construtiva e à exposição de componentes críticos.

Como resultado, os pares finais (β, η) — SynRM (2,80; 80k), PMSM (2,40; 72k), PMSynRM (2,30; 68k) e BLDC (2,10; 60k) — não devem ser interpretados como constantes universais de durabilidade, mas sim como parâmetros de análise

computacional comparativa calibrados sob hipóteses operacionais equivalentes para o segmento M1/N1.

Em suma, o modelo final não aplica apenas reduções arbitrárias na vida útil dos motores, mas representa duas dimensões distintas do processo de degradação: o parâmetro β descreve a forma temporal da falha (a natureza do envelhecimento), enquanto o parâmetro η define a escala de tempo característica (o horizonte de sobrevivência).

A interpretação final consolida o SynRM como o padrão de robustez absoluta, enquanto o PMSM e o PMSynRM apresentam perdas graduais de confiabilidade intrínseca em troca de ganhos em densidade de torque e eficiência magnética. No caso específico do motor de relutância assistida (PMSynRM), o modelo reconhece sua maior sensibilidade estrutural em relação ao PMSM tradicional. Esta diferenciação paramétrica é o que confere a sensibilidade necessária para a próxima fase deste estudo: a análise computacional integrada no *software* ReliaSoft BlockSim, onde se avaliará se estratégias de redundância lógica no *powertrain* são capazes de mitigar essas fragilidades topológicas individuais.

4.5 Embasamento Bibliográfico das Premissas de Parametrização

Para assegurar o lastro científico e a validade dos resultados obtidos nas análises de modelagem computacionais, os parâmetros de forma (β) atribuídos a cada modo de falha foram extraídos e calibrados a partir de estudos experimentais e normas técnicas de referência. O Quadro 10 sintetiza as fontes bibliográficas que sustentam a escolha de cada valor de β individual utilizado na composição dos riscos concorrentes.

Quadro 10 – Embasamento Bibliográfico dos Parâmetros de Forma (β)

Modo de Falha	Faixa Publicada	β Adotado	Fonte-Chave de Referência
Fadiga de Rolamentos	2,0 – 4,0	2,8	Portescap (2021) e Machine Design (2026).
Degradação de Isolação	2,0 – 3,0	2,5	IEEE Std 493 e Albrecht et al. (1986).

Modo de Falha	Faixa Publicada	β Adotado	Fonte-Chave de Referência
Desmagnetização (IPM)	1,3 – 2,0	1,6	MDPI Sensors (2023) e Springer JPE (2024).
Desmagnetização (Barreiras)	1,2 – 1,8	1,4	MDPI Energies (2025).
Falha de Sensor Hall	1,5 – 2,0	1,6	ZGC Motors (2025).

Fonte: Autoria própria (2026).

A análise das referências revela a consistência técnica das premissas adotadas:

1. Mecanismos Mecânicos e Dielétricos: A adoção de $\beta = 2,8$ para rolamentos e $\beta = 2,5$ para isolamento encontra suporte em trabalhos seminais como os de Albrecht et al. (1986) e no *IEEE Gold Book*, que caracterizam esses modos como processos de *wear-out* (desgaste) fortemente acelerados e concentrados.
2. Mecanismos Magnéticos: Para o motor PMSM (configuração IPM), o valor de 1,6 fundamenta-se em diagnósticos de desmagnetização via processamento de sinais e *machine learning* (EWERT et al., 2023), que apontam uma taxa de falha menos abrupta devido à proteção mecânica dos ímãs. Já para o motor PMSynRM (barreiras), o valor de 1,4 reflete a maior sensibilidade térmica e o início mais variável da degradação magnética em geometrias confinadas.
3. Mecanismos Eletrônicos: A falha de sensores Hall em motores BLDC, modelada com $\beta = 1,6$, é consistente com guias industriais que apontam a influência de estresses ambientais e vibrações na degradação desses componentes.

Com a apresentação deste embasamento, encerra-se a seção de parametrização técnica, a qual possui uma abordagem matemática do material apresentado (Apêndice C). A convergência entre os dados experimentais da literatura e a modelagem estatística proposta confere a robustez necessária para que os resultados das análises de modelagem computacionais de confiabilidade do

powertrain sejam interpretados como uma representação fiel do comportamento esperado para veículos elétricos das categorias M1 e N1.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta a interpretação dos dados obtidos por meio da análise computacional no *software* ReliaSoft BlockSim. A análise avalia a robustez das topologias de motor, o impacto da infraestrutura integrada e a influência de diferentes arranjos de tração na confiabilidade do veículo elétrico das categorias M1 e N1.

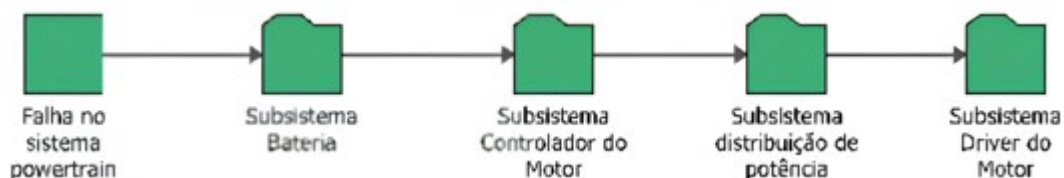
5.1 Arquitetura dos Diagramas de Blocos de Confiabilidade (RBD)

Neste trabalho, o Diagrama de Blocos de Confiabilidade (RBD) foi utilizado para representar a lógica funcional de sobrevivência do *powertrain*, isto é, quais subsistemas precisam permanecer operacionais para que a missão de tração seja cumprida. A Árvore de Falhas (FTA), por sua vez, foi empregada para detalhar os eventos de falha internos de cada subsistema representado no RBD. Assim, os dois métodos foram utilizados de forma complementar: o RBD modela a confiabilidade sistêmica e a FTA explicita os caminhos causais de falhas dos blocos que compõem o sistema.

A modelagem probabilística deste estudo fundamentou-se na decomposição hierárquica do *powertrain* proposta por Tang et al. (2021). A análise computacional foi estruturada em RBD, como mostrada na Figura 6, nos quais cada bloco é sustentado por uma FTA detalhada na Figura 7.

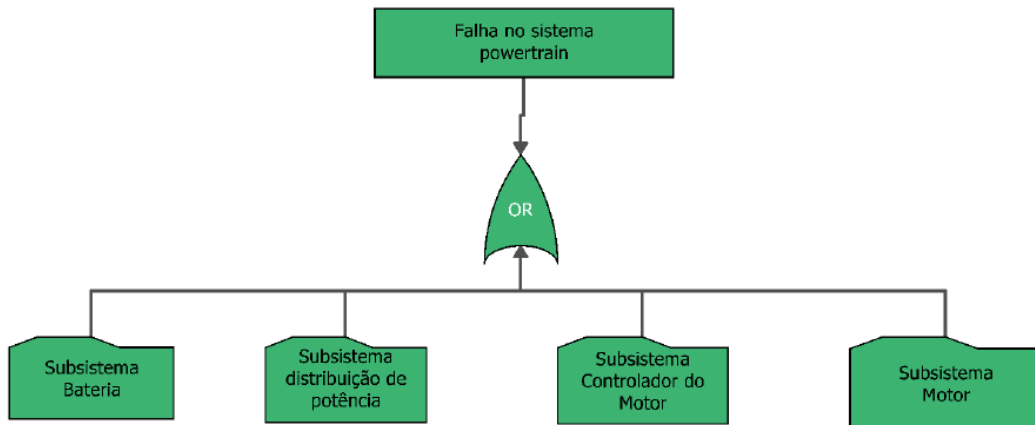
A lógica de interdependência adotada assume que o veículo opera como um sistema em série: a falha de qualquer um dos grandes subsistemas interrompe a tração e resulta na falha da missão do veículo.

Figura 6 - Diagrama de blocos do *powertrain* visão de primeiro nível – Sistemas



Fonte: Autoria própria (2026), baseado em Tang et al.(2021), utilizando o *software* ReliaSoft BlockSim

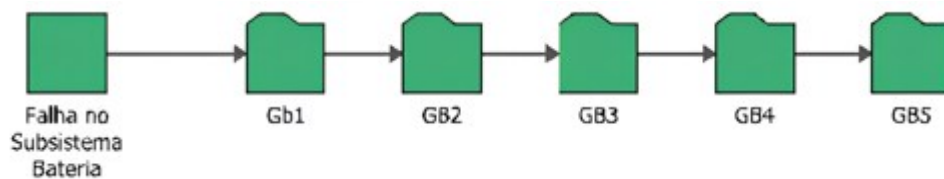
Figura 7 – Árvore de falhas do *powertrain*



Fonte: Autoria própria (2026), baseado em Tang et al.(2021), utilizando o *software* ReliaSoft BlockSim

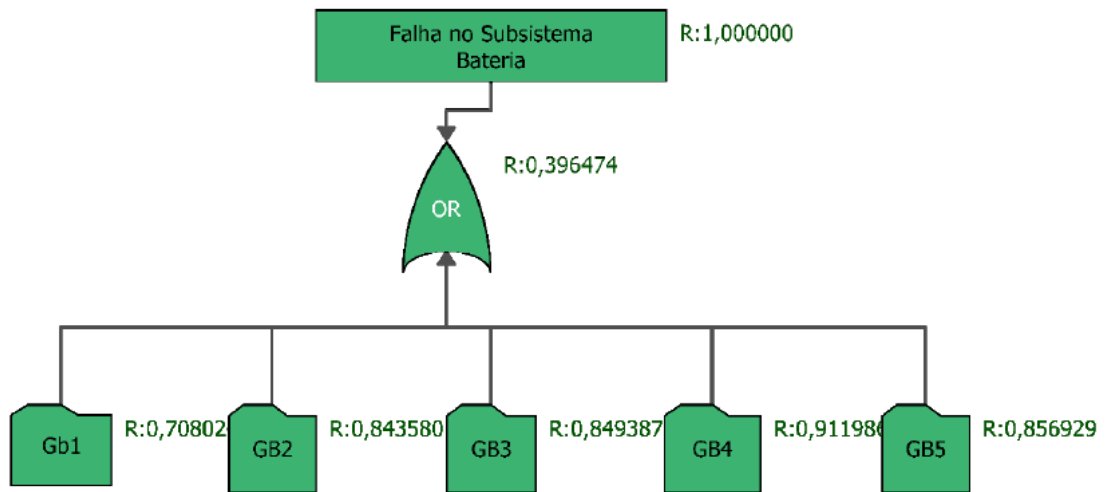
1. Subsistema Bateria: Como mostrado na Figura 8, é modelado como uma associação em série de componentes críticos, incluindo módulos de células de íons de lítio (Gb1 a GB5) e o circuito de gerenciamento (*Battery Management System – BMS*). A árvore de falhas ilustrada na Figura 9 indica interrupção por falha térmica ou curto-circuito em qualquer estágio.

Figura 8 - Diagrama de blocos do Subsistema Bateria



Fonte: Autoria própria (2026), baseado em Tang et al.(2021), utilizando o *software* ReliaSoft BlockSim

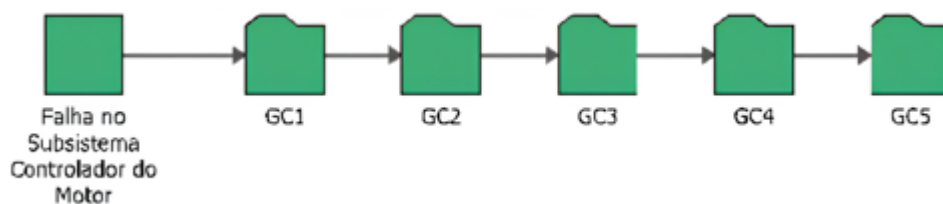
Figura 9 – Árvore de falhas do Subsistema Bateria



Fonte: Autoria própria (2026), baseado em Tang et al.(2021), utilizando o *software* ReliaSoft BlockSim

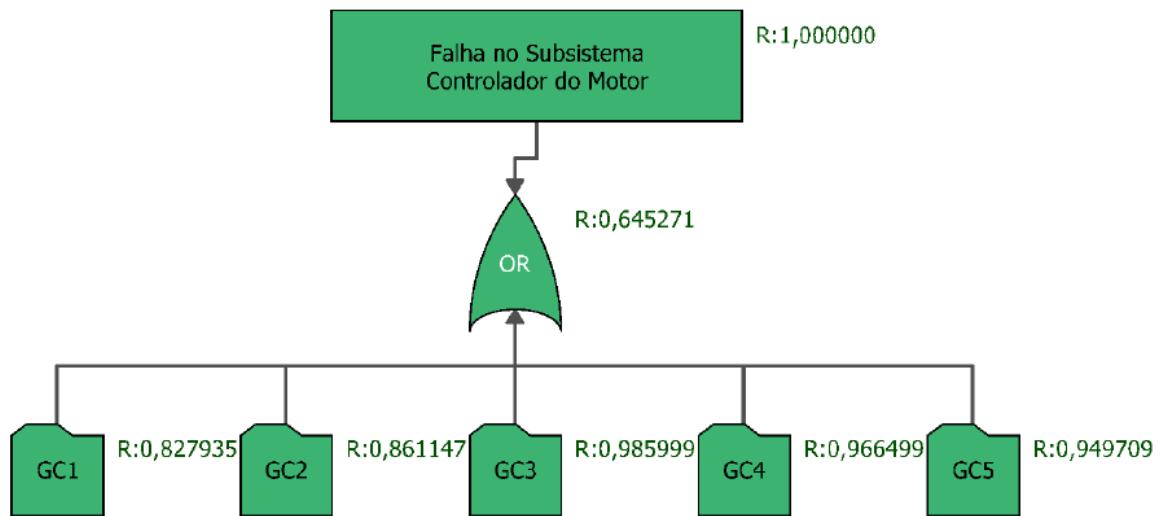
2. Subsistema Controlador do Motor: Como indicado na Figura 10, é composto por circuitos lógicos de controle, processador de sinal digital (DSP) e interfaces de comunicação (blocos GC1 a GC5) conectados logicamente em série. A árvore de falhas ilustrada na Figura 11 indica interrupção por falha no subsistema controlador do motor.

Figura 10 - Diagrama de blocos do Subsistema Controlador do Motor



Fonte: Autoria própria (2026), baseado em Tang et al.(2021), utilizando o *software* ReliaSoft BlockSim

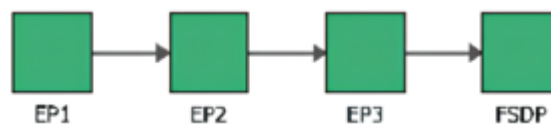
Figura 11 - Árvore de falhas do Subsistema Controlador do Motor



Fonte: Autoria própria (2026), baseado em Tang et al.(2021), utilizando o software ReliaSoft BlockSim

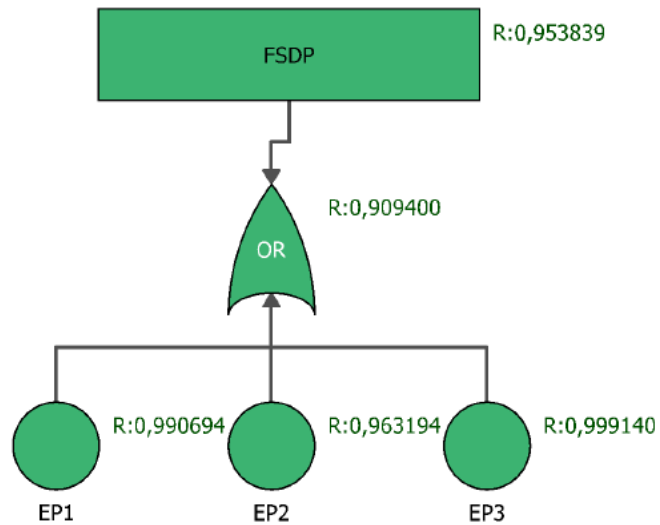
3. Subsistema Distribuição de Potência: Como mostrado na Figura 12, é responsável pelo barramento de corrente contínua (CC), fusíveis de proteção, contadores principais e cabeamento de alta potência (blocos EP1, EP2 e EP3) mapeados em uma lógica série via porta OR. Sua árvore de falhas está ilustrada na Figura 13.

Figura 12- Diagrama de blocos do Subsistema distribuição de potência



Fonte: Autoria própria (2026), baseado em Tang et al.(2021), utilizando o software ReliaSoft BlockSim

Figura 13- Árvore de falhas do Subsistema distribuição de potência



Fonte: Autoria própria (2026), baseado em Tang et al.(2021), utilizando o *software* ReliaSoft BlockSim

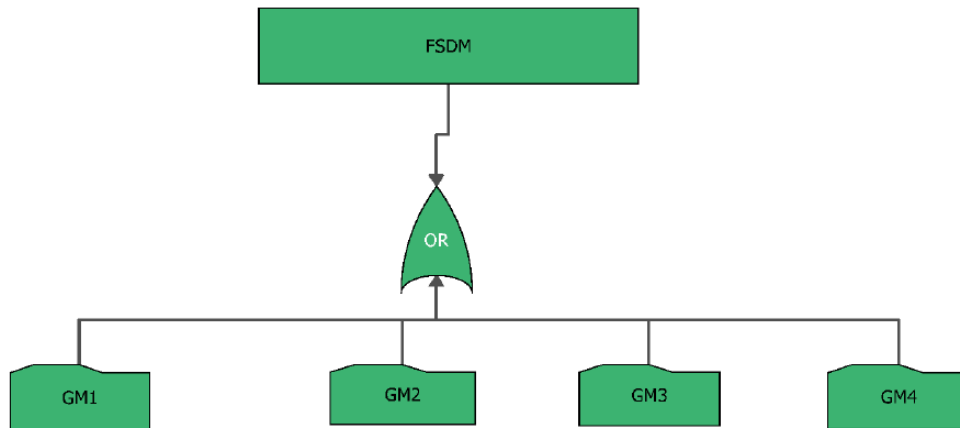
4. Subsistema *Driver* do Motor (Unidade de Tração): Como mostrado na Figura 14, este subsistema engloba fisicamente o inversor de frequência trifásico (módulos de transistores bipolares de porta isolada – IGBTs) e o motor síncrono propriamente dito. É neste bloco que ocorrem as substituições paramétricas das tabelas de Weibull para avaliar o impacto isolado e sistêmico das topologias SynRM, PMSynRM, PMSM e BLDC. A Figura 15 ilustra a árvore de falhas desse subsistema.

Figura 14 - Diagrama de blocos do Subsistema *Driver* do motor



Fonte: Autoria própria (2026), utilizando o *software* ReliaSoft BlockSim

Figura 15 – Árvore de Falhas do Subsistema *Driver* do motor

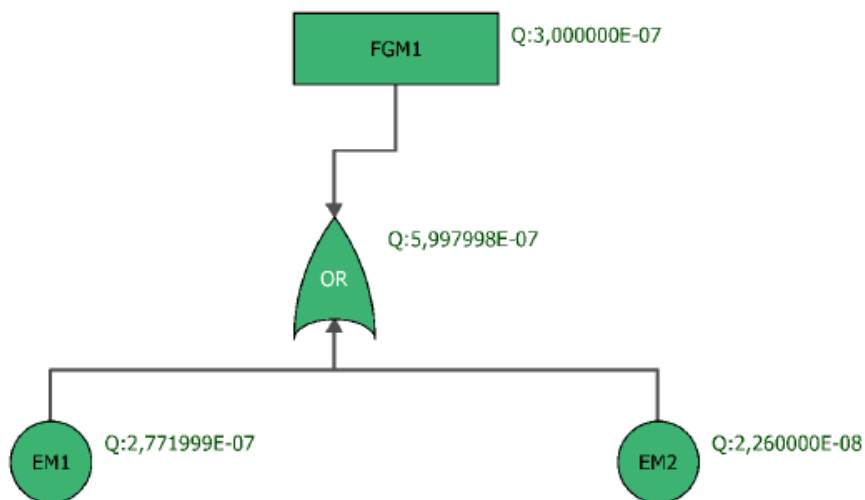


Fonte: Autoria própria (2026), baseado em Tang et al.(2021), utilizando o software ReliaSoft BlockSim

A árvore de falhas detalhada desenvolvida para o motor elétrico (integrada ao *Driver*) decompõe a máquina em quatro módulos de falha principais conectados a uma porta lógica *OR* condicional:

- Falha do Rotor (GM1): Falhas por fadiga estrutural e desequilíbrio dinâmico, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Árvore de falhas do Conjunto GM1



Fonte: Autoria própria (2026), baseado em Tang et al.(2021), utilizando o software ReliaSoft BlockSim

- Falha do Estator (GM2): Curto-circuito entre espiras, quebra de isolamento galvânico (EM3) ou falhas no núcleo magnético de chapas laminadas (EM4).
- Falha no Transdutor/Sensores (GM3): Perda de sinal de sincronismo por quebra dos sensores de posição ou sensores térmicos (EM5 e EM6).
- Outros Componentes (GM4): Falhas mecânicas associadas à carcaça, eixos de transmissão ou vedações contra umidade/contaminação (EM7, EM8 e EM9).

5.2 Resultados das Análises de Confiabilidade Isoladas do Subsistema *Driver*

Para compreender o impacto das características construtivas na confiabilidade da unidade de tração, realizou-se a análise computacional do subsistema *Driver* de forma isolada, desconsiderando as taxas de falha da bateria e da infraestrutura de distribuição. A análise computacional calculou as métricas de confiabilidade no tempo crítico de 35.000 horas, o MTTF estimado, bem como os tempos de vida B_{10} (tempo para 10% de falha) e a mediana de vida B_{50} , conforme consolidado na Tabela 9.

Tabela 9 - Comparativo da confiabilidade do Subsistema *Driver*.

Parâmetro Estatístico	SynRM	PMSM	PMSynRM	BLDC
Parâmetro de Forma β	2,80	2,40	2,30	2,10
Vida Característica η	80.000 h	72.000 h	68.000 h	60.000 h
Confiabilidade no Tempo $R(35.000h)$	0,8215	0,7597	0,7299	0,6569
MTTF Estimado do Sistema	63.731,38 h	57.530,73 h	54.544,43 h	48.544,83 h
Vida B_{10}	24.575,34 h	20.387,81 h	18.894,42 h	15.849,60 h
Vida Mediana (B_{50})	63.190,34 h	55.602,76 h	52.311,13 h	45.732,16 h
Modo Dominante Observado	Rolamentos / Isolação	Rolamentos / NdFeB IPM	Rolamentos / Ímãs / Isolação	Rolamentos / Hall / SPM NdFeB

Fonte: Autoria própria (2026), utilizando o software ReliaSoft BlockSim.

Os resultados demonstram o benefício da simplicidade mecânica do motor de relutância pura (SynRM), que obteve a maior confiabilidade no ponto crítico (82,15%) e um MTTF superior a 63.700 horas. A ausência de massas concentradas de terras raras no rotor elimina o risco de desmagnetização térmica sob sobrecarga, conferindo um comportamento de desgaste puramente mecânico e previsível.

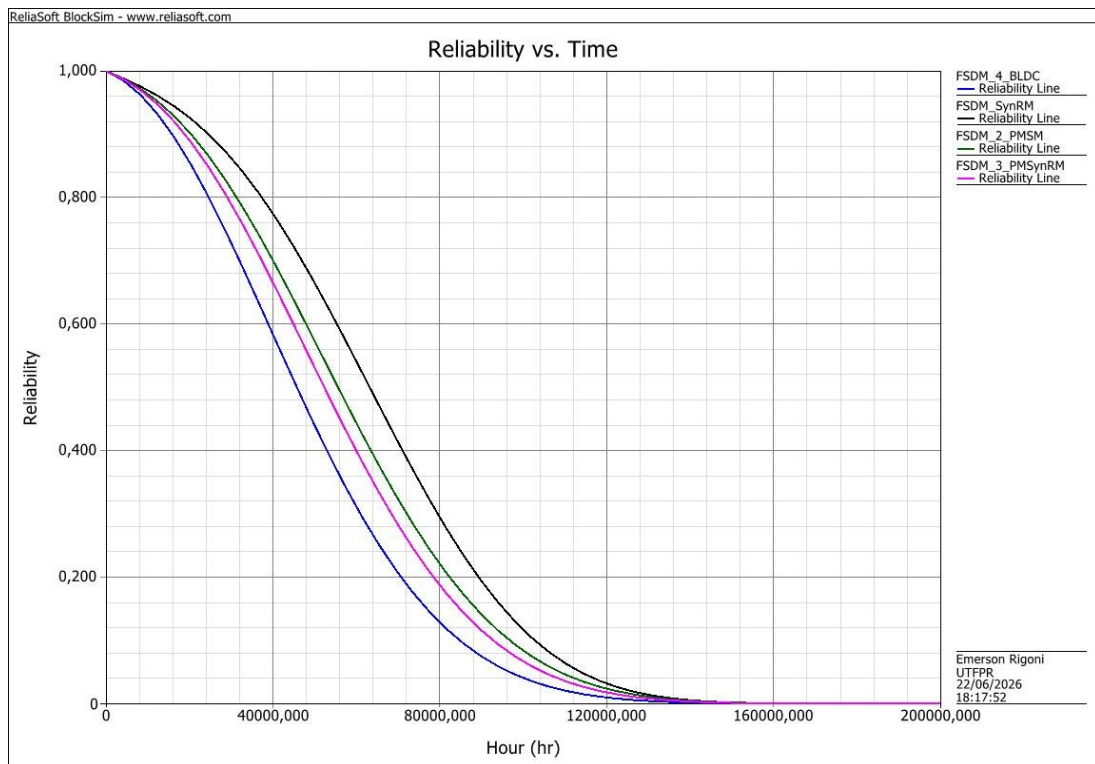
Ao comparar as duas topologias centrais para o segmento M1/N1 — PMSM e PMSynRM —, observa-se a superioridade estatística do PMSM convencional. O motor PMSM com ímãs internos (IPM) mantém métricas superiores em todos os parâmetros. Ele obteve uma vida B_{10} de 20.387 horas contra 18.894 horas do PMSynRM, o que representa uma extensão de aproximadamente 8% em vida útil antes da necessidade de intervenções preventivas.

O motor PMSynRM sofre uma redução em seu MTTF estimado (54.544 h) devido ao seu β efetivo mais baixo ($\beta=2,30$). Fisicamente, a inserção de filetes de ímãs nas complexas barreiras geométricas de relutância aumenta a participação de modos concorrentes de falha dispersos, como trincas por estresse mecânico centrífugo nas finas pontes de ferro do rotor e desmagnetização por concentração de fluxo térmico. Essa complexidade "suaviza" a curva estatística, o que, paradoxalmente, antecipa a ocorrência das primeiras falhas (fenômeno observado no menor valor de B_{10}), indicando que a economia de materiais críticos no PMSynRM exige um maior rigor no projeto estrutural do rotor.

A partir dos parâmetros consolidados na Tabela 9, torna-se possível projetar o comportamento dinâmico da confiabilidade para cada topologia. A transição dos dados numéricos para o domínio gráfico, realizada através do software ReliaSoft BlockSim, permite uma interpretação visual direta da robustez relativa entre as tecnologias.

A Figura 17 ilustra a probabilidade de sobrevivência ($R(t)$) de cada topologia ao longo do tempo. Partindo de uma confiabilidade de 1,00 (100%) no instante zero, as curvas decaem de forma distinta conforme a severidade de seus respectivos projetos mecânicos e magnéticos:

Figura 17 – Confiabilidade em função do tempo (*Reliability vs. Time*)



Fonte: Autoria própria (2026), utilizando o software ReliaSoft BlockSim.

- **SynRM (Linha Negra):** Apresenta-se como a topologia mais robusta, mantendo a maior taxa de sobrevivência em todo o horizonte simulado. Isso valida a premissa de que a ausência de ímãs e sensores complexos reduz os pontos de vulnerabilidade do sistema.
- **PMSM (Linha Verde):** Demonstra um desempenho superior ao PMSynRM, beneficiando-se de uma escala de vida (η) mais elevada e um regime de desgaste menos agressivo.
- **PMSynRM (Linha Rosa):** Posiciona-se em um patamar intermediário, evidenciando o impacto negativo da complexidade estrutural do rotor (barreiras de fluxo e ímãs internos) na confiabilidade de longo prazo quando comparado ao PMSM tradicional.
- **BLDC (Linha Azul):** Exibe o decaimento mais prematuro da curva de confiabilidade. A inclinação acentuada reflete as vulnerabilidades dos ímãs na superfície (SPM) e dos sensores de efeito Hall, que antecipam a probabilidade de falha sistêmica.

A Figura 18 apresenta a função de inconfiabilidade ($Q(t)$), também denominada probabilidade acumulada de falha. Este gráfico quantifica o risco crescente de que uma unidade sofra uma avaria à medida que o tempo de operação avança:

Figura 18 – Inconfiabilidade em função do tempo (*Unreliability vs. Time*).



Fonte: Autoria própria (2026), utilizando o **software ReliaSoft BlockSim**.

- **Antecipação de Falhas no BLDC (Linha Azul):** A curva do motor BLDC é a que se desloca mais rapidamente para o topo do gráfico, indicando que, em qualquer marco temporal, esta tecnologia apresenta a maior probabilidade de estar em estado de falha. Por exemplo, ao atingir aproximadamente 40.000 horas, o BLDC já apresenta um risco acumulado significativamente superior às demais topologias.
- **Diferencial entre PMSynRM e PMSM:** O gráfico permite observar com clareza o distanciamento entre a **Linha Rosa (PMSynRM)** e a **Linha Verde (PMSM)**. Embora ambas utilizem tecnologia síncrona, a maior complexidade do rotor de relutância assistida resulta em uma curva de inconfiabilidade mais "íngreme",

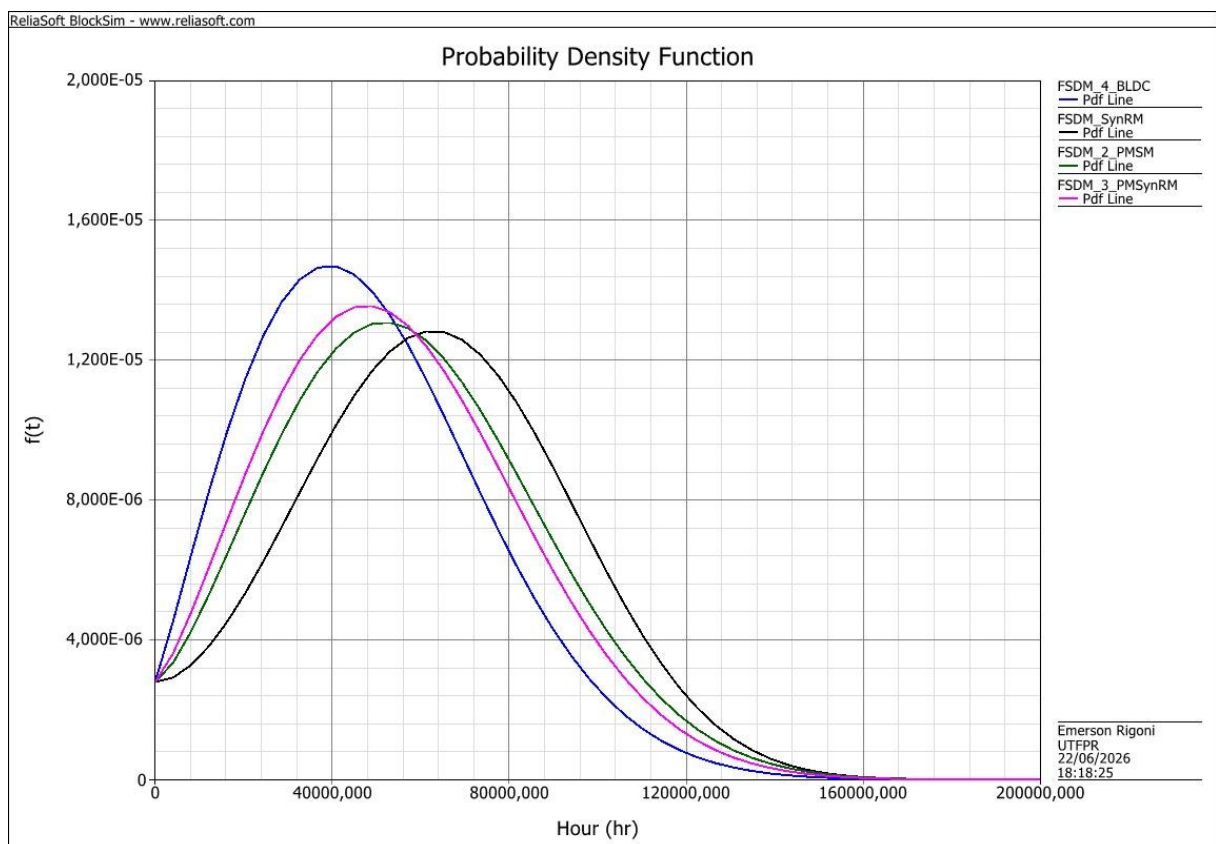
validando a análise de que o PMSynRM atinge estados de falha de forma mais precoce que o PMSM tradicional.

- **Robustez do SynRM (Linha Negra):** A curva de relutância síncrona pura mantém-se como a mais conservadora, retardando ao máximo o crescimento da probabilidade de falha. Este comportamento é crucial para aplicações que visam longos períodos de operação sem necessidade de manutenção corretiva.

Visualmente, a Figura 18 ratifica os cálculos de **Vida Segura** (B_{10}) apresentados anteriormente. Onde cada curva cruza o patamar de 0,100 (10%) no eixo vertical, observa-se o exato momento em que 10% da frota de motores teria falhado, reforçando a hierarquia de robustez: **SynRM > PMSM > PMSynRM > BLDC**.

A Figura 19 apresenta a Função Densidade de Probabilidade (*Probability Density Function*), que descreve a distribuição das falhas ao longo do tempo. O pico de cada curva (a moda da distribuição) indica o período em que há a maior concentração de falhas para cada tecnologia:

Figura 19 – Função Densidade de Probabilidade de falhas ($f(t)$).



Fonte: Autoria própria (2026), utilizando o software ReliaSoft BlockSim.

- **Precocidade e Concentração no BLDC (Linha Azul):** O motor BLDC apresenta o pico mais elevado e deslocado para a esquerda (entre 40.000 e 50.000 horas). Isso demonstra que as falhas nesta tecnologia não apenas ocorrem mais cedo, como também são muito concentradas em um intervalo de tempo menor, refletindo a menor robustez dos seus componentes internos.
- **Deslocamento e Dispersão no SynRM (Linha Negra):** A curva da topologia de relutância síncrona pura é a que possui o pico mais baixo e mais deslocado para a direita (próximo de 70.000 a 80.000 horas). Esse "achatamento" da curva indica que as falhas são mais distribuídas ao longo do tempo e ocorrem em estágios muito mais avançados de operação, confirmando o maior Tempo Médio Para Falha (MTTF) desta categoria.
- **Análise das Topologias PMSM e PMSynRM:** As curvas **Verde (PMSM)** e **Rosa (PMSynRM)** ocupam o espaço intermediário. É visível que o pico do PMSM ocorre após o do PMSynRM, reforçando que a adição de ímãs em um rotor de relutância (PMSynRM) cria uma densidade de falhas mais precoce do que no motor de ímãs permanentes convencional (PMSM).

Em termos estatísticos, a Figura 19 revela como os parâmetros de escala (η) e forma (β) definidos no Capítulo 4 moldam a "janela de falha" do sistema. Quanto mais à direita o pico, maior é a longevidade da tecnologia; quanto mais estreito o pico, mais previsível (e concentrado) é o processo de desgaste final da máquina.

A Figura 20 apresenta a Taxa de Falha instantânea ($\lambda(t)$), que indica a velocidade com que o risco de quebra aumenta para um motor que sobreviveu até o instante t . Esta curva é o indicador direto do regime de operação da máquina:

Figura 20 – Taxa de Falha em função do tempo (*Failure Rate vs. Time*).



Fonte: Autoria própria (2026), utilizando o **software ReliaSoft BlockSim**.

- **Validação do Regime de Desgaste:** Como todas as curvas possuem uma inclinação positiva crescente, confirma-se que todas as topologias estão modeladas sob o regime de **desgaste (*wear-out*)**. Isso decorre da parametrização de $\beta > 1$ realizada no Capítulo 4, refletindo a degradação acumulada de componentes como rolamentos e isolamento térmico.
- **A Inflexão da Curva SynRM (Linha Negra):** É interessante notar que o **SynRM**, embora seja o motor mais confiável nas figuras anteriores, apresenta a curva com a inclinação mais acentuada (maior derivada) ao final da vida útil. Isso ocorre porque o seu parâmetro de forma ($\beta = 2,8$) é o mais elevado. Em termos práticos, isso significa que o SynRM resiste por muito mais tempo sem falhas, mas quando atinge o seu limite de fadiga, as falhas ocorrem de forma muito rápida e concentrada.
- **O Risco Inicial do BLDC (Linha Azul):** O motor **BLDC** inicia com a maior taxa de falha instantânea do grupo. Sua curva é "mais plana" (menor β), o que indica

um processo de degradação mais espalhado ao longo do tempo, porém começando muito mais cedo do que nas outras tecnologias.

- **Cruzamento das Curvas:** O cruzamento observado após as 120.000 horas é um fenômeno matemático típico da distribuição Weibull. Embora a taxa de falha do SynRM se torne superior à do BLDC em estágios extremamente avançados, a Figura 17 (Confiabilidade) já demonstrou que, nesse ponto, a grande maioria das unidades de todas as topologias já teria falhado.

Em suma, a Figura 20 consolida o veredito técnico deste trabalho: a topologia de relutância síncrona pura (**SynRM**) oferece o menor risco de falha durante todo o período de vida útil projetada para o veículo elétrico, sendo a escolha mais robusta para aplicações de longa duração.

5.3 Análise de Confiabilidade Integrada do *Powertrain*

A integração dos motores ao sistema completo de tração altera drasticamente o cenário de confiabilidade. Conforme estabelecido na fundamentação baseada em Tang et al. (2021), o veículo opera em uma configuração série estrita, o que implica que a sobrevivência do sistema é o produto das sobrevivências de seus subsistemas. Os resultados consolidados para o *powertrain* completo são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Comparativo da confiabilidade do sistema *powertrain* completo.

Parâmetro Estatístico	SynRM	PMSM	PMSynRM	BLDC
Confiabilidade no Tempo $R(35.000h)$	0,2960	0,2737	0,2630	0,2367
MTTF Estimado do <i>Powertrain</i> Integral	26.708,14 h	25.464,06 h	24.868,11 h	23.508,18 h
Vida B_{10} do Sistema	3.292,75 h	3.278,03 h	3.267,81 h	3.229,21 h
Vida Métrica B_{50} (Mediana)	20.954,47 h	20.206,95 h	19.847,25 h	18.917,90 h

Fonte: Autoria própria (2026), utilizando o *software* ReliaSoft BlockSim.

A inclusão dos subsistemas de suporte provoca uma queda nos índices operacionais: no tempo de missão de 35.000 horas, a probabilidade de sobrevivência de todo o *powertrain* situa-se na faixa de apenas 23% a 29% para todas as topologias.

Este fenômeno é justificado pela configuração lógica em série governado pelo teorema do produto das probabilidades. Subsistemas como o banco de baterias (com taxa de falha de 9,251 FPMH) e o controlador de motor (1,715 FPMH) possuem densidades de componentes eletrônicos e químicos muito elevadas, atuando como os principais gargalos de confiabilidade do veículo.

Notavelmente, a análise integrada revela uma convergência estatística: a diferença absoluta de MTTF entre o motor de referência (SynRM) e a tecnologia avaliada (PMSynRM) reduz para apenas 1.840 horas. O comportamento da vida B_{10} converge para aproximadamente 3.200 horas em todos os arranjos. Isso indica que, nos estágios iniciais de operação de um veículo elétrico M1/N1, a probabilidade de falha é ditada por distúrbios elétricos e degradação química das células de bateria, tornando a superioridade mecânica intrínseca do PMSM sobre o PMSynRM menos perceptível para o usuário final no curto prazo.

Conclui-se que ganhos significativos na confiabilidade do veículo dependem mais da melhoria do gerenciamento térmico das baterias (BMS) e do sobredimensionamento térmico do inversor do que apenas da escolha da topologia do motor, o que reforça a viabilidade do PMSynRM como alternativa sustentável em sistemas integrados.

5.4 Análise Computacional de Arquiteturas Multi-Motor

Visando explorar novas configurações de tração utilizadas na indústria — como o uso de motores independentes por roda ou eixo —, expandiu-se a análise computacional para avaliar a arquitetura do *powertrain* variando o arranjo entre 1, 2, 3 e 4 motores. As ilustrações lógicas (RBD) de cada arranjo, bem como as árvores de falha (FTA) detalhadas de cada subsistema, foram apresentadas anteriormente no capítulo 5.1.

5.4.1 Configuração com Motor Único (Arranjo Monomotor)

Este cenário representa o veículo com tração convencional em apenas um eixo por meio de uma única máquina de grande porte encarregada de suprir todo o torque requerido. Os índices de desempenho para esta configuração são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Desempenho de confiabilidade para arquitetura com 1 motor.

Parâmetro Estatístico	SynRM	PMSM	PMSynRM	BLDC
Confiabilidade no Tempo $R(35.000h)$	0,7767	0,7182	0,6900	0,6200
MTTF Estimado do Arranjo	59.944,38 h	54.335,22 h	51.639,58 h	461.810,68 h
Vida B_{10}	19.554,34 h	16.919,99 h	15.907,86 h	13.711,30 h
Vida Métrica B_{50} (Mediana)	59.296,71 h	52.253,81 h	49.263,65 h	43.252,00 h

Fonte: Autoria própria (2026), utilizando o software ReliaSoft BlockSim.

No arranjo monomotor, a superioridade do PMSM é evidente, entregando uma confiabilidade de 71,82% contra 69,00% do PMSynRM. O PMSM garante uma folga operacional superior a 1.010 horas de rodagem antes que 10% atinja falhas por desgaste (B_{10}), reforçando que, em sistemas sem redundância, a fragilidade das barreiras de fluxo do PMSynRM penaliza a confiabilidade.

5.4.2 Configuração com Arranjo de 2 Motores

Avalia a divisão da tração com dois motores independentes (por exemplo, um motor acionando o eixo dianteiro e outro o eixo traseiro), operando em uma lógica onde ambos precisam funcionar para garantir a dirigibilidade plena exigida no projeto de tração integral permanente. O desempenho de confiabilidade para esta arquitetura é detalhado na Tabela 12.

Tabela 12 - Desempenho de confiabilidade para arquitetura com 2 motores.

Parâmetro Estatístico	SynRM	PMSM	PMSynRM	BLDC
Confiabilidade no Tempo $R(35.000h)$	0,7036	0,6000	0,5550	0,4499
MTTF Estimado do Arranjo	48.543,34 h	42.328,56 h	39.717,05 h	34.495,69 h
Vida B_{10}	17.502,27 h	14.400,17 h	13.297,63 h	11.016,22 h
Vida Métrica B_{50} (Mediana)	48.110,14 h	40.857,90 h	38.041,36 h	32.457,45 h

Fonte: Autoria própria (2026), utilizando o software ReliaSoft BlockSim.

Sob dependência mútua, a confiabilidade do PMSynRM cai para 55,50%. Isso ocorre porque a inserção de mais componentes complexos expostos simultaneamente ao desgaste multiplica as oportunidades de falha. O diferencial de MTTF em favor do PMSM mantém-se em torno de 2.611 horas.

5.4.3 Configuração com Arranjo de 3 Motores

Este cenário analisa um arranjo onde o veículo dispõe de três unidades motrizes. A modelagem assume uma lógica de redundância parcial ou tolerância a falhas do tipo $k - de - n$ (especificamente, um modelo 2-de-3), onde o veículo consegue completar sua missão de tração contanto que pelo menos 2 dos 3 motores permaneçam operacionais, admitindo a perda de uma unidade sem colapso total do sistema. O comportamento probabilístico e os índices de confiabilidade para esta arquitetura tolerante estão consolidados na Tabela 13.

Tabela 13 - Desempenho de confiabilidade para arquitetura tolerante com 3 motores.

Parâmetro Estatístico	SynRM	PMSM	PMSynRM	BLDC
Confiabilidade no Tempo $R(35.000h)$	0,8360	0,7970	0,7721	0,6979
MTTF Estimado do Arranjo	60.122,63 h	54.157,47 h	51.336,32 h	45.605,49 h
Vida B_{10}	23.306,41 h	21.898,22 h	21.123,23 h	19.102,06 h
Vida Métrica B_{50} (Mediana)	62.425,95 h	54.994,77 h	51.777,69 h	45.329,14 h

Fonte: Autoria própria (2026), utilizando o software ReliaSoft BlockSim.

A introdução da lógica de tolerância a falhas (redundância parcial) altera positivamente o comportamento estatístico do trem de força. Mesmo trabalhando com três motores, a confiabilidade do PMSynRM salta para 77,21% no tempo de 35.000 horas, superando os arranjos monomotor e de dois motores em série lógica.

A vida B_{10} do motor PMSM atinge expressivas 21.898 horas, mantendo uma vantagem de robustez frente às 21.123 horas registradas pelo PMSynRM. Esse resultado comprova que estratégias de gerenciamento eletrônico e controle que permitam o isolamento de um motor avariado com a continuidade da tração por unidades sobressalentes constituem o caminho mais eficiente para viabilizar o uso industrial de motores de alta densidade de torque (como o PMSynRM e o PMSM).

5.4.4 Configuração com Arranjo de 4 Motores

Nesta configuração extrema, avalia-se o uso de quatro motores síncronos compactos dedicados de forma individual para cada uma das quatro rodas do veículo elétrico leve, modelada sob lógica série estrita (4 de 4 necessários), representando o limite inferior conservador de confiabilidade. Em sistemas com controle adaptativo de tração, a operação em modo degradado pode elevar a confiabilidade efetiva do sistema. O impacto dessa arquitetura na confiabilidade do sistema, exigindo que todos os 4 motores funcionem em harmonia para garantir a estabilidade e o controle do torque vetorizado, é detalhado na Tabela 14.

Tabela 14 - Desempenho de confiabilidade para arquitetura com 4 motores em série

Parâmetro Estatístico	SynRM	PMSM	PMSynRM	BLDC
Confiabilidade no Tempo $R(35.000h)$	0,5770	0,4200	0,3600	0,2400
MTTF Estimado do Arranjo	39.015,27 h	32.671,29 h	30.256,43 h	25.504,70 h
Vida B_{10}	15.222,98 h	11.889,33 h	10.785,77 h	8.593,64 h
Vida Métrica B_{50}	38.684,33 h	31.598,00 h	29.045,08 h	24.065,26 h

Fonte: Autoria própria (2026), utilizando o software ReliaSoft BlockSim.

Sob dependência em série de quatro máquinas operando simultaneamente, os parâmetros degradam severamente. A confiabilidade em 35.000 h diminui para 36,00% na topologia PMSynRM e 42,00% no motor PMSM. A vida B_{10} do PMSynRM reduz para 10.785 horas — indicando que reparos por quebra mecânica ou térmica afetarão o primeiro motor com pouco mais de 10.000 horas de uso contínuo.

5.5 Discussão Comparativa Prática entre PMSM e PMSynRM

Ao isolar a análise comparativa entre as duas topologias centrais deste estudo — o Motor Síncrono de Ímãs Permanentes (PMSM) e o Motor Síncrono de Relutância Assistido por Ímãs (PMSynRM) —, emergem considerações fundamentais para a seleção tecnológica em projetos de tração elétrica veicular.

1. Estabilidade Térmica e Padrão de Desgaste: O motor PMSM apresenta vantagens nos parâmetros puros de confiabilidade em todos os cenários de análise computacional. Seu parâmetro de forma $\beta = 2,40$, superior ao do PMSynRM ($\beta = 2,30$), comprova estatisticamente uma distribuição

temporal menos dispersa e comportamento de envelhecimento mais concentrado próximo ao final de sua vida útil projetada.

Físico-mecanicamente, essa superioridade é atribuída à arquitetura do rotor IPM (*Interior Permanent Magnet*). Por possuir uma estrutura mais massiva para abrigar os ímãs internos, o rotor do PMSM oferece maior suporte estrutural e proteção térmica. Em contrapartida, o rotor do PMSynRM exige geometrias de barreiras de fluxo muito finas e complexas para maximizar o torque de relutância, o que cria concentradores de tensões mecânicas sob altas rotações e torna o motor mais suscetível a falhas por fadiga de forma prematura.

2. O Compromisso entre Desempenho e Confiabilidade: A escolha do PMSynRM resulta em um sacrifício de aproximadamente 15% em sua escala de vida característica final ($\eta_{final} = 68.000 h$) quando comparada à do PMSM ($\eta_{final} = 72.000 h$). Este decréscimo decorre da complexidade geométrica de seu rotor: a presença de finas pontes metálicas de ferro, necessárias para conformar as barreiras de fluxo magnético, gera concentrações de estresse mecânico localizado. Adicionalmente, a inserção de filetes de ímãs em geometrias confinadas expõe esses materiais a maiores gradientes de temperatura e fluxos de desmagnetização espaciais durante regimes severos de aceleração urbana. Assim, embora o PMSynRM alcance desempenho dinâmico competitivo, os dados de análise computacional confirmam que ele impõe um fardo maior à confiabilidade intrínseca da máquina.
3. Viabilidade Econômica e Industrial: Apesar da superioridade estatística do PMSM em termos de MTTF e vida B_{10} o PMSynRM destaca-se como uma alternativa industrial estratégica. Ao utilizar o princípio do torque de relutância para suprir a maior parcela da potência total, o PMSynRM reduz drasticamente o volume e a massa total necessária de ímãs de terras raras (como o Neodímio e o Disprósio). Essa característica mitiga riscos relacionados ao custo de fabricação e reduz a vulnerabilidade das montadoras perante a volatilidade da cadeia de suprimentos global.

Em conclusão, para aplicações em veículos elétricos das categorias M1 e N1, onde o custo inicial de aquisição e a pegada ecológica de fabricação são fatores decisivos, o motor PMSynRM consolida-se como uma excelente escolha técnica. Contudo que o projeto do *powertrain* adote arquiteturas tolerantes a falhas — como os arranjos multi-motor com redundância parcial (lógica 2-de-3) discutidos na Seção 5.4.2 —, a ligeira perda de robustez intrínseca do motor é compensada pela disponibilidade lógica do sistema. Essa estratégia de engenharia permite usufruir da economia de materiais críticos sem comprometer a segurança e a confiabilidade exigidas pelo usuário final.

5.6 Síntese dos Resultados e Discussão Final do Capítulo

A análise sistemática dos dados obtidos através das análises de confiabilidade probabilísticas no *software* ReliaSoft BlockSim permite traçar um panorama conclusivo a respeito do comportamento de degradação temporal das topologias síncronas avaliadas. Este estudo estabelece critérios técnicos fundamentais para a seleção e otimização de *powertrains* destinados a veículos elétricos de passeio e utilitários leves (categorias M1 e N1). Para subsidiar a discussão final, a Tabela 14 consolida os indicadores fundamentais de desempenho estatístico extraídos ao longo de todas as configurações de arquitetura lógica e física simuladas.

A interpretação cruzada dos dados da Tabela 15 revela fenômenos probabilísticos que contradizem intuições superficiais de projeto, evidenciando o comportamento não linear da confiabilidade de sistemas. A discussão final estrutura-se sobre três pilares analíticos interdependentes: o impacto da infraestrutura de suporte, o dilema geométrico-estrutural entre as topologias PMSM e PMSynRM, e o papel das estratégias de redundância lógica.

Tabela 15 - Matriz consolidada de indicadores estatísticos das análises de modelagem computacionais de confiabilidade.

Configuração do Sistema	Indicador Estatístico	SynRM	PMSM	PMSynRM	BLDC
Subsistema Driver Isolado	Confiabilidade $R(35.000h)$	0,8215	0,7597	0,7299	0,6569
	MTTF do Subsistema (h)	63.731,38	57.530,73	54.544,43	48.544,83
	Vida B_{10}	24.575,34	20.387,81	18.894,42	15.849,60
Powertrain Integral (Série)	Confiabilidade $R(35.000h)$	0,2960	0,2737	0,2630	0,2367
	MTTF do Sistema (h)	26.708,14	25.464,06	24.868,11	23.508,18
	Vida B_{10}	3.292,75	3.278,03	3.267,81	3.229,21
Arranjo Multi-Motor: 1 Motor	Confiabilidade $R(35.000h)$	0,7767	0,7182	0,6900	0,6200
	MTTF do Arranjo (h)	59.944,38	54.335,22	51.639,58	46.810,68
	Vida B_{10}	19.554,34	16.919,99	15.907,86	13.711,30
Arranjo Multi-Motor: 2 Motores	Confiabilidade $R(35.000h)$	0,7036	0,6000	0,5550	0,4499
	MTTF do Arranjo (h)	48.543,34	42.328,56	39.717,05	34.495,69
	Vida B_{10} (h)	17.502,27	14.400,17	13.297,63	11.016,22
Arranjo multi-motor: 3 Motores	Confiabilidade $R(35.000h)$	0,8360	0,7970	0,7721	0,6979
	MTTF do Arranjo (h)	60.122,63	54.157,47	51.336,32	45.605,49
	Vida B_{10} (h)	23.306,41	21.898,22	21.123,23	19.102,06
Arranjo Multi-Motor: 4 Motores	Confiabilidade $R(35.000h)$	0,5770	0,4200	0,3600	0,2400
	MTTF do Arranjo (h)	39.015,27	32.671,29	30.256,43	25.504,70
	Vida B_{10} (h)	15.222,98	11.889,33	10.785,77	8.593,64

Fonte: Autoria própria (2026), utilizando o software ReliaSoft BlockSim.

A síntese dos indicadores apresentada na Tabela 15 consolida o desempenho final de cada configuração simulada. Os dados demonstram que a superioridade intrínseca de confiabilidade do PMSM sobre o PMSynRM se mantém constante em todas as arquiteturas de *powertrain* analisadas, refutando a hipótese de ganho operacional com a substituição direta pela tecnologia de relutância assistida. A partir

deste panorama quantitativo, torna-se possível avançar para as discussões finais acerca da viabilidade operacional e estratégica de cada tecnologia frente aos requisitos do projeto.

5.6.1 O Efeito Dominante da Infraestrutura de Suporte

O primeiro dado crítico emerge ao contrastar a análise computacional isolada do subsistema *Driver* com a análise computacional do *powertrain* integral. Enquanto o motor PMSynRM isolado apresenta uma probabilidade de sobrevivência satisfatória de 72,99% em 35.000 horas, sua incorporação ao veículo completo reduz esse índice para 26,30%, acompanhado de um encolhimento dramático no tempo de vida livre de falhas preliminares (B_{10} cai de 18.894 horas para meras 3.267 horas).

Matematicamente, esse colapso é governado pelo produto das funções de sobrevivência em sistemas não redundantes: a bateria (composta por múltiplos arranjos de células e gerenciada por um circuito BMS) e o inversor de potência operam sob taxas de falhas eletrônicas, passando a ditar o risco nos anos iniciais. Sob a perspectiva de engenharia de ciclo de vida, este resultado demonstra que qualquer incremento isolado na robustez mecânica do rotor do motor terá efeito prático negligenciável sobre o tempo até a primeira falha do veículo se não houver investimento em sistemas de refrigeração redundantes para as baterias e sobredimensionamento térmico dos semicondutores.

5.6.2 O Dilema Geométrico-Estrutural: PMSM versus PMSynRM

Ao centralizar o foco no objetivo central deste trabalho — a comparação entre PMSM e PMSynRM —, a matriz de resultados demonstra a superioridade estatística do motor síncrono com ímãs internos tradicionais (PMSM) em termos de sobrevivência pura. No cenário monomotor, o PMSM mantém uma confiabilidade pontual de 71,82% frente a 69,00% do PMSynRM, garantindo um ganho adicional de 1.012 horas em sua métrica de vida segura B_{10} .

Essa diferença decorre das premissas físicas discutidas nas parametrizações: o motor PMSynRM, embora reduza a dependência de terras raras ao aproveitar o torque de relutância, introduz barreiras de fluxo geométricas complexas no rotor. A inserção de menores massas de ímãs em geometrias confinadas eleva o gradiente

térmico local, acelerando o modo de falha por desmagnetização e reduzindo o parâmetro de forma efetivo ($\beta_{PMSynRM} = 2,30$ contra $\beta_{PMSM} = 2,40$).

5.6.3 Redundância como Mecanismo de Viabilização Tecnológica

A análise das arquiteturas multi-motor revela o caminho de engenharia para contornar as limitações intrínsecas de confiabilidade. Os resultados mostram que o simples aumento do número de motores sob uma topologia em série estrita (arranjos 2/2 e 4/4) é altamente prejudicial à disponibilidade. No entanto, ao alterar a lógica para uma configuração tolerante a falhas do tipo 2-de-3, ocorre uma inversão de comportamento.

A confiabilidade do PMSynRM apresenta 77,21% e o seu tempo de vida B_{10} atinge 21.123 horas — superando o modelo monomotor convencional com PMSM (16.919 horas). Este arranjo amortece o impacto de uma falha isolada: se um dos motores sofrer desmagnetização ou quebra de rolamento, os algoritmos de controle isolam a unidade avariada e redistribuem o torque.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização desta pesquisa permitiu desenvolver uma análise comparativa entre motores PMSM e PMSynRM aplicados a *powertrains* de veículos elétricos das categorias M1 e N1, considerando aspectos de desempenho eletromecânico obtidos na literatura e indicadores de confiabilidade estimados por modelagem computacional.

Ao confrontar a tecnologia consolidada de Motores Síncronos de Ímãs Permanentes (PMSM) com a solução emergente de Motores Síncronos de Relutância Assistidos por Ímãs (PMSynRM), o estudo cumpriu rigorosamente o seu objetivo geral, avaliando as curvas de desempenho eletromecânico e quantificando as taxas de sobrevivência por meio de análise computacional estocástica fundamentada no modelo de Tang et al. (2021).

Em primeiro lugar, a análise comparativa de desempenho demonstrou que o motor PMSynRM representa uma evolução robusta frente às limitações das máquinas de relutância pura (SynRM). A introdução estratégica de pequenas massas de ímãs de baixo custo inseridas em suas barreiras de fluxo demonstrou ser capaz de garantir uma entrega de potência estável na região de enfraquecimento de campo, aproximando-se significativamente da performance dos motores PMSM de alta energia. Esse resultado confirma a primeira hipótese deste estudo, validando a viabilidade operacional do PMSynRM para suprir os regimes transitórios exigidos pelas categorias M1 e N1 com menor dependência de terras raras.

No que tange à engenharia de confiabilidade, contudo, os resultados das análises de modelagem computacionais isoladas do subsistema *Driver* revelaram que a segunda hipótese desta pesquisa — de que a substituição de PMSM por PMSynRM proporcionaria melhoria na confiabilidade — foi refutada. O motor PMSM (tipo IPM) demonstrou superioridade em todos os parâmetros de sobrevivência intrínseca, registrando um MTTF de 57.530 horas e vida B_{10} de 20.387 horas, contra 54.544 horas e 18.894 horas do PMSynRM. Físico-mecanicamente, essa desvantagem do PMSynRM justifica-se pela complexidade geométrica de seu rotor: as finas pontes metálicas necessárias para maximizar o torque de relutância atuam como concentradores de tensões, elevando a ocorrência de modos de falha por fadiga mecânica e térmica.

A análise integrada do *powertrain* demonstrou que, em arquiteturas série convencionais, a infraestrutura de suporte (liderada pelo BMS e bateria) domina a taxa

de risco global, reduzindo a diferença prática entre as topologias nos anos iniciais de operação. Entretanto, a investigação de arquiteturas multi-motor revelou que a fragilidade intrínseca do PMSynRM pode ser integralmente mitigada pelo projeto sistêmico. A transição para uma configuração tolerante a falhas do tipo 2-de-3 motores elevou a confiabilidade do sistema com PMSynRM para 77,21% em 35.000 horas, valor superior ao do arranjo monomotor com PMSM (71,82%).

Quanto à análise computacional da confiabilidade operacional, os resultados indicam que o PMSM apresenta MTTF e índices de confiabilidade superiores ao PMSynRM em todos os cenários analisados, refutando a segunda hipótese de pesquisa. A hipótese de viabilidade operacional comparável (H1) foi confirmada para os indicadores de desempenho eletromecânico analisados no Capítulo 2.

Do ponto de vista estratégico, a literatura técnica consultada (Tang et al., 2021; Patil et al., 2023) indica que o PMSynRM apresenta vantagens relevantes em custo de fabricação e menor dependência de terras raras — aspectos não investigados quantitativamente neste trabalho, que configuram oportunidade para pesquisa futura.

Ao concluir este trabalho, observa-se o cumprimento integral dos objetivos específicos estabelecidos na fase inicial da pesquisa. O primeiro estágio da investigação permitiu caracterizar, com base na literatura técnica e científica, as topologias de motores PMSM e PMSynRM aplicadas à tração elétrica veicular (objetivo a), fornecendo o embasamento necessário para as etapas subsequentes. A partir dessa fundamentação, foi possível comparar os aspectos de desempenho eletromecânico das topologias PMSM e PMSynRM (objetivo b), evidenciando que, embora as tecnologias apresentem paridade em termos de eficiência, parâmetros como o comportamento na região de enfraquecimento de campo e a ondulação de torque impõem desafios de controle mais complexos para as máquinas de relutância assistida.

A análise avançou ao identificar os principais modos de falha associados aos motores PMSM e PMSynRM (objetivo c), conferindo ênfase especial à degradação de rolamentos, à perda de integridade do isolamento elétrico e aos riscos de desmagnetização, além dos efeitos críticos da geometria do rotor sobre a vida útil do sistema. Esse diagnóstico técnico foi o insumo essencial para a etapa quantitativa do estudo, que logrou êxito ao modelar e comparar, por meio de Diagramas de Blocos de Confiabilidade e Análise por Árvore de Falhas, o impacto da adoção de motores PMSynRM em relação aos motores PMSM na confiabilidade do powertrain (objetivo

d). Os resultados das simulações demonstraram que, contrariando a hipótese inicial de melhoria operacional, o motor PMSM manteve índices de confiabilidade e MTTF superiores em todos os cenários e arquiteturas analisados.

Finalmente, o trabalho cumpriu o propósito de discutir as implicações técnicas da redução do uso de ímãs permanentes em motores PMSynRM (objetivo e), abordando de forma crítica a menor dependência de materiais de terras raras e os impactos dessa escolha no desempenho eletromecânico e na confiabilidade operacional. Conclui-se, portanto, que a transição para a tecnologia PMSynRM representa uma solução estratégica de viabilidade operacional comprovada, mas que exige o gerenciamento de um compromisso tecnológico em que a redução do custo de fabricação é acompanhada por um horizonte de operação confiável ligeiramente inferior ao da tecnologia PMSM.

Para o prosseguimento desta linha de pesquisa, sugerem-se trabalhos futuros voltados à análise do Custo do Ciclo de Vida (LCC), integrando os índices de confiabilidade aqui obtidos com os custos de manutenção e a economia gerada pela redução de terras raras, a fim de determinar o ponto de equilíbrio financeiro entre as tecnologias. Recomenda-se, ainda, o desenvolvimento de modelos de confiabilidade dinâmica baseados em Cadeias de Markov para avaliar o impacto de diferentes perfis de condução (*drive cycles*) na taxa de falha dos componentes. Adicionalmente, propõe-se a realização de ensaios de vida acelerada em protótipos de PMSynRM para validar experimentalmente os parâmetros de Weibull adotados, bem como a investigação do impacto de novas técnicas de controle sensorless na redução da taxa de falha eletrônica do sistema de tração.

REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, P. F. et al. Assessment of the Reliability of Motors in Utility Applications — Updated. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 1, n. 1, p. 39-46, mar. 1986.
- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 6. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2017.
- ANDRADA, P. et al. Segmented stator switched reluctance motor drive for LEVs. **A-TECH: Journal of Applied Technology and Engineering**, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2023.
- ANGAYARKANNI, A.; KUMAR, S.; SENTHILNATHAN, A. Comprehensive overview of modern controllers for synchronous reluctance motor. **Journal of Electrical and Computer Engineering**, 2023.
- BINDER, A.; SCHUMACHER, M. Reduction of noise and vibration in switched reluctance motors - new aspects. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES (ICEM), 2020, Gothenburg. **Anais... IEEE**, 2020.
- BLAABJERG, F.; CHEN, Z. **Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications**. Wiley-IEEE Press, 2018.
- BLOOMBERGNEF (BNEF). **Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh**. BloombergNEF, 26 nov. 2023. Disponível em: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/>. Acesso em: 24 maio 2024.
- BOLDEA, I.; NASAR, S. A. **The Induction Machine Handbook**. 2. ed. CRC Press, 2010.
- BOLDEA, I.; TUTELEA, L. N. Reluctance Synchronous and Permanent Magnet-Assisted Reluctance Motor Drives. In: **Electric Drives**. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- CHAU, K. T.; CHAN, C. C. Electric vehicle motor drives. In: **Modern Electric Vehicle Technology**. Oxford: Oxford University Press, 2007.
- CHAU, K. T.; CHAN, C. C.; LIU, C. Overview of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 55, n. 6, p. 2246–2257, 2008.
- CHEN, Y. et al. Design and Performance Analysis of a Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2019.
- EHSANI, M. et al. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- EL-REFAIE, A. M. Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, n. 1, p. 107–121, 2010.

EWERT, P. et al. Demagnetization Fault Diagnosis of PMSM Based on Machine Learning. **MDPI Sensors**, v. 23, n. 4, 1757, 2023.

FAID, S. Development of a switched reluctance motor for automotive traction applications. In: EVS25 - 25th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, 2010, Shenzhen. **Anais... EVS**, 2010.

FAVOT, M.; MASSARUTTO, A. Rare-earth elements in the circular economy: The case of yttrium. **Journal of Environmental Management**, v. 240, p. 504-510, jun. 2019.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

HOFMANN, H.; LIU, C. **Electric Propulsion Systems for EVs and HEVs**. New York: Wiley, 2018.

HUANG, W. et al. Demagnetization Analysis of Permanent Magnet Synchronous Machines Under Fault Conditions. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 51, n. 11, 2015.

HUSAIN, Iqbal. **Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.

IEEE STD 493-2007. **IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems (Gold Book)**. New York: IEEE, 2007.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>. Acesso em: 24 maio 2024.

KANT, Immanuel. **Sobre a pedagogia**. Tradução de Francisco Cock Fontanella. 3. ed. Piracicaba: Editora Unimep, 1999.

KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S. **Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering**. Keele, UK: Keele University, 2007. (Technical Report, EBSE-2007-01).

KRISHNAN, Ramu. **Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives**. 1. ed. CRC Press, 2017.

LARQVIST, J.; ÖSTERGREN, M. **Design and Performance Comparison of PMSM and PMSynRM for EV Applications**. 2017. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Lund University, Suécia, 2017.

LAVRINOVICHA, L.; DIRBA, I. Torque density comparison of different electric motor topologies. **Electrical Engineering**, 2014.

LEE, J.; LIM, H.; NAM, K. Reliability-focused design of electric vehicle motor. **Journal of Power Electronics**, 2019.

- LEITE, H.; VOLOCHTCHUK, A. V. L. **Revisão Sistemática de Literatura: Metodologia Aplicada ao TCC**. [Slides de apresentação]. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, [s.d.].
- LIAO, F. et al. Electric vehicle adoption: a review. **International Journal of Sustainable Transportation**, 2020.
- MA, Z. et al. Reliability Evaluation of Electric Vehicle Powertrain Systems Considering Mission Profiles. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 70, n. 3, p. 1187–1199, 2021.
- MACHINE DESIGN. **Calculating Machine Reliability from Bearing Life**. Disponível em: <https://www.machinedesign.com>. Acesso em: jan. 2026.
- MDPI ENERGIES. A Review of BLDC Motors: Types, Application, Failure Modes and Detection. **MDPI Energies**, v. 18, n. 24, 6402, 2025.
- MILLER, T. J. E. **Design of Brushless Permanent-Magnet Machines**. 2. ed. Oxford: Magna Physics Pub, 2010.
- MOTOR RELIABILITY WORKING GROUP. Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 21, n. 4, 1985.
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Air pollution**. Genebra: OMS, 2024. Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>. Acesso em: 24 maio 2024.
- PATIL, S.; SAXENA, S.; PAHARIYA, Y. Performance evaluation of synchronous reluctance motor drives. **Journal of Control and Instrumentation**, 2023.
- PORTESCAP. **Reliability and Life of DC Motors and the Ree System**. Technical Whitepaper, 2021.
- RAHMAN, M. A. et al. Advanced control of PM motors for electric vehicles. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2016.
- SHU, X. et al. Reliability evaluation of lithium-ion battery management systems. **Reliability Engineering & System Safety**, 2020.
- SILVA, Angélica L. N. G. da. **Contribuições ao acionamento e controle dos motores de relutância variável e síncrono de relutância**. 2018. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.
- SPRINGER JPE. Identification of failure modes in interior permanent magnet synchronous motor under accelerated life test. **Journal of Power Electronics**, 2024.
- TANG, X. et al. Reliability analysis of electric vehicle powertrain based on fault tree and reliability block diagram. **IEEE Access**, v. 9, p. 30141-30154, 2021.

THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). **Publications**. Washington, D.C.: ICCT, 2024. Disponível em: <https://theicct.org/publications/>. Acesso em: 24 maio 2024.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 3, p. 207-222, set. 2003.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Mineral Commodity Summaries 2022**. Reston, VA, 2022.

VAS, Peter. **Sensorless Control of AC Motor Drives**. Oxford: University Press, 2013.

WANG, W. et al. Reliability analysis of traction motors for high-speed trains. **IEEE Transactions on Reliability**, 2016.

ZGC MOTORS. **Complete Guide to Brushless DC Motors**. Technical Guide, 2025.

ZHANG, L. et al. High-performance PMSynRM design for mass production. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2020.

ZHU, L. et al. Reliability modeling of multi-motor drive systems. **IEEE Access**, 2021.

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

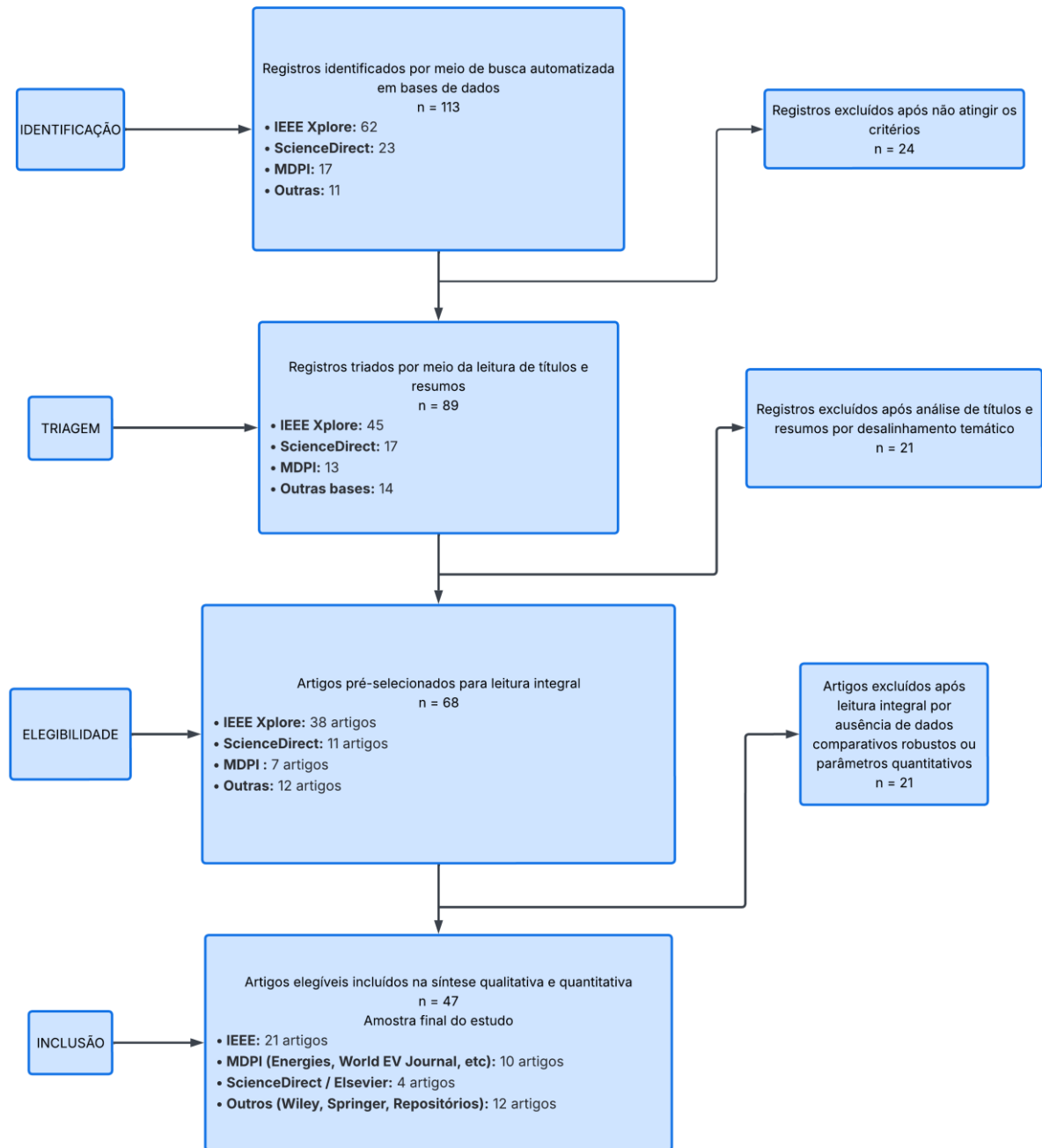
APÊNDICE A - Protocolo de pesquisa e Fluxograma PRISMA

Quadro 11 – Protocolo de Pesquisa

Título: REVISÃO COMPARATIVA DE DESEMPENHO E SIMULAÇÃO DE CONFIABILIDADE DE MOTORES PMSM E PMSynRM PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS DE PASSEIO (M1/N1)	
Objetivos	Comparar o desempenho eletromecânico e avaliar a confiabilidade operacional das topologias PMSM e PMSynRM. O foco reside na identificação de modos de falha e na execução de simulação probabilística via Diagramas de Blocos de Confiabilidade (RBD) para estimar métricas de vida útil (MTTF, B10) no powertrain de veículos M1/N1.
Palavras-chave principais	Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM); Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor (PMSynRM); Reliability Engineering; Probabilistic Simulation; Electric Vehicle Powertrain.
Palavras-chave associadas	Failure Modes; Reliability Block Diagram (RBD); Fault Tree Analysis (FTA); Mean Time To Failure (MTTF); Torque ripple; Field-weakening; ReliaSoft BlockSim; Redundancy Analysis.
Bases de dados	IEEE Xplore Digital Library; ScienceDirect (Elsevier); SpringerLink; SciELO; Google Acadêmico; Web of Science; MDPI; Repositórios Institucionais (UTFPR, UFSC, USP, UFMG).
Período	De 2014 a 2026.
Fatores de Exclusão	Artigos que não apresentam dados comparativos entre PMSM e máquinas de relutância; estudos focados apenas em eletrônica de potência isolada; motores para fins industriais não veiculares; estudos que não abordam parâmetros de degradação ou modos de falha.
Fatores de Inclusão	Artigos com comparativos de torque e velocidade entre PMSM e PMSynRM; estudos que mapeiam falhas de rolamentos, isolamento e rotor; trabalhos que fornecem parâmetros estatísticos (β e η) para motores elétricos; pesquisas sobre arquiteturas de tração distribuída e redundância lógica em veículos elétricos.

Fonte: Autoria própria (2026), consolidado por meio de Revisão Sistemática da Literatura (RSL)

Figura 21 – Fluxograma Prisma



Fonte: Autoria própria (2026), baseado na metodologia PRISMA.

APÊNDICE B - Artigos selecionados pela RSL

Quadro 12 – Relação final de artigos incluídos na Revisão Sistemática da Literatura (RSL).

Ano	Periódico	Autores	Título	DOI
2020	Microelectronics Reliability (Elsevier / ScienceDirect)	Qingqing Yang, Rui Wang, Mingyao Ma, Shuying Yang, Xing Zhang	A fault tolerant switched reluctance motor drive for electric vehicles under multi-switches open-fault conditions	10.1016/j.microrel.2020.113761
2016	Renewable and Sustainable Energy Reviews (Elsevier / ScienceDirect)	Jordi-Roger Riba, Carlos López-Torres, Luís Romeral, Antoni Garcia	Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology review	10.1016/j.rser.2015.12.121
2021	Materials Today: Proceedings (Elsevier / ScienceDirect)	Vaidehi, S. Dhar, Arunkumar Jayakumar, R. Lavanya, M. Dinesh Kumar	Techno-economic assessment of various motors for three-wheeler E-auto rickshaw: From Indian context	10.1016/j.matpr.2020.11.711
2019	Journal of Environmental Management (Elsevier / ScienceDirect)	Marinella Favot, Antonio Massarutto	Rare-earth elements in the circular economy: The case of yttrium	10.1016/j.jenvman.2019.04.002
2016	COMPEL (Emerald Insight)	Shun Cai, Meng-Jia Jin, He Hao, Jian-Xin Shen	Comparative study on synchronous reluctance and PM machines	10.1109/iceems59686.2023.10345247
2023	IJPEDS	S. Thangavel, D. Mohanraj, T. Girijaprasanna, et al.	A Comprehensive Review on Electric Vehicle: Battery Management System, Charging Station, Traction Motors	10.1109/access.2023.3250221
2020	IEEE Access	Xiong Shu, Yingfu Guo, Wenxian Yang, et al.	A Detailed Reliability Study of the Motor System in Pure Electric Vans by the Approach of Fault Tree Analysis	10.1109/access.2019.2963197
2018	IEEE Transactions on Industry Applications	Bo Wang, Jiabin Wang, Bhaskar Sen, Antonio Griffo, Zhigang Sun, Ellis Chong	A Fault-Tolerant Machine Drive Based on Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Machine	10.1109/eccie.2016.7854677
2015	IEEE Xplore	Alessandro Castagnini, Tero Käsäkangas, Jere Kolehmainen, Pietro Savio Termini	Analysis of the starting transient of a synchronous reluctance motor for direct-on-line applications	10.1109/ieemdc.2015.7409047

2023	Applied Sciences (MDPI)	Jing Liang, Yan Dong, Jie Jing	Control Strategy of Synchronous Reluctance Motor Using Empirical Information Brain Emotional Learning Based Intelligent Controller Considering Magnetic Saturation	10.3390/app13095327
2018	IEEE Xplore	R. M. Pindoriya, B. S. Rajpurohit, R. Kumar, K. N. Srivastava	Comparative Analysis of Permanent Magnet Motors and Switched Reluctance Motors Capabilities for Electric and Hybrid Electric Vehicles	10.1109/etechnxt.2018.8385282
2015	IEEE Transactions on Transportation Electrification	Zhi Yang, Fei Shang, Ian P. Brown, Mahesh Krishnamurthy	Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications	10.1109/tte.2015.2470092
2017	IEEE Transactions on Magnetics	Thanh Anh Huynh, Min-Fu Hsieh	Comparative Study of PM-Assisted SynRM and IPMSM on Constant Power Speed Range for EV Applications	10.1109/intmag.2017.8008078
2022	Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science	Khalid S. Mohammad, Aqeel S. Jaber	Comparison of electric motors used in electric vehicle propulsion system	10.11591/ijeecs.v27.i1.p11-19
2022	IEEE Transactions on Energy Conversion	Shun Cai, James L. Kirtley Jr., Christopher H. T. Lee	Critical Review of Direct-Drive Electrical Machine Systems for Electric and Hybrid Electric Vehicles	10.1109/tec.2022.3197351
2024	IEEE Xplore	Anurag Sharma, Durgesh Kumar Banchhor, Amit Kumar Jain	Design, Analysis and Comparison of 5kW Synchronous Reluctance Motor and Interior PM Synchronous Motor for EV Application	10.1109/pedes61459.2024.10961697
2023	IEEE Transactions on Transportation Electrification	Reza Nasiri-Zarandi, Ahmadreza Karami-Shahnani, Mohammad Sedigh Toulabi, Alberto Tassarolo	Design and Experimental Performance Assessment of an Outer Rotor PM-Assisted SynRM for the Electric Bike Propulsion	10.1109/tte.2022.3202819
2015	IEEE Transactions on Industry Applications	Marco Ferrari, Nicola Bianchi, Alberto Doria, Emanuele Fornasiero	Design of Synchronous Reluctance Motor for Hybrid Electric Vehicles	10.1109/ieemdc.2013.6556227
2015	IEEE Transactions on Energy Conversion	Akira Chiba, Kyohei Kiyota, Nobukazu Hoshi, Masatsugu	Development of a Rare-Earth-Free SR Motor With High Torque Density for Hybrid Vehicles	10.1109/tec.2014.2343962

		Takemoto, Satoshi Ogasawara		
2023	IEEE (Conferência IC3I 2023)	P. Bhavani Sree	Efficiency Improvement of Electrical Vehicles using Novel Switched Reluctance Motor and compared with Permanent Magnet Motor by Reducing Power Loss	10.1109/ic3i.59117.2023.10398050
2021	Proceedings of the IEEE	Iqbal Husain, Burak Ozpineci, et al.	Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles	10.1109/jproc.2020.3046112
2014 /2015	IEEE Xplore	Nicola Bianchi, Emanuele Fornasiero, Enrico Carraro, et al.	Electric Vehicle Traction based on a PM Assisted Synchronous Reluctance Motor	10.1109/ievc.2014.7056146
2021	Energies (MDPI)	Yuanfeng Lan, Yassine Benomar, Kritika Deepak, et al.	Switched Reluctance Motors and Drive Systems for Electric Vehicle Powertrains: State of the Art Analysis and Future Trends	10.3390/en14082079
2023	Energies (MDPI)	Olaoluwa Demola Aladetola, Mondher Ouari, et al.	Advanced Torque Ripple Minimization of Synchronous Reluctance Machine for Electric Vehicle Application	10.3390/en16062701
2024	Energies (MDPI)	Mihály Katona, Tamás Orosz	Circular Economy Aspects of Permanent Magnet Synchronous Reluctance Machine Design for Electric Vehicle Applications: A Review	10.3390/en17061408
2023	Engineering Proceedings (MDPI)	Muhammad Usman Sardar, Muhammad Yaqoob, et al.	Permanent Magnet Synchronous Machine Control Performance and Analysis for Environment-Friendly Electric Vehicle Applications	10.3390/engproc2023046007
2017	IEEE Transactions on Industry Applications	Jie Shao, Zhiquan Deng, Yu Gu	Fault-Tolerant Control of Position Signals for Switched Reluctance Motor Drives	10.1109/tia.2017.2669190
2019	IEEE (Digest)	Shamini Dharmasena, AKM Arafat, Seungdeog Choi, et al.	Fault-Tolerant Model Predictive Control of Five-Phase PMa-SynRM under Single Phase Open-Circuit fault Condition	10.1109/itec.2018.8450109
2024	IEEE Transactions on Power Electronics	Nasir Ali, Mehdi Narimani	Fault-Tolerant SRM Drives—A Review	10.1109/tpel.2024.3392713
2023	IET Electrical Systems in	Vincent M. Macharia, Vijay K.	A review of electric vehicle technology: Architectures, battery	10.1049/els2.12083

	Transportation (Wiley)	Garg, Dinesh Kumar	technology and its management system, relevant standards	
2022	International Journal of Energy Research (Wiley)	Endika Robles, Asier Matallana, Iker Aretxabaleta, et al.	The role of power device technology in the electric vehicle powertrain	10.1002/er.8581
2023	Journal of Electrical and Computer Engineering (Hindawi)	S. AngayarKanni, K. Ramash Kumar, A. Senthilnathan	Comprehensive Overview of Modern Controllers for Synchronous Reluctance Motor	10.1155/2023/1345792
2023	Machines (MDPI)	Mohammad Zamani Khaneghah, Mohamad Alzayed, Hicham Chaoui	Fault Detection and Diagnosis of the Electric Motor Drive and Battery System of Electric Vehicles	10.3390/machines11070713
2024	Materials (MDPI)	Benjamin Podmiljšak, Boris Saje, Petra Jenuš, et al.	The Future of Permanent-Magnet-Based Electric Motors: How Will Rare Earths Affect Electrification?	10.3390/materials17040848
2023	IEEE Access	Ashish Kumar Sahu, Ali Emadi, Berker Bilgin	Noise and Vibration in Switched Reluctance Motors: A Review on Structural Materials, Vibration Dampers, Acoustic Impedance, and Noise Masking Methods	10.1109/access.2023.3257124
2018	CES Transactions on Electrical Machines and Systems	Wenxiang Zhao, Liang Xu, Guohai Liu	Overview of Permanent-Magnet Fault-Tolerant Machines: Topology and Design	10.23919/tems.2018.8326451
2022	IEEE (Conferência INCET 2022)	Lone Faisal, V. Siva Brahmaiah Rama, Jung-Min Yang, et al.	Performance and Simulation Analysis of IPMSyncRM (Internal Permanent Magnet Synchronous Reluctance Motor) for Advanced Electric Vehicle Design	10.1109/incet54531.2022.9824716
2025	Preprints.org	Aristotelis Tzouvaras, Georgios Falekas, Athanasios Karlis	System-Level Optimization in Switched Reluctance Machine Design—Current Trends, Methodologies, and Future Directions	10.20944/preprints202505.0473.v1
2021	Processes (MDPI)	Qian Tang, Xiong Shu, Guanghui Zhu, Jiande Wang, Huan Yang	Reliability Study of BEV Powertrain System and Its Components—A Case Study	10.3390/pr9050762

2017	CES Transactions on Electrical Machines and Systems	Z. Q. Zhu, W. Q. Chu, Y. Guan	Quantitative Comparison of Electromagnetic Performance of Electrical Machines for HEVs/EVs	10.23919/tems.2017.7911107
2020	IEEE Access	Shuanghong Wang, Zihui Hu, Xiupeng Cui	Research on Novel Direct Instantaneous Torque Control Strategy for Switched Reluctance Motor	10.1109/access.2020.2986393
2021	Automotive Innovation (Springer)	William Cai, Xiaogang Wu, Minghao Zhou, et al.	Review and Development of Electric Motor Systems and Electric Powertrains for New Energy Vehicles	10.1007/s42154-021-00139-z
2024	MRS Bulletin (Springer)	Christopher L. Rom, Rebecca W. Smaha, et al.	Emerging magnetic materials for electric vehicle drive motors	10.1557/s43577-024-00743-4
2021	Sustainability (MDPI)	Hamidreza Heidari, Anton Rassölkin, et al.	A Review of Synchronous Reluctance Motor-Drive Advancements	10.3390/su13020729
2022	Proceedings of the IEEE	M. Murataliyev, M. Degano, M. Di Nardo, N. Bianchi, C. Gerada	Synchronous Reluctance Machines: A Comprehensive Review and Technology Comparison	10.1109/jproc.2022.3145662
2022	World Electric Vehicle Journal (MDPI)	Kohei Aiso, Kan Akatsu	Performance Comparison of High-Speed Motors for Electric Vehicle	10.3390/wevj13040057
2023	The Journal of Engineering (IET/Wiley)	Lianbo Niu, Mingzhu Zhang	The optimal design and research of interior permanent magnet synchronous motors for electric vehicle applications	10.1049/tje2.12258

Fonte: Autoria própria (2026), consolidado por meio de Revisão Sistemática da Literatura (RSL)

APÊNDICE C - Fundamentos Teóricos da Análise de Riscos Concorrentes

Este apêndice apresenta a fundamentação matemática da análise de riscos concorrentes. O conteúdo foi deslocado do Capítulo 4 para preservar o fio metodológico. Sugestão de referência cruzada: "A formalização matemática detalhada está no Apêndice C."

A lógica central da análise de confiabilidade aplicada neste trabalho fundamenta-se na Teoria de Riscos Concorrentes. Este modelo é essencial para compreender como diferentes mecanismos físicos interagem para determinar a vida útil global dos motores PMSM e PMSynRM. Diferente da modelagem simples, esta abordagem considera a "corrida" entre os diversos modos de falha, a sobrevivência conjunta do sistema e a atribuição da causa primária da avaria.

C.1 A Dinâmica da "Corrida" entre Modos de Falha

A ideia física fundamental dos riscos concorrentes é que vários modos de falha competem simultaneamente para interromper a operação do sistema. Em confiabilidade, um motor elétrico não possui um único destino, mas está exposto a diferentes mecanismos, tais como:

- Falha de rolamentos (fadiga mecânica);
- Degradação do isolamento (estresse termoelétrico);
- Desmagnetização térmica de ímãs permanentes;
- Falhas em sensores de efeito Hall ou térmicos;
- Quebras estruturais ou falhas de lubrificação.

Na análise clássica de vida, modela-se apenas um tempo genérico até a falha (T). Todavia, sob a ótica de riscos concorrentes, assume-se a existência de vários tempos latentes de falha (T_1, T_2, \dots, T_k). Cada um destes tempos representa o período que o mecanismo i levaria para causar a falha caso nenhum outro processo ocorresse antes.

O sistema atinge o estado de falha no exato momento em que ocorre o primeiro desses tempos latentes. Portanto, o tempo de vida observado do sistema (T_{sys}) é definido pelo mínimo entre os tempos de falha individuais:

$$T_{sys} = \min (T_1, T_2, \dots, T_k)$$

Fisicamente, essa analogia implica que cada modo de falha funciona como um "relógio" próprio que avança de acordo com sua respectiva física de desgaste. O equipamento cessa sua função no instante em que o primeiro relógio atinge o tempo

crítico. Consequentemente, o tempo observado de vida do motor não representa a durabilidade de todos os seus componentes, mas exclusivamente o tempo do mecanismo que se concretizou primeiro.

C.2 Diferença entre Tempos Latentes e Observados

Um conceito fundamental para a validade da análise de riscos concorrentes é a distinção entre tempos latentes e o tempo efetivamente observado. Na modelagem estocástica, os tempos T_1, T_2, \dots, T_k são denominados tempos latentes. Eles representam, teoricamente, quanto tempo cada mecanismo específico levaria para causar a falha do motor caso nenhum outro processo de degradação o interrompesse antes.

Todavia, na prática operacional, registra-se apenas o tempo de falha do sistema (T_{sys}) e a causa associada ($C = i$), onde i indica qual modo de falha foi o primeiro a se concretizar. A Tabela 16 ilustra essa dinâmica através de três unidades hipotéticas submetidas a diferentes estresses.

Tabela 16 – Exemplificação de Tempos Latentes vs. Tempo Observado

Unidade	T₁ (Rolamento)	T₂ (Isolamento)	T₃ (Térmico)	Tempo Observado	Causa Primária
Motor A	1.200 h	3.000 h	2.500 h	1.200 h	Rolamento
Motor B	5.000 h	1.800 h	4.200 h	1.800 h	Isolamento
Motor C	2.600 h	2.400 h	1.500 h	1.500 h	Térmico

Fonte: Autoria própria (2026).

A análise da Tabela 16 permite compreender a natureza competitiva dos riscos. No caso do Motor A, a falha ocorreu pelo modo de rolamento aos 1.200 h. A partir deste evento, torna-se impossível observar experimentalmente se o motor teria falhado por sobreaquecimento térmico aos 2.500 h ou por isolamento aos 3.000 h. Esses tempos potenciais permanecem "ocultos" ou censurados pela ocorrência da falha primária.

Fisicamente, isso significa que a confiabilidade observada de um *powertrain* com motor PMSM ou PMSynRM é sempre ditada pelo mecanismo que atinge o limite crítico de forma mais precoce. Esta competição justifica por que a introdução de novos componentes (como os ímãs permanentes no PMSynRM) altera a dinâmica global: ao adicionar novos tempos latentes à "corrida", a probabilidade de que um desses novos

relógios pare antes dos demais aumenta, impactando diretamente o parâmetro de forma (β_{eff}) e a vida característica (η_{eff}) do sistema integrado.

Dessa forma, a análise de riscos concorrentes permite que a modelagem não ignore as causas de falha "vencidas" na corrida, mas as incorpore estatisticamente para prover uma estimativa mais realista da confiabilidade nas categorias M1 e N1.

C.3 Pilar I: A Equação da Corrida e a Analogia de Sistemas em Série

O primeiro pilar fundamental da análise de riscos concorrentes reside na formalização matemática da "corrida" entre os mecanismos de degradação. A expressão que rege o comportamento do tempo de vida do motor é definida pela Equação (C.1):

$$T_{sys} = \min(T_1, T_2, \dots, T_k) \quad (C.1)$$

Esta equação estabelece que o sistema atingirá o estado de falha no exato momento em que ocorrer o primeiro evento dentre todos os modos possíveis. Do ponto de vista da engenharia de confiabilidade, essa lógica apresenta uma analogia direta com o comportamento de um arranjo em série.

Sob esta perspectiva, o motor elétrico deixa de ser visto como um bloco monolítico e passa a ser compreendido como um sistema dinâmico sujeito a múltiplos "caminhos de falha" potenciais. No contexto deste TCC, essa fundamentação justifica a inclusão de penalidades no modelo do PMSynRM: ao possuir geometrias de rotor mais complexas, a máquina está exposta a uma maior variedade de trajetórias de degradação que podem antecipar o tempo T_{sys} , tornando o parâmetro de forma (β_{eff}) e a escala (η_{eff}) mais sensíveis à complexidade do projeto eletromagnético.

C.4 Pilar II: A Probabilidade de Sobrevivência do Sistema Composto

O segundo pilar da análise de riscos concorrentes define a função de confiabilidade do sistema, ou seja, a probabilidade de o motor sobreviver a todos os mecanismos de falha simultaneamente até um determinado tempo t . A sobrevivência do sistema, denotada por $R_{sys}(t)$, é expressa pela probabilidade de que o tempo de falha observado seja superior ao tempo de interesse, conforme Equação (C.2):

$$R_{sys}(t) = P(T_{sys} > t) \quad (C.2)$$

Pela lógica da "corrida" estabelecida anteriormente, para que o motor permaneça operacional no instante t , é imperativo que nenhum dos modos de falha

concorrentes tenha ocorrido até esse momento. Matematicamente, a condição $T_{sys} > t$ implica necessariamente que todos os tempos latentes individuais devem ser superiores a t :

$$T_1 > t, T_2 > t, \dots, T_k > t$$

Consequentemente, a função de confiabilidade global pode ser escrita como a probabilidade conjunta de sobrevivência de todos os mecanismos, conforme Equação (C.3):

$$R_{sys}(t) = P(T_1 > t, T_2 > t, \dots, T_k > t) \quad (C.3)$$

Assumindo a premissa de que os modos de falha são estatisticamente independentes — ou seja, a ocorrência de uma falha por rolamento não altera a distribuição de probabilidade intrínseca da degradação do isolamento —, a sobrevivência do sistema é dada pelo produto das confiabilidades individuais de cada modo, conforme a Equação (C.4):

$$R_{sys}(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_k(t) \quad (C.4)$$

Ou, de forma simplificada, conforme Equação (C.5) por meio do produtório:

$$R_{sys}(t) = \prod_{i=1}^k R_i(t) \quad (C.5)$$

Esta é a expressão central da sobrevivência sob riscos concorrentes independentes. Ela demonstra que a confiabilidade total do motor será sempre inferior ou, no limite, igual à confiabilidade do seu modo de falha mais frágil. No contexto da comparação entre PMSM e PMSynRM, essa formulação justifica a perda de confiabilidade observada em sistemas com rotores mais complexos: ao adicionar termos multiplicativos à equação (referentes a novos riscos como a desmagnetização), o valor final de $R_{sys}(t)$ sofre uma redução matemática inevitável, fundamentando a necessidade de estratégias de redundância para garantir a confiabilidade do veículo elétrico.

C.4.1 Consequência Analítica: Impacto da Multiplicidade de Modos na Confiabilidade

Uma consequência analítica imediata e de grande relevância para a engenharia de sistemas é o efeito redutor que a adição de novos modos de falha exerce sobre a confiabilidade global. Dado que cada função de confiabilidade individual representa uma probabilidade, seu valor está contido no intervalo $[0, 1]$. Matematicamente, o produto de múltiplos termos situados nesse intervalo resultará

invariavelmente em um valor menor ou, no limite, igual ao menor dos termos individuais, conforme Equação (C.6):

$$R_{sys}(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_k(t) \leq \min [R_1(t), R_2(t), \dots, R_k(t)] \quad (C.6)$$

Para ilustrar este fenômeno, considere-se um motor operando em um determinado instante t sob três riscos concorrentes independentes, com os seguintes índices de confiabilidade:

- Confiabilidade contra falha de rolamento (R_1): 0,90
- Confiabilidade contra falha de isolamento (R_2): 0,95
- Confiabilidade contra falha magnética (R_3): 0,98

A confiabilidade global do sistema será o produto dessas probabilidades:

$$R_{sys}(t) = 0,90 \times 0,95 \times 0,98 = 0,8379$$

Observa-se que a confiabilidade resultante (0,8379) é inferior à confiabilidade de qualquer um dos modos analisados isoladamente, sendo inclusive significativamente menor que o índice do modo mais crítico ($0,8379 < 0,90$).

Esta é uma das intuições mais poderosas do modelo de riscos concorrentes: a percepção de que mesmo quando todos os mecanismos individuais são moderadamente confiáveis, a probabilidade global de falha pode tornar-se significativa devido ao efeito cumulativo das ameaças. No contexto deste TCC, esta fundamentação explica por que tecnologias mais complexas, como o PMSM e o PMSynRM, apresentam naturalmente índices de sobrevivência inferiores ao SynRM puro em configurações sem redundância. A introdução de ímãs e sensores adiciona novos "caminhos de falha" que, embora individualmente seguros, colaboram para a redução da confiabilidade operacional do *powertrain* nas categorias M1 e N1.

C.4.2 Propriedade de Aditividade das Taxas de Falha

Uma das propriedades mais significativas do modelo de riscos concorrentes reside na forma como os riscos instantâneos individuais se combinam para formar o risco total do sistema. A taxa de falha, ou função de risco ($h(t)$), representa a probabilidade instantânea de falha de um componente em um tempo t , dado que ele sobreviveu até esse instante. Matematicamente, ela é definida pela razão entre a densidade de probabilidade de falha ($f(t)$) e a função de confiabilidade ($R(t)$), conforme Equação (C.7):

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (C.7)$$

Uma forma alternativa e útil de expressar a taxa de falha é através da derivada negativa do logaritmo natural da função de confiabilidade, conforme Equação (C.8):

$$h(t) = -\frac{d}{dt} \ln R(t) \quad (\text{C.8})$$

Ao aplicar essa definição à função de sobrevivência do sistema sob riscos concorrentes independentes, onde $R_{sys}(t) = \prod_{i=1}^k R_i(t)$, obtém-se uma relação fundamental. Aplicando-se o logaritmo natural a ambos os lados da equação, o produto das confiabilidades transforma-se em uma soma de logaritmos, conforme Equação (C.9):

$$\ln R_{sys}(t) = \ln R_1(t) + \ln R_2(t) + \dots + \ln R_k(t) \quad (\text{C.9})$$

Ao derivar essa expressão em relação ao tempo e aplicar o sinal negativo, conforme a definição da função de risco, obtém-se a taxa de falha do sistema ($h_{sys}(t)$), na Equação (C.10):

$$h_{sys}(t) = -\frac{d}{dt} [\ln R_1(t) + \ln R_2(t) + \dots + \ln R_k(t)] \quad (\text{C.10})$$

Logo, a taxa de falha global é a soma das taxas de falha individuais de cada mecanismo concorrente, conforme Equação (C.11):

$$h_{sys}(t) = h_1(t) + h_2(t) + \dots + h_k(t) \Rightarrow h_{sys}(t) = \sum_{i=1}^k h_i(t) \quad (\text{C.11})$$

Esta propriedade de aditividade demonstra que, em sistemas sujeitos a riscos concorrentes independentes, cada modo de falha acrescenta uma parcela direta à taxa instantânea de falha do sistema.

Fisicamente, isso implica que o motor está exposto simultaneamente a todos os riscos: o risco de falha por rolamento, por isolamento e por desmagnetização contribuem, de forma somatória, para o perigo total de avaria em qualquer instante t . No contexto da comparação entre PMSM e PMSynRM, essa aditividade justifica por que a inclusão de componentes magnéticos e eletrônicos eleva o risco total de operação, exigindo que cada componente individual possua uma confiabilidade superior para manter o parâmetro de falhas do sistema em níveis aceitáveis para as categorias veiculares M1 e N1.

C.4.3 Interpretação Física da Taxa de Risco Somatória

A interpretação física da expressão $h_{sys}(t) = \sum h_i(t)$ oferece uma visão clara sobre o estado de estresse operacional a que o motor está submetido. Imagine que,

em um determinado instante t de sua missão, o motor está operando e sendo submetido simultaneamente a diferentes categorias de ameaça:

- $h_1(t)$: O risco instantâneo de uma avaria mecânica nos rolamentos por fadiga;
- $h_2(t)$: O risco instantâneo de um curto-circuito por degradação térmica da isolamento;
- $h_3(t)$: O risco instantâneo de perda de torque por desmagnetização dos ímãs permanentes.

O risco total instantâneo de falha do motor é a soma aritmética desses riscos individuais. Essa soma não implica que todos os modos de falha ocorrerão simultaneamente. Pelo contrário, a propriedade indica que todos os mecanismos contribuem para a possibilidade instantânea de colapso do sistema.

Fisicamente, é como se o equipamento estivesse sendo "atacado" simultaneamente por várias frentes de degradação. Cada mecanismo de falha exerce uma pressão sobre a integridade do *powertrain*; a falha que será efetivamente observada e registrada será aquela causada pelo primeiro mecanismo que se concretizar. No contexto das categorias M1 e N1, essa percepção reforça o desafio de projeto: para aumentar a vida útil do veículo, não basta otimizar apenas o modo de falha dominante, mas sim gerenciar o somatório de todos os riscos, uma vez que a introdução de novas complexidades (como ímãs e barreiras de fluxo) eleva o "ruído" de falha e a vulnerabilidade instantânea da máquina.

C.5 Pilar III: Atribuição da Falha e a Função de Incidência Acumulada (CIF)

O terceiro pilar fundamental da teoria de riscos concorrentes responde a uma questão para a engenharia de manutenção: dentre todos os motores que falharam até um determinado instante t , qual é a proporção de avarias causada especificamente por um mecanismo i ? Essa resposta é fornecida pela Função de Incidência Acumulada (*Cumulative Incidence Function* – CIF).

Diferente da probabilidade de falha teórica de um componente isolado, a CIF quantifica a probabilidade de o sistema falhar até o tempo t especificamente devido à causa i , operando em um ambiente onde outros riscos concorrentes também estão presentes. Matematicamente, ela é expressa na Equação (C.12):

$$CIF_i(t) = P(T_{sys} \leq t, C = i) \quad (C.12)$$

A forma integral da CIF é essencial para compreender a dinâmica de competição no motor elétrico, conforme Equação (C.13):

$$CIF_i(t) = \int_0^t h_i(s) \cdot R_{sys}(s) ds \quad (C.13)$$

Nesta expressão, a interação entre dois termos fundamentais descreve a realidade física da falha:

- $h_i(s)$: Representa a intensidade ou risco instantâneo do modo de falha i no instante s . É a "força" com que aquele mecanismo específico (como a desmagnetização) atua para interromper a operação da máquina.
- $R_{sys}(s)$: Representa a probabilidade de o sistema integral ainda estar funcional (vivo) até o instante s .

O produto desses dois termos, $h_i(s) \cdot R_{sys}(s)$, define a densidade de falha do sistema no instante s causada especificamente pelo modo i . Isso significa que, para uma falha por rolamento ser atribuída a um motor como causa primária, é necessário que o rolamento falhe no instante s (h_i) e que o motor tenha sobrevivido a todos os outros riscos concorrentes (isolação, térmico, etc.) até aquele exato momento (R_{sys}).

Para o estudo comparativo entre PMSM e PMSynRM essa distinção demonstra que a frequência observada de um modo de falha na prática depende não apenas de sua própria robustez, mas também da robustez de todos os outros componentes do sistema. No contexto das categorias M1 e N1, a CIF permite identificar quais mecanismos de degradação são os responsáveis reais pela indisponibilidade do *powertrain*, orientando onde os esforços de projeto e manutenção preditiva devem ser concentrados para maximizar a vida útil do veículo.

C.5.1 Distinção Conceitual entre a Incidência Acumulada (CIF) e a Distribuição Marginal (F)

Uma das maiores fontes de confusão na análise de confiabilidade de múltiplos modos reside na distinção entre a Função de Incidência Acumulada (CIF_i) e a função de distribuição acumulada marginal (F_i). A função marginal, definida por $F_i(t) = 1 - R_i(t)$, representa a probabilidade de o modo i ocorrer até o tempo t caso ele fosse o único mecanismo de falha atuante no sistema, sendo analisado de forma isolada.

Todavia, no contexto de riscos concorrentes aplicado a motores PMSM e PMSynRM, o modo *isó* se manifesta como a causa observada se nenhum outro

mecanismo de falha concorrente tiver provocado o colapso do sistema anteriormente. Por esta razão, a modelagem exige a utilização da CIF, conforme Equação (C.14):

$$CIF_i(t) = \int_0^t h_i(s) \cdot R_{sys}(s) ds \quad (C.14)$$

A diferença fundamental é que a CIF considera a competição direta entre os riscos. Enquanto a distribuição marginal $F_i(t)$ "ignora" a existência de outros perigos, a CIF reconhece que o sistema pode ter sido interrompido por outro modo de falha antes que o modo *it* tivesse a oportunidade de ocorrer.

Em termos práticos para veículos das categorias M1 e N1, se analisarmos o rolamento isoladamente (F_{rol}), poderemos obter uma estimativa de falha de 10% em 20.000 horas. Entretanto, se o sistema de isolamento for muito frágil, muitos motores falharão por isolamento antes de atingirem o limite de desgaste do rolamento. Nesse cenário, a incidência real observada de falhas por rolamento (CIF_{rol}) será menor que os 10% previstos isoladamente.

Portanto, o uso da CIF em detrimento da $F_i(t)$ é o que confere realismo estatístico ao presente estudo, permitindo quantificar a contribuição real de cada tecnologia de rotor (com ou sem assistência de ímãs) para as estatísticas de manutenção e garantia do *powertrain* integral.

C.5.2 Exemplificação Numérica da Competição entre Riscos

Para ilustrar a diferença prática entre a probabilidade isolada e a incidência real, considere-se um cenário com dois modos de falha: (1) rolamento e (2) isolamento. Se analisarmos o rolamento de forma isolada, ignorando outros riscos, poderíamos obter uma distribuição marginal:

$$F_1(2.000 \text{ h}) = 0,30$$

Este valor indica que haveria 30% de chance de falha por rolamento até as 2.000 horas de operação. Todavia, no sistema real do *powertrain*, alguns motores que estariam destinados a falhar por rolamento em um tempo futuro acabarão falhando precocemente por problemas no isolamento do estator.

Nesse contexto de competição, a incidência observada de falhas por rolamento será necessariamente menor, por exemplo:

$$CIF_1(2.000 \text{ h}) = 0,22$$

O resultado revela que apenas 22% das unidades falharam efetivamente por rolamento como causa primária. A diferença entre os 30% teóricos e os 22%

observados é explicada pela presença dos riscos concorrentes: o isolamento "venceu a corrida" em 8% dos casos que, de outra forma, seriam atribuídos aos rolamentos.

C.6 Relação entre as CIFs e a Falha Total do Sistema

A integridade estatística do modelo de riscos concorrentes é garantida pela relação entre as incidências individuais e a falha global do sistema. A probabilidade total de falha do motor até um tempo t (F_{sys}) é o complemento de sua função de sobrevivência, conforme Equação (C.15):

$$F_{sys}(t) = 1 - R_{sys}(t) \quad (C.15)$$

Como cada falha observada deve ser obrigatoriamente atribuída a um dos modos concorrentes, a falha total do sistema é a soma das funções de incidência acumulada de todos os k modos, conforme Equação (C.16):

$$F_{sys}(t) = \sum_{i=1}^k CIFI_i(t) \Rightarrow 1 - R_{sys}(t) = CIFI_1(t) + CIFI_2(t) + \dots + CIFI_k(t) \quad (C.16)$$

Esta identidade fundamental permite decompor a mortalidade em três métricas complementares:

1. $R_{sys}(t)$: Mede a fração que permanece operacional (ainda viva);
2. $F_{sys}(t)$: Mede a fração total que já atingiu o estado de falha;
3. $CIFI_i(t)$: Mede especificamente a fração que falhou devido ao modo i como causa primeira.

C.7 Interpretação Gráfica e Perda Adicional de Confiabilidade

Em uma análise gráfica de confiabilidade, as curvas de sobrevivência individuais (R_1, R_2, \dots, R_k) e a curva do sistema (R_{sys}) apresentam um comportamento característico: a curva $R_{sys}(t)$ situar-se-á invariavelmente abaixo de todas as curvas individuais.

Este fenômeno ocorre porque o motor precisa sobreviver a todos os riscos simultaneamente para ser considerado funcional. A distância vertical (ou a área) entre a curva do modo de falha dominante (aquela que apresenta a menor confiabilidade isolada) e a curva sistêmica representa a perda adicional de confiabilidade provocada pela existência de riscos concorrentes.

Mesmo que o rolamento seja o modo de falha dominante — apresentando a curva de sobrevivência mais baixa —, a confiabilidade real do *powertrain* será ainda menor ($R_{sys} < R_{rolamento}$), pois mecanismos secundários como degradação térmica,

vibração ou falhas em sensores também exercem pressão sobre o sistema e podem causar a avaria antes do fim da vida útil mecânica do rolamento. Para os veículos das categorias M1 e N1, essa interpretação gráfica evidencia que a confiabilidade total é um alvo móvel, influenciado por cada nova complexidade adicionada ao projeto do rotor.

C.8 Definição e Dualidade da Dominância de Falha

A identificação do modo de falha "dominante" é um passo crítico para a priorização de ações de engenharia e manutenção. No contexto de riscos concorrentes, a dominância pode ser compreendida sob duas perspectivas distintas que, embora relacionadas, descrevem fenômenos diferentes:

1. Dominância por Taxa de Risco (h_i): Um modo de falha é considerado dominante em um intervalo de tempo específico se sua taxa de falha instantânea for superior à dos demais mecanismos naquele período. Esta métrica identifica qual é a ameaça mais intensa ao sistema em um dado momento da operação.
2. Dominância por Incidência Acumulada (CIF_i): Um modo é dominante até um tempo t se ele for o responsável pela maior fração de falhas observadas até aquele instante. Essa métrica identifica a causa primária mais frequente nos registros de manutenção.

É imperativo observar que essas duas formas de dominância não são necessariamente coincidentes. Um mecanismo pode apresentar uma taxa de falha extremamente elevada em tempos tardios (como a fadiga estrutural), mas possuir uma baixa incidência acumulada nos anos iniciais de operação do veículo. De forma genérica, observa-se a seguinte transição de dominância ao longo do ciclo de vida do *powertrain*:

- Fase Inicial: Falhas eletrônicas e de *software* costumam dominar devido à mortalidade infantil;
- Meia-Vida: Falhas de rolamentos e vedações tendem a dominar o regime operacional estável;
- Fase Final: Falhas por fadiga estrutural e degradação térmica severa tornam-se dominantes pelo desgaste (*wear-out*).

C.9 Modelagem Paramétrica via Distribuição de Weibull

Na engenharia de confiabilidade moderna, a forma mais robusta e usual de operacionalizar o modelo de riscos concorrentes é através da Distribuição de Weibull. Cada modo de falha i é modelado de forma independente por sua função de confiabilidade, conforme Equação (C.17):

$$R_i(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{\beta_i}} \quad (\text{C.17})$$

Consequentemente, a taxa de falha instantânea para cada mecanismo é expressa pela Equação (C.18):

$$h_i(t) = \frac{\beta_i}{\eta_i} \left(\frac{t}{\eta_i}\right)^{\beta_i-1} \quad (\text{C.18})$$

Ao considerar um motor sujeito a três modos independentes (ex: rolamento, isolamento e desmagnetização), a confiabilidade do sistema é consolidada pelo produto das sobrevivências individuais. Matematicamente, as potências se somam no expoente da base neperiana, conforme Equação (C.19):

$$R_{sys}(t) = e^{-\left[\left(\frac{t}{\eta_1}\right)^{\beta_1} + \left(\frac{t}{\eta_2}\right)^{\beta_2} + \left(\frac{t}{\eta_3}\right)^{\beta_3}\right]} \quad (\text{C.19})$$

De forma análoga, a taxa de falha total do sistema é a soma aritmética das funções de risco de cada modo, conforme Equação (C.20):

$$h_{sys}(t) = h_1(t) + h_2(t) + h_3(t) \quad (\text{C.20})$$

Esta abordagem paramétrica é extremamente valiosa para o estudo das topologias PMSM e PMSynRM, pois permite separar e quantificar a contribuição individual de cada mecanismo físico de falha para a indisponibilidade global. Ao ajustar os parâmetros de forma (β) e escala (η) de cada modo, a análise computacional consegue refletir como mudanças no projeto do rotor alteram a dinâmica de falhas e a vida útil do *powertrain* nas categorias M1 e N1.

C.10 Interpretação Física dos Parâmetros de Weibull em Riscos Concorrentes

Uma das maiores vantagens da utilização da distribuição de Weibull na análise de riscos concorrentes é a preservação da interpretação física de cada mecanismo de falha individual. Através do parâmetro de forma β_i , é possível caracterizar a natureza da degradação de cada componente do motor síncrono, permitindo que a modelagem sistêmica reflita a realidade operativa:

1. $\beta_i < 1$ (Risco Decrescente): Representa falhas infantis ou precoces. Fisicamente, indica problemas de fabricação, erros de montagem, defeitos latentes em materiais ou triagem insuficiente. A probabilidade de falha diminui

à medida que o tempo de operação avança e os "itens fracos" são eliminados da população.

2. $\beta_i = 1$ (Risco Constante): Corresponde ao modelo exponencial, onde as falhas ocorrem de forma aleatória e independente do envelhecimento. É típico de componentes eletrônicos em sua fase de vida útil madura ou eventos externos imprevisíveis (sobretensões ou picos de carga).
3. $\beta_i > 1$ (Risco Crescente): Indica processos de desgaste progressivo, fadiga e acúmulo de danos. É o regime predominante para a maioria dos componentes eletromecânicos de um *powertrain* nas categorias M1/N1.

O Quadro 13 sintetiza a aplicação dessa interpretação para os diferentes módulos que compõem o sistema de tração analisado.

Quadro 13 – Interpretação Física dos Modos de Falha via Parâmetro Comparativo de indicadores de desempenho β

Modo de Falha	Comportamento do β	Fenômeno Físico Associado
Eletrônica Inicial	$\beta < 1$	Mortalidade infantil e defeitos de fabricação ou de lote.
Falhas Aleatórias	$\beta \approx 1$	Eventos estocásticos imprevisíveis, sem tendência de envelhecimento.
Rolamentos	$\beta > 1$	Desgaste progressivo e fadiga mecânica de contato.
Isolamento	$\beta > 1$	Degradação termoelétrica e envelhecimento do material dielétrico.
Estrutural	$\beta > 1$	Fadiga acumulada decorrente de esforços mecânicos cíclicos.

Fonte: Autoria própria (2026).

C.11 Exemplificação Numérica de Riscos Concorrentes Exponenciais

Para ilustrar a lógica de aditividade e atribuição de falhas, considere-se um caso simplificado com dois modos de falha independentes operando sob taxas constantes (distribuição exponencial). Suponha que o modo 1 (rolamento) e o modo 2 (isolamento) apresentem as seguintes taxas de falha:

- Taxa do Modo 1 $h_1 = \lambda_1 = 0,0002$ falhas/hora:
- Taxa do Modo 2: $h_2 = \lambda_2 = 0,0003$ falhas/hora

De acordo com a propriedade de aditividade, a taxa de falha total do sistema (h_{sys}) é a soma das intensidades individuais:

$$h_{sys} = \lambda_1 + \lambda_2 = 0,0002 + 0,0003 = 0,0005 \text{ falhas/hora}$$

A função de sobrevivência e a probabilidade de falha total do sistema até um tempo t são dadas pela Equação (C.21):

$$R_{sys}(t) = e^{-0,0005t} \Rightarrow F_{sys}(t) = 1 - e^{-0,0005t} \quad (C.21)$$

Para determinar a contribuição real de cada modo, aplica-se a Função de Incidência Acumulada (CIF). Para o modo 1, a integral resulta na equação (C.22):

$$CIF_1(t) = \int_0^t \lambda_1 * e^{-(\lambda_1+\lambda_2)s} ds = \frac{\lambda_1}{\lambda_1+\lambda_2} (1 - e^{-(\lambda_1+\lambda_2)t}) \quad (C.22)$$

Substituindo os valores, obtém-se a fração de falhas atribuída a cada mecanismo, conforme Equação (C.23) e Equação (C.24):

$$CIF_1(t) = \frac{0,0002}{0,0005} F_{sys}(t) = 0,4 * F_{sys}(t) \quad (C.23)$$

$$CIF_2(t) = \frac{0,0003}{0,0005} F_{sys}(t) = 0,6 * F_{sys}(t) \quad (C.24)$$

Neste exemplo, como as taxas são constantes, a incidência observada é diretamente proporcional à magnitude da taxa de falha. Conclui-se que o modo 1 será responsável por 40% das falhas registradas, enquanto o modo 2 responderá por 60%. Este exercício demonstra como a teoria de riscos concorrentes permite decompor a mortalidade global em causas específicas, provendo subsídios para que a análise comparativa entre PMSM e PMSynRM identifique qual tecnologia impõe o maior fardo de manutenção ao sistema de tração.

C.12 Aplicação Prática do Modelo ao Objeto de Estudo (Motores Elétricos)

Ao aplicar a teoria de riscos concorrentes em motores elétricos para as categorias M1 e N1, considera-se a interação simultânea de diferentes mecanismos de degradação. Para fins de modelagem, pode-se isolar três grandes categorias de falha com comportamentos físicos distintos, conforme o Quadro 14.

Quadro 14 – Comportamento dos Modos de Falha em Motores de Tração

Modo	Descrição	Comportamento Provável
1	Rolamentos	Desgaste mecânico progressivo e fadiga de contato, caracterizado por $\beta > 1$.
2	Isolamento do Estator	Degradação termoelétrica crescente do sistema isolante, caracterizada por $\beta > 1$.
3	Eletrônica/Sensores	Falhas aleatórias ou associadas à mortalidade infantil, caracterizadas por $\beta \leq 1$.

Fonte: Autoria própria (2026).

Para cada um desses modos, ajusta-se uma distribuição de vida específica ($R_{rol}, R_{iso}, R_{ele}$), resultando em uma função de sobrevivência global do motor definida pelo produto das probabilidades, mostrado na Equação (C.25):

$$R_{motor}(t) = R_{rol}(t) * R_{iso}(t) * R_{ele}(t) \quad (C.25)$$

Desta forma, a taxa de falha total (h_{motor}) é a soma das intensidades instantâneas de cada mecanismo. A aplicação da Função de Incidência Acumulada permite determinar, por exemplo, a fração que falhou especificamente devido aos rolamentos como causa primária até um determinado tempo, conforme Equação (C.26):

$$CIF_{rol}(t) = \int_0^t h_{rol}(s) \cdot R_{motor}(s) ds \quad (C.26)$$

A resposta fornecida pela CIF é distinta da probabilidade de falha isolada (F_{rol}). Enquanto a função isolada questiona a probabilidade de falha do rolamento caso ele fosse o único componente da máquina, a CIF informa qual a real proporção de motores que pararam por problemas de rolamento em um cenário onde o isolamento ou a eletrônica também poderiam ter "vencido a corrida". Essa distinção é o que permite ao presente estudo avaliar com precisão o fardo de manutenção imposto pelas topologias PMSM e PMSynRM.

C.13 Aplicabilidade do Modelo na Tomada de Decisão em Engenharia

A utilidade da análise de riscos concorrentes para a engenharia de confiabilidade automotiva reside na sua capacidade de fornecer respostas quantitativas para questionamentos estratégicos de projeto e manutenção, tais como:

- Qual modo de falha domina a confiabilidade global do *powertrain*?
- Em qual faixa de tempo operacional cada mecanismo se torna o risco predominante?

- Qual componente deve ser priorizado para investimentos em melhoria de projeto?
- Qual mecanismo de degradação mais contribui para a perda prematura de vida útil?
- Qual falha tende a aparecer mais cedo, impactando os custos de garantia?
- Qual subsistema deve ser o foco prioritário de técnicas de manutenção preditiva?

A análise das curvas de incidência acumulada (CIF) permite direcionar as ações corretivas e preventivas de forma cirúrgica. Por exemplo, se os resultados indicarem que a CIF de rolamentos domina os primeiros 5.000 h de operação, as estratégias de engenharia devem focar em:

- Otimização da lubrificação e revisão dos sistemas de vedação;
- Redução de vibrações estruturais e melhoria do alinhamento dinâmico;
- Alteração da especificação de carga dinâmica ou substituição de fornecedores.

Por outro lado, se a CIF de isolamento demonstrar dominância em tempos tardios (ex: após 20.000 h), as diretrizes de projeto devem migrar para:

- Elevação da classe térmica dos materiais isolantes;
- Melhoria dos sistemas de ventilação e gerenciamento térmico do motor;
- Implementação de monitoramento de descargas parciais e controle rigoroso de sobrecargas e ciclos térmicos.

Desta forma, o modelo de riscos concorrentes deixa de ser apenas uma ferramenta estatística e passa a ser um instrumento de gestão de ciclo de vida. No contexto da transição para o motor PMSynRM, essa fundamentação permite que as desvantagens intrínsecas de confiabilidade do rotor sejam compensadas por ações de engenharia direcionadas, garantindo que a redução de custos e de materiais críticos seja acompanhada por uma robustez operacional compatível com as exigências do mercado de veículos elétricos leves.

C.14 O Conceito de Vida Característica Efetiva (η_{eff})

A influência da multiplicidade de riscos concorrentes manifesta-se não apenas na forma do envelhecimento (β_{eff}), mas também na escala temporal de vida do sistema. Quando se adicionam novos modos de falha a uma máquina, a vida

característica efetiva (η_{eff}) do sistema tende a ser menor do que a vida característica de cada modo isolado.

É importante observar que, se cada modo de falha individual for modelado por uma distribuição de Weibull com parâmetros β_i distintos, o sistema resultante não será, em rigor matemático, uma distribuição de Weibull simples. Todavia, para fins de engenharia e modelagem sistêmica, define-se uma vida efetiva análoga ao parâmetro de escala original: o tempo necessário para que a sobrevivência do sistema integral atinja o valor de $1/e$ ($\approx 36,8\%$).

Como a função de sobrevivência global é o resultado do produtório das sobrevivências individuais ($R_{sys} = \prod R_i$), a probabilidade de sobrevivência do motor decai de forma mais acelerada do que a de seus componentes isolados. Conseqüentemente, η_{eff} representará invariavelmente um horizonte temporal reduzido em comparação aos parâmetros η_i de cada mecanismo, evidenciando que a confiabilidade sistêmica do *powertrain* é limitada pelo efeito cumulativo dos riscos.

C.15 Premissas e Ressalvas Conceituais do Modelo

A aplicação da teoria de riscos concorrentes exige cautela metodológica em três dimensões críticas, fundamentais para a integridade dos resultados nas análises de confiabilidade de veículos das categorias M1 e N1:

1. Hipótese de Independência: O modelo baseia-se na premissa de que os tempos latentes de falha são independentes. Contudo, em operações reais, fatores ambientais e operativos frequentemente geram dependências por causas comuns. Por exemplo, uma alta temperatura de operação acelera simultaneamente a degradação do isolamento e o consumo da vida útil dos rolamentos; da mesma forma, vibrações excessivas podem comprometer tanto a integridade mecânica quanto as conexões elétricas. Nestes casos, os riscos estão acoplados, o que exige um tratamento cuidadoso na interpretação das margens de segurança.
2. Ambiguidade na Atribuição da Causa: No campo, a identificação da causa primária da falha pode ser complexa. Um motor pode apresentar, simultaneamente, rolamentos danificados e isolamento degradado. A validade do modelo de riscos concorrentes depende de uma taxonomia clara para a classificação de falhas (causa raiz, mecanismo físico ou componente afetado),

evitando que a modelagem se torne estatisticamente correta, porém fisicamente incoerente.

3. Distinção entre Incidência e Distribuição Marginal: Um erro comum consiste em utilizar a distribuição marginal $F_i(t)$ para prever a fração de falhas. Deve-se reforçar que apenas a CIF quantifica a incidência observada sob competição. A função $F_i(t)$ superestima a ocorrência de um modo de falha por não considerar que o motor pode ter falhado por outro motivo antes que aquele mecanismo específico se manifestasse.

C.16 Síntese Final da Teoria de Riscos Concorrentes

Em suma, o modelo de riscos concorrentes constitui a espinha dorsal da análise de confiabilidade deste estudo, podendo ser sintetizado por quatro premissas fundamentais:

- A Corrida ($T_{sys} = \min(T_i)$): Estabelece que o tempo de falha observado é ditado pelo primeiro mecanismo de degradação a atingir o limite crítico.
- Sobrevivência Conjunta ($R_{sys} = \prod R_i$): Define que a confiabilidade do sistema é a probabilidade de sobreviver a todos os riscos independentes simultaneamente.
- Aditividade de Riscos ($h_{sys} = \sum h_i$): Demonstra que as taxas de falha instantâneas se somam, elevando o perigo total de operação a cada nova complexidade adicionada ao sistema.
- Atribuição Estatística (CIF_i): Identifica a fração real de falhas atribuída a cada modo, considerando a competição direta entre eles.

Em linguagem direta, a análise de riscos concorrentes permite modelar o *powertrain* como um equipamento exposto a múltiplos "caminhos de interrupção". Esta abordagem é especialmente poderosa para a comparação entre motores PMSM e PMSynRM, pois permite separar e quantificar as contribuições de falhas mecânicas, elétricas e térmicas sem perder a visão sistêmica necessária para garantir a robustez e a viabilidade industrial de veículos elétricos leves.