

André Felipe Venzon

**PROJETO E OTIMIZAÇÃO DE UM MOTOR
BRUSHLESS APLICADO A UM VEÍCULO DE
FÓRMULA SAE**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Renato Carlson

Coorientador: Prof. Dr. Nelson Sadowski

Florianópolis

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Venzon, André Felipe

Projeto e otimização de um motor brushless
aplicado a um veículo de Fórmula SAE / André Felipe
Venzon ; orientador, Renato Carlson, coorientador,
Nelson Sadowski, 2018.

170 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Motor Elétrico. 3.
Veículo Elétrico. 4. Otimização. 5. Fórmula SAE. I.
Carlson, Renato. II. Sadowski, Nelson. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Elétrica. IV. Título.

André Felipe Venzon

**PROJETO E OTIMIZAÇÃO DE UM MOTOR *BRUSHLESS*
APLICADO A UM VEÍCULO DE FÓRMULA SAE**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado aprovado para a obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica”, e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica.

Florianópolis, 27 de novembro de 2018.

Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Renato Carlson, Dr.
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Nelson Sadowski, Dr.
Coorientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Mauricio Valencia Ferreira Da Luz, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha família,
aos meus professores e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Valmir e Patrícia, pela educação, amor e apoio em minhas decisões ao longo do meu caminho. Agradeço também à minha namorada Débora por estar sempre ao meu lado me incentivando em meus projetos de vida. Agradeço aos meus irmãos, Pedro e Lucas, pelo carinho e apoio sempre.

Agradeço ao meu orientador Prof. Renato Carlson pelo tempo dispensado e sugestões que contribuíram ao desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também ao meu coorientador Prof. Nelson Sadowski pelas conversas esclarecedoras e por toda a ajuda, paciência e disposição que demonstrava em nossas conversas sobre o projeto. Agradeço à mestrande Morgana de Lemos e aos meus colegas do laboratório GRUCAD - UFSC que contribuíram de alguma forma ao desenvolvimento deste trabalho.

E por último, porém não menos importante, agradeço à equipe *Ampera Racing* pelas oportunidades, aprendizados e experiências que me proporcionaram ao longo da minha graduação. Em especial, agradeço aos meus amigos Gustavo Pereira e Thiago Motta, os quais me aconselharam e incentivaram ao decorrer do desenvolvimento deste projeto.

Se você quer ser bem sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si.

(Ayrton Senna)

RESUMO

Este trabalho consiste no projeto e na otimização de um motor elétrico aplicado à tração de um veículo elétrico monoposto de alto desempenho. Uma seleção comparativa de topologias de máquinas elétricas é feita, e então um modelo analítico do *layout* escolhido é descrito. Um algoritmo evolucionário é utilizado com o intuito de se encontrar uma solução otimizada de acordo com alguns critérios de desempenho selecionados. Posteriormente, em um *software* de simulação por elementos finitos, é feita a análise do projeto otimizado. Com isso, uma comparação entre o modelo analítico e o de elementos finitos é efetuada e os resultados são analisados. Por fim, são descritos os meios utilizados para a confecção de um protótipo que será utilizado para validar o projeto realizado

Palavras-chave: Motor Elétrico. Veículo Elétrico. Otimização.

ABSTRACT

This work consists of the design and optimization of an electric motor applied to the traction of a single-seat high-performance electric vehicle. A comparative selection of topologies of electrical machines is made and then, an analytical model of the chosen layout was described. An evolutionary algorithm is used in order to find an optimized solution according to some selected performance criteria. Afterwards, the analysis of the selected design is made in a finite element simulation software. Thus, a comparison between the analytical model and the finite element model is performed and the results are analyzed. Finally, we describe the means used to make a prototype that will be used to validate the project carried out.

Keywords: Electric Motor. Electric Vehicle. Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Automóvel desenvolvido pela equipe <i>Ampera Racing</i> no ano de 2017.	32
Figura 2	Equipe <i>Ampera Racing</i> no ano de 2017.	32
Figura 3	Táxi Elétrico em 1901.	36
Figura 4	Componentes de um VH série.	38
Figura 5	Componentes de um VH paralelo.	39
Figura 6	Componentes em um FCV.	40
Figura 7	Gráfico contemplando pontos de aplicação de motores. .	44
Figura 8	Detalhes da estrutura de um MAS.	45
Figura 9	Detalhes da estrutura de um MRV.	46
Figura 10	Forças eletromotrizes de um BLDC.	47
Figura 11	Forças eletromotrizes de um BLAC.	47
Figura 12	Detalhes da estrutura de um BLAC/BLDC com ímãs enterrados.	48
Figura 13	Disposição de ímãs em motores <i>brushless</i>	49
Figura 14	Detalhe do trajeto da provas de <i>Skid Pad</i>	53
Figura 15	Detalhe do trajeto das provas de <i>Enduro</i> e <i>Autocross</i> . .	55
Figura 16	Deformação periférica no pneu.	63
Figura 17	Desempenhos nas provas dinâmicas para $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 20kW$	71
Figura 18	Desempenhos nas provas dinâmicas para $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 25kW$	72
Figura 19	Desempenhos nas provas dinâmicas para $T_{em} = 25Nm$ e $P_e = 20kW$	74
Figura 20	Desempenhos nas provas dinâmicas para $T_{em} = 25Nm$ e $P_e = 25kW$	75
Figura 21	Ilustração da relação entre os modelos comportamental e de projeto.	80
Figura 22	Diagrama da otimização do projeto analítico.	81
Figura 23	Análise do <i>cogging torque</i>	83
Figura 24	Topologias de ímãs em superfície.	85
Figura 25	Força eletromotriz resultante para diferentes topologias de ímãs.	85

Figura 26	Desempenhos do ímã N45SH.....	87
Figura 27	Detalhes das espessuras do estator e rotor.....	90
Figura 28	Curvas $B \times H$ para chapas de aço M330-35A com diferentes larguras.....	91
Figura 29	Detalhe do dente e abertura de ranhura da máquina. . .	92
Figura 30	Detalhe das variáveis dimensionais de um polo magnético.	93
Figura 31	Diagrama fasorial de uma máquina síncrona.....	94
Figura 32	Ranhura em detalhes.	96
Figura 33	Diagrama representando o critério de pesquisa do BA. .	109
Figura 34	Evolução da função objetivo com as interações (1).	113
Figura 35	Evolução das variáveis primárias com as interações (1).	113
Figura 36	Evolução da função objetivo com as interações (2).	114
Figura 37	Evolução das variáveis primárias com as interações (2).	114
Figura 38	Interface MotorSolve.....	118
Figura 39	Vista em corte do motor no MotorSolve.....	119
Figura 40	Densidade de fluxo no entreferro.....	120
Figura 41	Corrente na fase A.....	121
Figura 42	Forças contra eletromotrizes (<i>back-EMF</i>).....	122
Figura 43	Perdas no motor para corrente e velocidade nominais...	122
Figura 44	Perdas em função da velocidade para ângulo de avanço de 20°.	123
Figura 45	Mapa de eficiência.....	124
Figura 46	Parâmetros gerais do motor.....	124
Figura 47	<i>Cogging</i> torque.	125
Figura 48	Torque na velocidade nominal em função do ângulo de avanço.	126
Figura 49	Potência na entrada do motor em função do ângulo de avanço.	127
Figura 50	Torque eletromagnético em função da velocidade.....	128
Figura 51	Torque e velocidade de rotação para a prova de aceleração.	128
Figura 52	Torque e velocidade de rotação para a prova de <i>skid pad</i> .	129
Figura 53	Torque e velocidade de rotação para a prova de <i>autocross</i> .	129
Figura 54	Densidade de fluxo magnético no motor.....	130
Figura 55	Predição de desmagnetização dos ímãs permanentes....	131

Figura 56 Simulação térmica para a prova de <i>autocross</i> (ímãs inteiros).....	133
Figura 57 Simulação térmica para a prova de <i>autocross</i>	133
Figura 58 Simulação térmica para a prova de <i>enduro</i>	134
Figura 59 Simulação térmica para a prova de <i>skid pad</i>	135
Figura 60 Simulação térmica para a prova de aceleração.....	136
Figura 61 Detalhe da distribuição de bobinagem.....	137
Figura 62 Vista explodida do estator, rotor e ímãs.....	138
Figura 63 Vista da montagem do estator e rotor.....	138
Figura 64 Vista em corte direito do motor.....	139
Figura 65 Vista isométrica da montagem do motor.....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Comparação entre as diferentes tecnologias de VEs.....	41
Tabela 2	Comparação entre as diferentes tecnologias de motores.	50
Tabela 3	Coefficientes de atrito de rolamento.....	61
Tabela 4	Melhores tempos registrados nas provas dinâmicas da competição Fórmula SAE Brasil em 2017.....	69
Tabela 5	Relações de transmissão para $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 20kW$	71
Tabela 6	Desempenhos para $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 20kW$	72
Tabela 7	Relações de transmissão para $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 25kW$	73
Tabela 8	Desempenhos para $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 25kW$	73
Tabela 9	Relações de transmissão para $T_{em} = 25Nm$ e $P_e = 20kW$	74
Tabela 10	Desempenhos para $T_{em} = 25Nm$ e $P_e = 20kW$	75
Tabela 11	Relações de transmissão para $T_{em} = 25Nm$ e $P_e = 25kW$	76
Tabela 12	Desempenhos para $T_{em} = 25Nm$ e $P_e = 25kW$	76
Tabela 13	Características do sistema de tração ideal.....	77
Tabela 14	Variáveis primárias do modelo analítico.....	88
Tabela 15	Limites máximos e mínimos das variáveis primárias....	111
Tabela 16	Parâmetros do otimizador.	112
Tabela 17	Resultados obtidos a partir da otimização (parte 1)....	115
Tabela 18	Resultados obtidos a partir da otimização (parte 2)....	115
Tabela 19	Comparação entre resultados do Matlab e MotorSolve..	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmo Genético
AC	<i>Alternating Current</i>
BA	<i>Bees Algorithm</i>
BLAC	Motor <i>Brushless</i> AC de Ímãs Permanentes
DC	<i>Direct Current</i>
ECPA	Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo
EF	Elementos Finitos
FCV	Veículo à Célula de Combustível
MAS	Motores Assíncrnos
MRV	Motores à Relitância Variável
PSO	<i>Particle Swarm Optimisation</i>
rpm	Rotações por Minuto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VE	Veículo Elétrico
VH	Veículo Híbrido

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo de abertura da ranhura
α_{Br}	Coefficiente de reversão ímãs
α_c	Coefficiente 1 de perda no núcleo
α_p	Coefficiente de abertura dos ímãs
β	Coefficiente 2 de perda no núcleo
ϵ_{accel}	Erro de incremento do acelerador
ϵ_{dist}	Erro na distância de frenagem
ϵ_{fren}	Erro de frenagem
η_{mot}	Eficiência do motor
η_{trans}	Eficiência da transmissão
θ	Passo do polo magnético
λ_{sl}	Coefficiente de dispersão nas ranhuras
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
μ_m	Permeabilidade relativa dos ímãs
ρ_{cu}	Resistividade do cobre
τ_c	Passo do enrolamento
Ac	Aceleração do veículo
Acd	Incremento do acelerador
A_{cu}	Área de cobre em uma ranhura
Ac_{lat}	Aceleração lateral do veículo
A_{front}	Área frontal do veículo
A_g	Área no entreferro sub um polo
A_s	Área da ranhura
A_{wire}	Área do condutor
B_g	Densidade de fluxo no entreferro
$B_{g(1)}$	Amplitude do primeiro harmônico fluxo no entreferro
Bit	Bitola do veículo
B_k	Densi. de fluxo onde o vetor de polarização magnética colapsa
B_{knee}	Densidade de fluxo imposta
B_m	Densidade de fluxo nos ímãs
B_{max}	Máxima densidade de fluxo admitida no núcleo de ferro
B_r	Indução remanente na temperatura de operação

B_{r20}	Indução remanente a 20°C
B_{s0}	Abertura da ranhura
B_{s1}	Largura 1 da ranhura
B_{s2}	Largura 2 da ranhura
C_{ar}	Coefficiente de arrasto aerodinâmico
C_{rol}	Coefficiente de rolamento
D	Diâmetro interno do estator
D_{ac}	Desaceleração do veículo em frenagens
D_{mag}	Diâmetro externo dos ímãs
D_{seg}	Distância de segmento de pista
D_{vei}	Posição do veículo no segmento de pista
e	Número de locais de elite selecionados
E	Força eletromotriz
E_0	Força eletromotriz desconsiderando N_{ph}
f	Frequência
F_{ar}	Força de arrasto do veículo
F_{est}	Força de esterçamento
F_{freio}	Força do freio
f_{LKG}	Coefficiente de dispersão do fluxo no entreferro
F_{roda}	Força na roda do veículo
g	Entreferro
g'	Entreferro equivalente 1
g_{eq}	Entreferro equivalente 2
GR	Relação de redução da transmissão
gv	Aceleração da gravidade
h_{CG}	Altura do centro de gravidade do veículo
h_m	Espessura dos ímãs
$hm1$	Dimensão 1 do ímã
hmt	Dimensão 2 do ímã
$hm2$	Dimensão 3 do ímã
H_s	Comprimento total da ranhura
H_{s0}	Comprimento 1 da ranhura
H_{s1}	Comprimento 2 da ranhura
H_{s2}	Comprimento 3 da ranhura

I_{demag}	Corrente de desmagnetização
I_{LR}	Corrente de rotor travado
I_{ph}	Corrente de fase
I_{ph0}	Corrente de uma fase desconsiderando N_{ph}
J	Densidade de corrente
J_{cubo}	Inércia do cubo de roda
J_{motor}	Inércia do motor
J_{roda}	Inércia da roda
J_{se}	Inércia do semi-eixo de transmissão
J_{tot}	Inércia do conjunto de componentes do veículo
J_{trans}	Inércia da transmissão
k_c	Coefficiente de Carter
k_{ds}	Fator de concentração no dente
k_e	Coefficiente de corrente de <i>Foucault</i>
k_{fill}	Fator de preenchimento da ranhura (<i>fill factor</i>)
k_h	Coefficiente de histerese
k_s	Fator de empilhamento de laminação
k_w	Fator de enrolamento
l	Entre eixos do veículo
L	Comprimento do pacote
L_{ew}	Indutância de cabeça de bobina
L_s	Indutância síncrona
L_{sg}	Indutância de entreferro
L_{sl}	Indutância de dispersão de ranhura
L_{wire}	Comprimento do condutor
m	Número de locais selecionados
$Mass$	Massa do conjunto carro e piloto
MF_{ar}	Força magnetomotriz produzida na armadura
m_{fr}	Máxima força nas rodas antes de se perder a tração
n	Número de abelhas <i>scout</i>
nep	Número de abelhas para locais de elite
ngh	Tamanho da vizinhança no BA
nsp	Número de abelhas para locais de não-elite
N_{mot}	Número de motores

N_m	Número de ranhuras
N_p	Número de polos
Out	Resultado da função objetivo
Pe_{ac}	Posição do pedal do acelerador
P_{atm}	Potência volumétrica
P_{core}	Perdas no núcleo de ferro
P_{cu}	Perdas no cobre
P_e	Potência eletromagnética
Pen	Penalidades atribuídas ao projeto
P_{fric}	Perdas de atrito no rolamento
P_{FS}	Potência instantânea limite da Fórmula SAE
P_{vol}	Potência volumétrica
P_{wind}	Perdas de atrito no ar
q	Número de ranhuras sobre número de fases e polos
RD	Raio dinâmico
R_{ebi}	Coroa do rotor
R_{in}	Raio interno do rotor
R_m	Raio externo dos ímãs
R_{ph}	Resistência de fase
rpm_m	Rotação máxima do motor
R_{roda}	Raio da roda do veículo
R_{rol}	Resistência ao rolamento
S_{ebi}	Coroa do estator
S_{OD}	Diâmetro externo do estator
T_{ar}	Temperatura do ar
T_{amb}	Temperatura ambiente
T_e	Torque eletromagnético
T_{em}	Torque eletromagnético máximo
T_{op}	Temperatura de operação da máquina
T_w	Espessura do dente
u	Coefficiente de atrito
V_{dc}	Tensão nominal do banco de baterias
Vel	Velocidade do veículo
Vel_m	Velocidade máxima do veículo

Vol	Volume da máquina
V_t	Tensão RMS na entrada da máquina
W_m	Comprimento da base do ímã
W_{mag}	Peso dos ímãs
Wt_{core}	Peso do núcleo de ferro
W_{tot}	Peso da máquina
Wt_{Rebi}	Peso da coroa do rotor
Wt_{Sebi}	Peso da coroa do estator
Wt_{Tw}	Peso dos dentes do estator
x_{CG}	Distribuição de massa do veículo
X_s	Reatância síncrona
X_{s0}	Reatância síncrona desconsiderando N_{ph}

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	OBJETIVOS	33
1.1.1	Objetivo Geral	33
1.1.2	Objetivos Específicos	33
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	33
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1	O VEÍCULO ELÉTRICO	35
2.1.1	Tecnologia híbrida e células de combustível	37
2.2	MOTORES ELÉTRICOS APLICADOS À TRACÇÃO	41
2.2.1	Motores à Indução	44
2.2.2	Motores à Relutância Variável	45
2.2.3	Motores Síncronos <i>Brushless</i>	46
2.2.4	Comparação entre MAS, MRV e BLAC	49
3	MODELAGEM DO VEÍCULO	51
3.1	METODOLOGIA DE ANÁLISE	51
3.1.1	Prova de Aceleração	52
3.1.2	Prova de <i>Skid Pad</i>	52
3.1.3	Prova de <i>Autocross</i>	54
3.1.4	Prova de <i>Enduro</i>	54
3.1.5	Prova de Eficiência Energética	55
3.2	EQUACIONAMENTO DO VEÍCULO	56
3.2.1	Definição de Constantes	56
3.2.2	Parâmetros do Piloto	57
3.2.3	Constantes do Carro	58
3.2.4	Cálculo da Dinâmica	62
3.3	SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DO VEÍCULO	69
3.3.1	Simulação para $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 20kW$	70
3.3.2	Simulação para $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 25kW$	72
3.3.3	Simulação para $T_{em} = 25Nm$ e $P_e = 20kW$	73
3.3.4	Simulação para $T_{em} = 25Nm$ e $P_e = 25kW$	75
3.4	CARACTERÍSTICAS DA MÁQUINA IDEAL	76
4	MODELO ANALÍTICO DO MOTOR	79
4.1	METODOLOGIA DE ANÁLISE	80
4.2	SELEÇÃO DE PARÂMETROS	82
4.2.1	Número de Ranhuras por Polo	82
4.2.2	Formato dos Ímãs	84
4.2.3	Seleção de Materiais	86

4.3	MODELO ANALÍTICO COM VARIÁVEIS PRIMÁRIAS	87
4.3.1	Densidade de Fluxo no Entreferro	89
4.3.2	Dimensões dos Ímãs	92
4.3.3	Cálculos dos Parâmetros Elétricos	94
4.4	MODELAGEM DE PERDAS E EFICIÊNCIA	99
4.4.1	Perdas no Cobre	99
4.4.2	Perdas no Núcleo de Ferro	100
4.4.3	Perdas Mecânicas	100
4.5	ANÁLISE TÉRMICA	101
4.6	FUNÇÕES PENALIDADES	102
4.6.1	Campo de Reação de Armadura	102
4.6.2	Saturação do Estator	103
4.6.3	Desmagnetização dos Ímãs	104
4.6.4	Limitação da Temperatura	104
4.6.5	Limitação do Custo	105
4.7	FUNÇÃO OBJETIVO	105
5	OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DO MOTOR	107
5.1	ALGORÍTIMO DE OTIMIZAÇÃO	107
5.1.1	Bees Algorithm	108
5.1.2	Escolha dos Parâmetros do Otimizador	110
5.2	RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO	112
6	SIMULAÇÃO EM <i>SOFTWARE</i> DE EF	117
6.1	MEDIÇÕES GERAIS	118
6.2	MEDIÇÕES DE TORQUE	125
6.2.1	<i>Cogging</i> Torque	125
6.2.2	Ângulo de Avanço	126
6.2.3	Torque em Função da Velocidade	127
6.3	DENSIDADE DE FLUXO	130
6.4	PREDIÇÃO DE DESMAGNETIZAÇÃO	131
6.5	SIMULAÇÃO TÉRMICA	132
6.5.1	Simulação Térmica - <i>Autocross</i>	132
6.5.2	Simulação Térmica - <i>Enduro</i>	133
6.5.3	Simulação Térmica - <i>Skid Pad</i>	134
6.5.4	Simulação Térmica - Aceleração	135
7	FABRICAÇÃO DO PROTÓTIPO	137
8	CONCLUSÃO	141
	REFERÊNCIAS	143
	APÊNDICE A – Cálculo do Número de Espiras	149
	APÊNDICE B – Desenhos Técnicos do Motor	153
	ANEXO A – Modelo Analítico da Máquina	161
	ANEXO B – Algoritmo de Otimização	169

1 INTRODUÇÃO

Os veículos elétricos estão se tornando uma alternativa promissora para remediar a poluição do ar urbano, a emissão de gases do efeito estufa e o esgotamento dos combustíveis fósseis. Isso se dá pelo fato de utilizarem eletricidade como fonte central de potência. É bem conhecido que a geração de energia em usinas centralizadas é muito mais eficiente e suas emissões podem ser controladas muito mais facilmente do que aquelas emitidas por motores de combustão interna espalhados por todo o mundo.

Todos os benefícios dos veículos elétricos estão começando a justificar a atenção da indústria, da academia e dos formuladores de políticas públicas como alternativas promissoras para o transporte urbano. Atualmente, a indústria e a academia estão se esforçando para superar as barreiras desafiadoras que bloqueiam o uso generalizado de veículos elétricos. Vida útil, densidade de energia, densidade de potência, peso e custo das baterias são as principais barreiras a serem superadas (SOYLU, 2011). No entanto, modelagem e otimização de outros componentes de veículos elétricos também são tão importantes quanto e têm fortes impactos sobre a eficiência, dirigibilidade e segurança dos veículos. Nesse sentido, há uma crescente demanda por conhecimento para modelar e otimizar os veículos elétricos.

Um dos meios de fomentar, nos estudantes, o estudo em veículos elétricos é através de programas estudantis. Um destes programas com maior repercussão mundial é o realizado pela *Society of Automotive Engineers* (SAE), sendo ele a Fórmula SAE. Esse evento existe em todos os continentes, sendo realizado inclusive no Brasil. Trata-se de uma competição de engenharia que conta tanto com a análise de qualidade e nível técnico dos projetos, quanto com o seu desempenho em provas dinâmicas. Nele os estudantes devem seguir um conjunto de normas (SAE INTERNATIONAL, 2018) a fim de projetar e construir um veículo elétrico, monoposto, de alto desempenho, estilo fórmula.

A partir dessas premissas, estudantes, principalmente, dos cursos de engenharia elétrica, mecânica e de produção se uniram e formaram a equipe *Ampera Racing*, a fim de participar da competição Fórmula SAE Brasil. Tendo em vista os requisitos que o evento exige da equipe, notou-se a oportunidade de desenvolver-se um motor específico para a aplicação em questão. Dessa forma, aglutinando a vontade da equipe em melhorar o desempenho do carro e aumentar a quantidade de projetos de autoria própria, com a necessidade de desenvolver um trabalho

de conclusão de curso e aprimorar os conhecimentos nessa área, optou-se em fazer o projeto de um motor elétrico com o intuito de utilizá-lo para tracionar o protótipo da equipe. A Figura 1 ilustra o veículo produzido pela equipe *Ampera Racing* no ano de 2017 e a Figura 2 o grupo de pessoas responsável pelo projeto.

Figura 1 – Automóvel desenvolvido pela equipe *Ampera Racing* no ano de 2017.



Fonte: Autor (2017)

Figura 2 – Equipe *Ampera Racing* no ano de 2017.



Fonte: Autor (2017)

1.1 OBJETIVOS

Pode-se distinguir dois tipos de objetivo neste trabalho: o objetivo geral e os objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

Tem-se como objetivo geral se projetar um motor *brushless*, o qual será acoplado ao cubo de roda do veículo desenvolvido pela equipe de competição *Ampere Racing*, sediada na Universidade Federal de Santa Catarina.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar estudo comparativo entre as principais topologias de motores elétricos para a tração;
- Modelar a dinâmica do veículo de Fórmula SAE e determinar os desempenhos desejadas da motorização;
- Projetar um motor BLAC de forma a otimizar o seu desempenho para a aplicação dada;
- Realizar simulação em softwares de elementos finitos, isso a fim de verificar se os desempenhos atendem aos requisitos da aplicação;

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Tem-se que a estruturação desse trabalho é fundamentada em 6 etapas. Sendo assim, cada uma dessas etapas é abordada em uma dos capítulos desse trabalho.

Portanto, seguindo os objetivos específicos desse trabalho, além de abordar o conceito de veículo elétrico, tem-se em um primeiro capítulo a realização de um estudo comparativo entre as principais máquinas utilizadas para a tração elétrica. Com isso, expõe-se algumas das características de cada máquina e justifica-se a escolha de determinada topologia de motor a ser implementada.

Em um segundo capítulo, realiza-se a modelagem dinâmica do veículo e, com isso, executa-se a simulação do desempenho desejado

do veículo em todas as quatro provas exigidas na competição Formula SAE Brasil. Tendo realizado essa simulação, pode-se expressar valores de torque, velocidade de rotação e potência que os motores devem contemplar para obter o melhor resultado possível nas provas dinâmicas do evento.

Após levantar as principais características da máquina, um terceiro capítulo visa descrever o modelo analítico de um motor BLAC baseados nessas características requeridas. Dessa forma, serão apresentadas as equações do modelo analítico da máquina, bem como a sua modelagem em Matlab®.

Em seguida, um quarto capítulo contempla a otimização e simulações implementadas para se obter os melhores custos benefícios de maneira a melhorar o desempenho da máquina de acordo com alguns critérios pré-selecionados.

Em um quinto capítulo, o foco será validar a modelagem realizada no capítulo precedente. Portanto, utiliza-se o *software* de simulação de máquinas por elementos finitos MotorSolve®. Nele insere-se as características físicas do motor obtidas após a otimização e simula-se o seu funcionamento no veículo, ou seja, introduzindo curvas de torque resistivo e velocidades obtidas anteriormente. Desta forma, pode-se observar se o motor atende aos requisitos desejados.

Por fim, um sexto capítulo é apresentado de maneira a abordar a fabricação do protótipo da máquina a ser realizada. A fabricação ocorrerá em conjunto com a empresa *Hercules Motores*, a qual se disponibilizou em realizar esta parceria com a equipe *Ampera Racing*.

Tendo realizado todas as etapas descritas acima, pode-se validar o método de projeto e de otimização utilizado e a equipe será a primeira a desenvolver um motor específico para veículos de Fórmula SAE no Brasil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fim de se obter o embasamento teórico necessários para o desenvolvimento desse trabalho, utilizou-se livros, dissertações e teses como referência. Contudo, também se fez uso de alguns artigos para auxiliar em dúvidas pontuais.

2.1 O VEÍCULO ELÉTRICO

A história dos veículos elétricos (VE) teve início na Europa no início do século XIX. Tem-se que, após a invenção da bateria por Volta em 1800 e a primeira demonstração do motor elétrico em 1821 por Faraday, o primeiro VE acabou sendo construído em 1834 na cidade de Brandon, na Grã Bretanha, por um mecânico chamado Thomas Davenport. Tratava-se de um pequeno automóvel utilizando baterias não recarregáveis (MESTER, 2007).

Mais tarde, em 1859 o francês Gaston Planté inventou a bateria de chumbo ácido recarregável (Agence Internationale de l'Energie, 1994) e em 1869 Zénobe Gramme construiu o primeiro motor elétrico a corrente contínua contando com uma potência maior que um cavalo (MESTER, 2007). Assim, o primeiro VE a contar com baterias recarregáveis foi desenvolvido em 1874 por Sir David Salomons (CHAN; CHAU, 2001). Alguns anos mais tarde, os alemães Daimler e Benz inventaram o primeiro veículo à combustão interna.

Contudo, estes primeiros veículos não agradaram muito ao público devido a sua tecnologia ainda limitada, não podendo competir com os veículos movidos à tração animal. Por outro lado, a situação mudou rapidamente e nos anos que seguiram os veículos, que não contavam com tração animal, começaram a se tornar atrativos, podendo-se destacar os veículos elétricos que rivalizavam com os veículos térmicos. Por exemplo, no ano de 1900 nos EUA, existiam 1575 veículos elétricos, 1684 veículos a vapor e 936 veículos à combustão interna (Agence Internationale de l'Energie, 1994).

No início do século passado, os VE eram mais atrativos que os a combustão interna. Visto que, eram mais confiáveis e davam a partida instantaneamente, ao contrário dos seus concorrentes que eram pouco confiáveis, mal cheirosos e precisavam ser acionados manualmente para arrancar. Sendo assim, carros particulares, embora raros, eram muito propensos a serem elétricos, assim como outros veículos, como táxis

(LARMINIE; LOWRY, 2003). Um táxi elétrico em Nova York no ano de 1901, é ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Táxi Elétrico em 1901.



Fonte: (LARMINIE; LOWRY, 2003)

Apesar da promissora ascensão que os veículos elétricos possuíam no início do século XX, fatores como a diminuição do preço dos combustíveis e a invenção, em 1911, do arranque automático para os veículos a combustão interna, fizeram com que os automóveis elétricos começassem a perder espaço no mercado (LARMINIE; LOWRY, 2003).

O grande tempo despendido para recargar as baterias, se comparado ao tempo para encher o tanque de um veículo à combustão, e a diferença da energia armazenada por quilograma, também são fatores que contribuíram para o advento dos veículos a combustão interna. Pois, devido à limitada densidade de potência que as baterias da época eram capazes de armazenar, para uma autonomia razoável, a massa de baterias no automóvel deveria ser extremamente grande se comparada à massa de gasolina para a mesma autonomia (LARMINIE; LOWRY, 2003).

Sabe-se que a densidade de energia da gasolina gira em torno de 13000 Wh.kg^{-1} , considerando a eficiência de 20% dos motores a combustão interna, temos uma densidade de energia disponível equivalente a 2600 Wh.kg^{-1} . Já para baterias de chumbo ácido, a densidade de energia gira em torno de 30 Wh.kg^{-1} , considerando a eficiência média

de 90% dos motores elétricos tem-se uma densidade de $27 Wh.kg^{-1}$ (BECK, 2018). Considerando que 4,5 L de gasolina pesam em torno de 4 Kg e, em um veículo convencional, proporciona uma autonomia de cerca de 50Km. Tendo em vista a diferença de densidade de energia citada acima, para a mesma autonomia de 50 Km, precisaríamos de cerca de 385 Kg de baterias. Fato que, além do custo elevado das baterias, diminui muito o desempenho do veículo.

Hoje, os VE estão entrando no seu terceiro século e vêm se tornando um produto comercialmente disponível e, como tal, tem sido muito bem sucedido, de maneira a superar muitas outras ideias técnicas que vieram e se foram. Fatores como as preocupações com o meio ambiente, particularmente as emissões de ruído e emissão de gases poluentes como o CO_2 , associados aos novos desenvolvimentos em baterias e células de combustível, podem fazer a balança retroceder em favor dos veículos elétricos (SOYLU, 2011). Além das questões ambientais, outro fator que está alavancando a venda de VE é a crescente evolução tecnológica de baterias, já que hoje existem baterias de lítio íon, as quais chegam a uma densidade de energia de $240 Wh.kg^{-1}$, ou seja, 8 vezes a densidade da bateria de chumbo ácido (BECK, 2018).

Sendo assim, os veículos elétricos estão sendo vistos como os carros do futuro, isso devido a sua alta eficiência, alto desempenho, não produzirem poluição local, serem silenciosos e poderem ser utilizados em *smart grids* para a regulação da rede (MESTER, 2007). Entretanto, mesmo com a melhora tecnológica das baterias, ainda existem alguns fatores críticos, os quais precisam ser resolvidos. Podemos destacar três destes fatores: a autonomia limitada; o longo tempo de recarga; e o alto custo da tecnologia envolvida (SOYLU, 2011).

2.1.1 Tecnologia híbrida e células de combustível

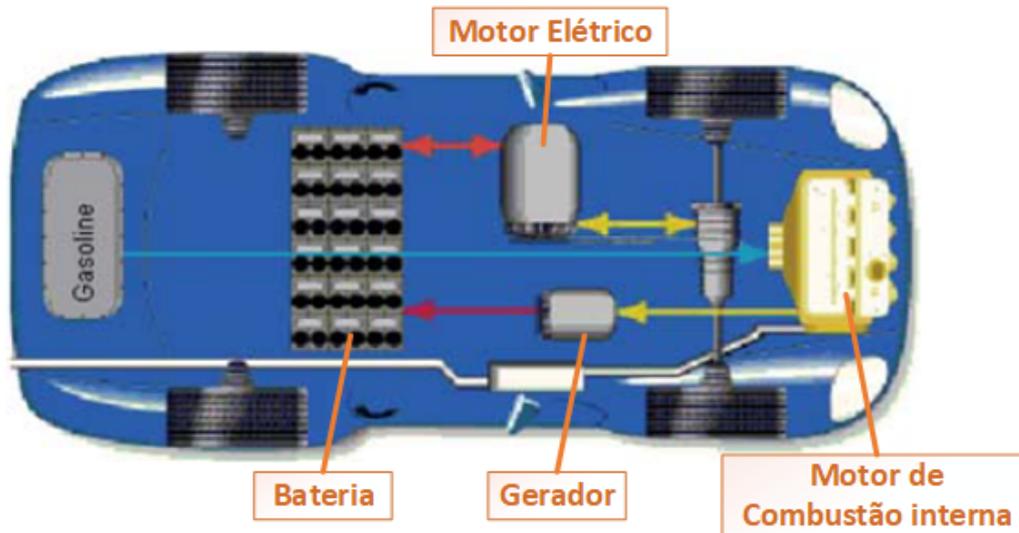
Como pode-se observar na seção anterior, os veículos elétricos ainda possuem algumas limitações, as quais lhes impossibilitam de se consagrar no mercado. Contudo, no século passado surgiram algumas adaptações dos VE que estão ganhando destaque hoje, agindo de maneira a viabilizar a aceitação desta tecnologia ao público, são elas: os veículos híbridos (VH) e os veículos à célula de combustível, do inglês *fuel cell vehicles* (FCV).

Comparado com os veículos convencionais, os VHs possuem maior eficiência em relação ao consumo de combustível, isso devido a recuperação de energia cinética durante as frenagens do automóvel e,

também possuem um desempenho melhor, devido ao seu sistema de tração combinando motores elétricos e a combustão. O VH pode ser independente de uma rede externa para alimentar as baterias embarcadas ou pode ser do tipo *plug-in*. Estes últimos podem ser operados somente no modo elétrico e possuir uma autonomia que atinja de 30 km até 120 km neste modo. Desta forma, os VH do tipo *plug-in* podem ser recarregados durante a noite utilizando energia de fontes renováveis (CHAN, 2007).

Dentre os veículos híbridos, podem-se destacar os VH série e os VH paralelo. No caso dos VHs série, a potência mecânica é convertida em eletricidade utilizando um gerador, o qual pode recarregar um banco de baterias ou, até mesmo, utilizar esta energia diretamente para alimentar um motor elétrico que irá impulsionar o automóvel. Dessa forma, pode-se auxiliar o motor a combustão tradicional e estender a autonomia do veículo (CHAN, 2007). Na Figura 4, tem-se a ilustração da configuração do sistema de tração de um VH série.

Figura 4 – Componentes de um VH série.



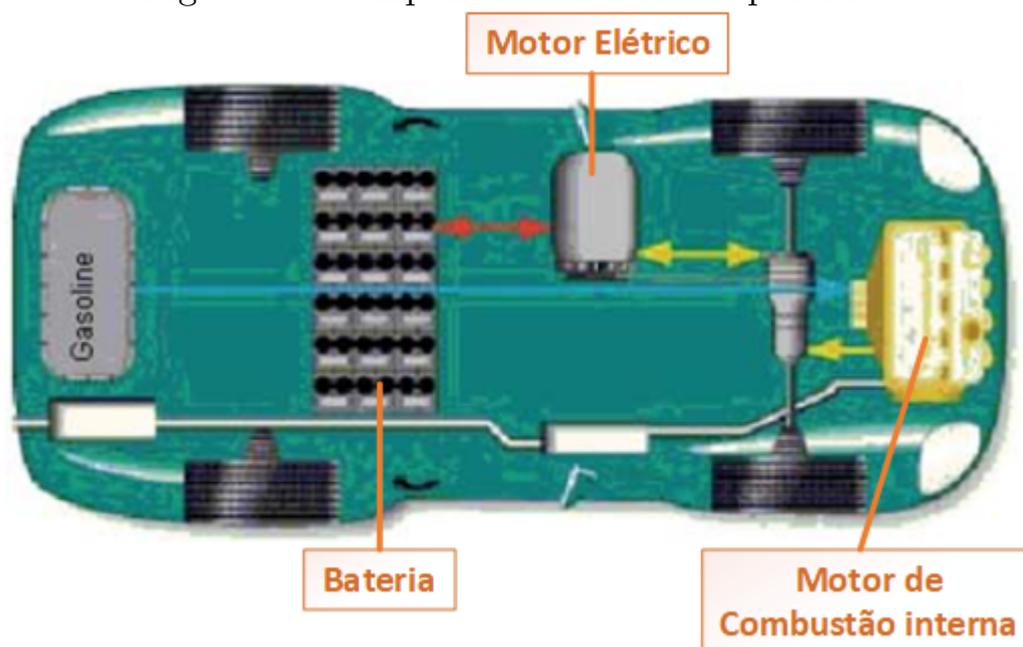
Fonte: Adaptado de (CHAN, 2007)

Como desvantagem do sistema acima, tem-se que são necessários três dispositivos de propulsão. Sendo eles o gerador, o motor elétrico e o motor de combustão interna, o que faz a eficiência dos VH série, normalmente, ser menor que os VH paralelo. Diferentemente do híbrido em série, o VH paralelo permite que tanto o motor de combustão interna, quanto o motor elétrico forneçam energia em paralelo para acionar as rodas. Uma vez que os dois motores são geralmente acoplados ao eixo de acionamento das rodas através de duas embreagens, a potência de

propulsão pode ser suprida somente pelo motor de combustão interna, pelo motor elétrico ou por ambos. Conceitualmente, trata-se de um automóvel convencional assistido eletricamente para alcançar emissões e consumo de combustível mais baixos. O motor elétrico pode ser usado como um gerador para carregar a bateria por frenagem regenerativa ou pela absorção de energia do motor de combustão interna quando sua saída é maior do que a necessária para acionar as rodas (CHAN, 2007).

Como vantagens do VH paralelo em relação ao híbrido sério, tem-se que ele precisa apenas de dois dispositivos de propulsão, sendo eles o motor de combustão interna e o motor elétrico. Além disso, no caso do híbrido paralelo, tanto o motor a combustão quanto o elétrico podem ser menores, pois enquanto a bateria não se esgota, os dois motores trabalham em conjunto se complementando e melhorando o desempenho do automóvel (CHAN, 2007). Na Figura 5, tem-se uma ilustração dos componentes presentes em um VH paralelo.

Figura 5 – Componentes de um VH paralelo.



Fonte: Adaptado de (CHAN, 2007)

Além das configurações dos VH paralelo e série, ainda existem outras variações, como por exemplo, a combinação de ambas. Contudo, o intuito deste texto é outro, sendo assim, limita-se apenas a abordagem dessas duas configurações do VH.

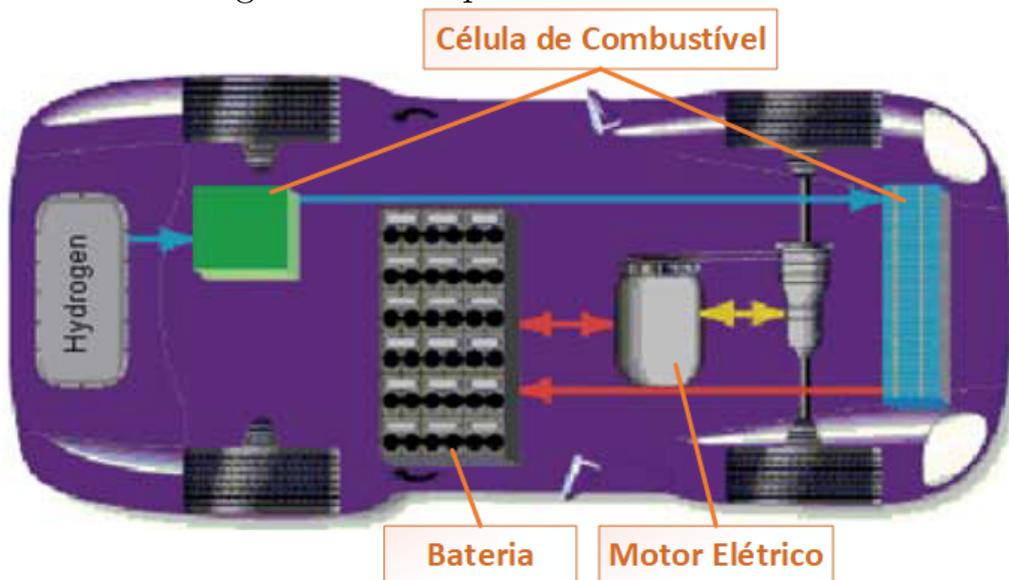
Como o desempenho das baterias está entre os maiores problemas associados aos VE, pesquisadores começaram a estudar soluções que diminuíssem a quantidade de baterias embarcadas no veículo, con-

tudo mantendo o apelo ecológico e sustentável que os veículos elétricos proporcionam. Sendo assim, em 1967 a *General Motors* desenvolveu o primeiro automóvel a utilizar a tecnologia das células de combustível (inventada em 1839 por Sir William Grove) como fonte de energia para alimentar a tração do veículo (CHAN, 2007).

Os FCV contam com a tecnologia das células de combustível que utiliza o hidrogênio para gerar energia elétrica no próprio automóvel. Como a célula de combustível é um novo tipo de dispositivo de energia, o qual é bem diferente da gasolina e das baterias, todo esforço deve garantir que o sistema geral da célula seja eficiente, confiável, ótimo e de longa duração a um custo razoável. Outros dispositivos de alta densidade de potência, como uma bateria de íons de lítio ou um ultracapacitor, podem ser usados em conjunto com a célula de combustível para melhorar o desempenho de partida do veículo. O sistema de propulsão elétrica e o sistema de célula de combustível devem interagir de maneira apropriada para se obter a dirigibilidade adequada com a máxima eficiência energética e emissão mínima (CHAN, 2007).

Os FCV podem ser considerados como VH série, visto que possuem as células de combustível que produzem eletricidade, funcionando como um gerador, que vai alimentar tanto o motor elétrico da tração, quanto armazenar energia nas baterias para uso futuro. Na Figura 6, pode-se observar os componentes presentes em um FCV.

Figura 6 – Componentes em um FCV.



Fonte: Adaptado de (CHAN, 2007)

Na Tabela 1 apresentasse uma comparação entre os veículos elétrico, a híbridos e a célula de combustível. As quais são as confi-

Tabela 1 – Comparação entre as diferentes tecnologias de VEs.

Tipos de VE	VE a Bateria	VH	FCV
Propulsão	- Motor elétrico.	- Motor elétrico; - Motor a combustão interna.	- Motor elétrico.
Sistemas de energia	- Baterias; - Ultra-capacitores.	- Baterias; - Ultra-capacitores; - Combustíveis fósseis.	- Célula de combustível; - Bateria / ultra-capacitor para auxiliar.
Fonte de energia e infraestrutura de recarga	- Rede elétrica.	- Postos de combustível; - Rede elétrica para o caso de plug in.	- Postos de abastecimento a hidrogênio.
Características	- Emissão zero; - Alta eficiência; - Baixa autonomia relativa; - Alto custo inicial; - Comercialmente disponível.	- Baixa emissão; - Alta economia; - Alta autonomia; - Alto custo inicial; - Comercialmente disponível.	- Emissão zero; - Alta eficiência; - Autonomia satisfatória; - Alto custo inicial; - Em desenvolvimento.
Maiores problemas	- Bateria e controle da bateria; - Facilidades no carregamento; - Custo.	- Múltiplas fontes de energia para se controlar, otimizar e gerenciar - Tamanho da bateria e controle.	- Preço da célula de combustível, vida útil e confiabilidade; - Infraestrutura de recarga.

Fonte: Adaptado de (CHAN, 2007)

gurações que utilizam a tração elétrica mais presentes no mercado e foram abordadas no decorrer desta seção.

2.2 MOTORES ELÉTRICOS APLICADOS À TRAÇÃO

Na seção anterior pode-se perceber que a autonomia e quantidade de baterias são fatores cruciais para o advento dos VE. Sendo assim, tem-se por objetivo se conceber os componentes mais eficientes possíveis, em especial o sistema de tração do veículo (*powertrain*).

Os motores elétricos são componentes essenciais no *powertrain* dos VE. Sendo assim, a sua otimização é de extrema importância para que se obtenha o projeto mais eficiente possível, ainda mais tendo em vista que o objetivo desse trabalho é projetar um motor para ser aplicado a um veículo de Fórmula SAE, onde cada quilograma do automóvel têm extrema importância.

Portanto, nessa seção serão abordadas algumas topologias de motores mais comumente aplicados à tração elétrica de alto desempenho, de maneira a apresentar as suas respectivas vantagens e desvantagens. Por fim, justifica-se a escolha de determinado tipo de máquina.

Se pode começar discutindo sobre as máquinas elétricas de alta

rotação, as quais permitem se melhorar os desempenhos da máquina em muitas aplicações (CHEBAK, 2013). Em relação aos sistemas tradicionais, a alta rotação permite melhoras em relação a compactação da máquina, diminuição de massa, confiabilidade e bom rendimento (CHEBAK, 2013). Portanto, as máquinas elétricas são menores, mais performantes e apresentam uma densidade de potência maior.

Tem-se que em 1995, Reichert e Pasquerella estabeleceram fórmulas analíticas associando o diâmetro dos rotores à sua velocidade de rotação, nas quais levam em consideração algumas limitações, tais como a velocidade periférica; a resistência mecânica do rotor; o aquecimento do rotor; a densidade de potência (REICHERT; PASQUARELLA, 1995). Dessa maneira, eles concluíram que para baixas velocidades (menos que 9 krpm) e altas potências (menor que 30 MW) a utilização de máquinas síncronas, em combinação com inversores de corrente, proporcionam os melhores desempenhos. Já, para o caso de altas rotações (entre 9 e 100 krpm) e baixas potências (menor que 2 MW), a utilização de máquinas assíncronas, alimentada por inversores de corrente, proporcionam os melhores desempenhos (BOUKER, 2016).

Contudo, em 1998, utilizando-se noções de pressão magnética tangencial e o seu limite em função da velocidade de rotação, a tecnologia de máquinas síncronas de alta rotação utilizando ímãs na superfície do rotor começou a ser desenvolvida (CANDERS, 1998). A partir desta pressão, a potência eletromagnética definida pelo tensor de Maxwell pode ser expressa por (2.1):

$$P_e = \sqrt{2} \cdot V_r \cdot H_t \cdot B_{n-max} \cdot \Omega \quad (2.1)$$

Tem-se que, V_r é o volume do rotor; B_{n-max} é o valor máximo da componente nominal da indução magnética no entreferro; H_t é o valor eficaz da componente tangencial do campo magnético, a qual equivale à densidade de corrente linear A_l ; Ω é a velocidade de rotação. Considerando a constante k_D , a qual corresponde à razão entre o raio interno e exterior do estator, temos em (2.2) a potência volumétrica para máquinas elétricas (BOUKER, 2016).

$$P_{vol} = \sqrt{2} \cdot k_D \cdot V_r \cdot H_t \cdot B_{n-max} \cdot \Omega \quad (2.2)$$

Sendo assim, através das equações acima, percebe-se que para aumentar a potência volumétrica em uma máquina elétrica podemos adotar alguma das seguintes medidas:

- Aumentar a indução máxima no entreferro, o que para máquinas de ímãs significa utilizar materiais magnéticos com maior indução

remanente e melhor qualidade;

- Aumentar a velocidade de rotação, a qual se vê limitada por esforços centrípetos no rotor e velocidade de ressonância;
- Aumentar a corrente linear, a qual se vê limitada pelo sistema de resfriamento escolhido e da classe de isolante.

Como pode-se observar, o aumento da velocidade de rotação é uma das possibilidades de se aumentar a densidade de potência das máquinas elétricas e, dessa forma, se conceber o sistema mais compacto possível. Característica que é essencial em nosso caso, visto que, temos por objetivo embutir os motores no cubo de roda do veículo.

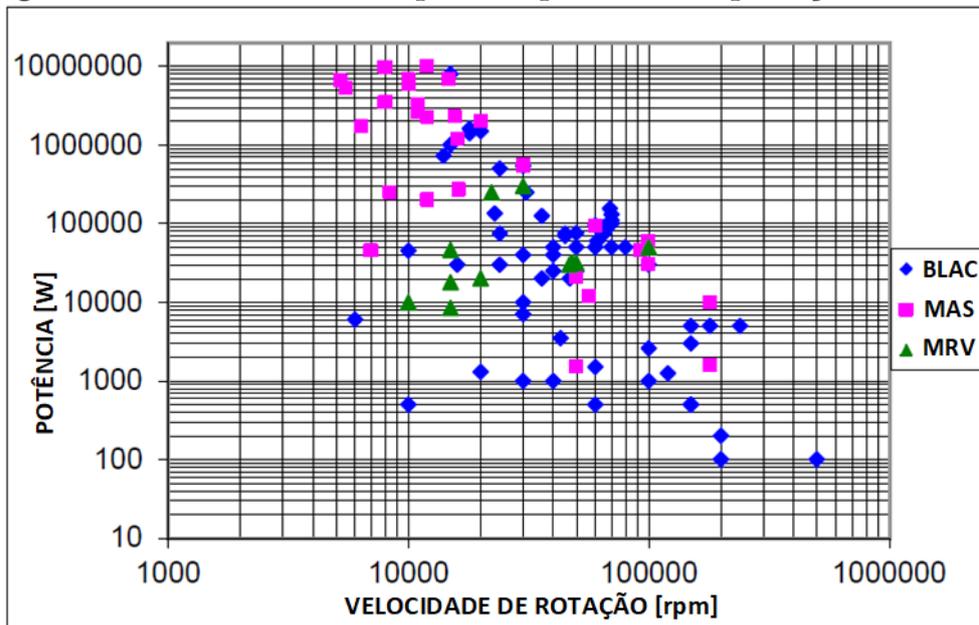
Por outro lado, ao aumentar-se a velocidade de rotação, tem-se um aumento das perdas de fricção e das perdas induzidas por correntes de *Foucault* no ferro e nos ímãs (para o caso dos BLAC). Com isso, se demonstra necessário um projeto bem elaborado e a utilização de bons materiais para se diminuir o impacto dessas perdas inconvenientes (BOUKER, 2016).

Muitas topologias de máquinas elétricas podem ser utilizadas para a aplicação em alta velocidade. A escolha de determinada máquina é difícil e depende das especificações do sistema dado. Geralmente, a máquina preferida é aquela que assegura uma alta densidade de potência, baixas perdas, uma boa resistência do rotor e uma construção simples (CHEBAK, 2013).

Analisando a literatura, percebe-se que as máquinas de alta rotação mais utilizadas no mercado são as de ímãs permanentes (BLDC ou BLAC); as máquinas assíncronas (MAS); e as máquinas a relutância variável (MRV) (RAHMAN; CHIBA; FUKAO, 2004). Normalmente, essas diferentes topologias se aplicam a determinadas especificações de carga, variando de potências de quaisquer W até alguns MW . Na Figura 7, pode-se observar os pontos de funcionamento desses três tipos de máquinas obtidos de publicações científicas e dados de fabricantes:

A máxima potência instantânea drenada pelas baterias é limitada em 80 kW pela SAE (SAE INTERNATIONAL, 2018). Assim, observa-se que para o caso de se realizar um sistema de tração com quatro ou dois motores embutidos no cubo de roda do veículo, tem-se uma potência máxima em torno de 20 kW ou 40 kW por motor e, como aborda-se no capítulo seguinte, a rotação do motor deve ficar em torno de 5 a 15 krpm. Então, ao se analisar o gráfico da Figura 7 pode-se perceber que as três topologias de máquinas citadas acima se encaixam nos requisitos do projeto. Sendo assim, aborda-se os aspectos básicos de cada uma delas e faz-se uma comparação ao final deste capítulo.

Figura 7 – Gráfico contemplando pontos de aplicação de motores.



Fonte: Adaptado de (CHEBAK, 2013)

2.2.1 Motores à Indução

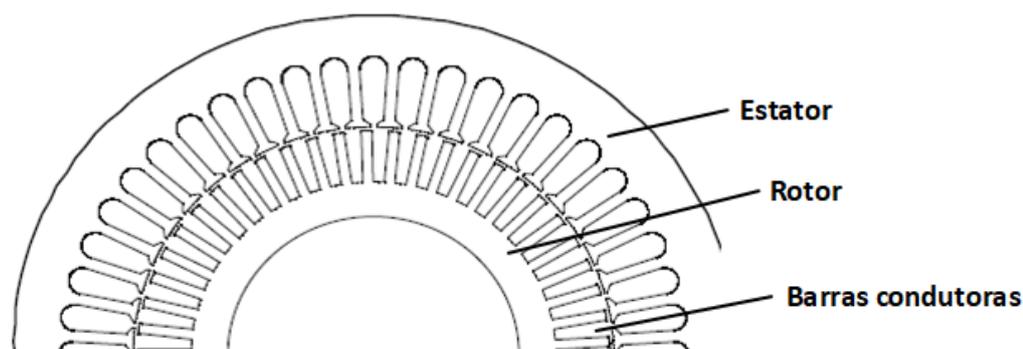
Os motores à indução são muito utilizados em toda a indústria, sendo assim, a sua tecnologia é muito madura (LARMINIE; LOWRY, 2003). Essas máquinas requerem uma alimentação AC e, como em veículos elétricos a fonte primária de energia é do tipo DC, vê-se necessária a utilização de inversores para a realização da alimentação da máquina.

O rotor de uma máquina assíncrona pode ser constituído de lâminas ferromagnéticas e barras condutoras regularmente distribuídas e curto-circuitadas nas extremidades, conhecido como rotor de gaiola. O que torna a sua estrutura muito robusta, de fácil construção e de baixo custo. Considerando a aplicação em alta velocidade de rotação, possuir um rotor robusto como o dessa máquina é muito relevante para se obter bons desempenhos e segurança no funcionamento.

Contudo, comparada com máquinas a ímãs permanentes, as MAS são caracterizadas por possuírem um baixo fator de potência, uma menor densidade de potência e um baixo rendimento devido às perdas no rotor por efeito Joule, as quais aumentam rapidamente com o aumento da velocidade de rotação (CHEBAK, 2013). Porém, estes inconvenientes não impediram que essas máquinas fossem empregadas em diversas aplicações. Por exemplo, os veículos de uma das empresas mais con-

sagradas no mercado mundial de elétricos, a *Tesla Motors*, utilizam a tecnologias das MAS na tração de seus produtos. Na Figura 8, observa-se detalhes da estrutura de uma MAS.

Figura 8 – Detalhes da estrutura de um MAS.



Fonte: Adaptado de (DORRELL; POPESCU; KNIGHT, 2010)

2.2.2 Motores à Relutância Variável

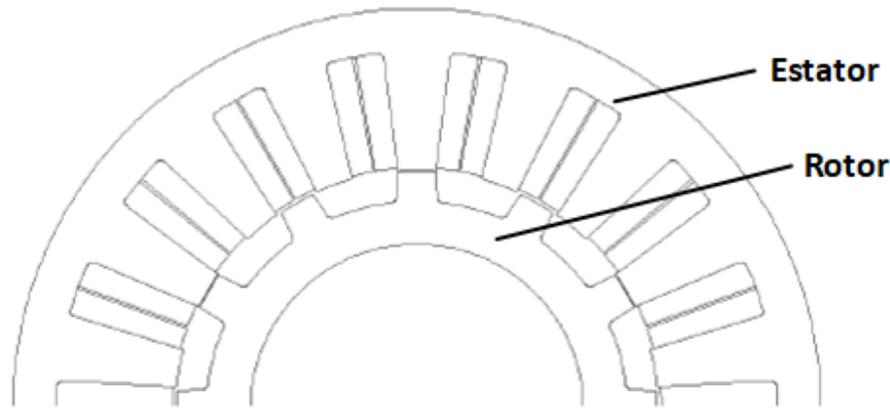
As máquinas à relutância variável também são atrativas para aplicações em alta velocidade, isso graças especialmente a sua robustez, tendo em vista que o seu rotor é muito simples, robusto e econômico em relação aos materiais, dado que é normalmente composto apenas de um material que apresenta saliências a fim de gerar uma variação da relutância no entreferro da máquina. A robustez desta máquina permite o seu funcionamento em condições extremas, podendo suportar, ao nível do rotor, esforços mecânicos e térmicos (temperatura ambiente de 400°) muito elevados (CHEBAK, 2013).

Entretanto, dependendo do modo de alimentação utilizado, os MRV podem absorver potências reativas o que diminui o seu fator de potência e eles são suscetíveis a possuir grandes vibrações de torque eletromagnético. Além disso, as perdas aerodinâmicas em alta rotação podem ser muito significativas devido às saliências no rotor da máquina, fato que a torna menos popular que as máquinas à ímãs permanentes (CHEBAK, 2013). Porém, mesmo assim os MRV são utilizados em muitas aplicações de alta velocidade como nas indústrias aeronáutica e na automotiva (BOUKER, 2016).

O seu princípio de funcionamento é baseado na criação de um torque eletromagnético pela variação da relutância, a qual é vista pela bobina de fase havendo uma posição mínima e uma posição máxima

devido a variação do entreferro criada pela saliência da parte móvel e/ou da parte fixa (BOUKER, 2016). Na Figura 9 observa-se os detalhes da estrutura de um MRV.

Figura 9 – Detalhes da estrutura de um MRV.



Fonte: Adaptado de (DORRELL; POPESCU; KNIGHT, 2010)

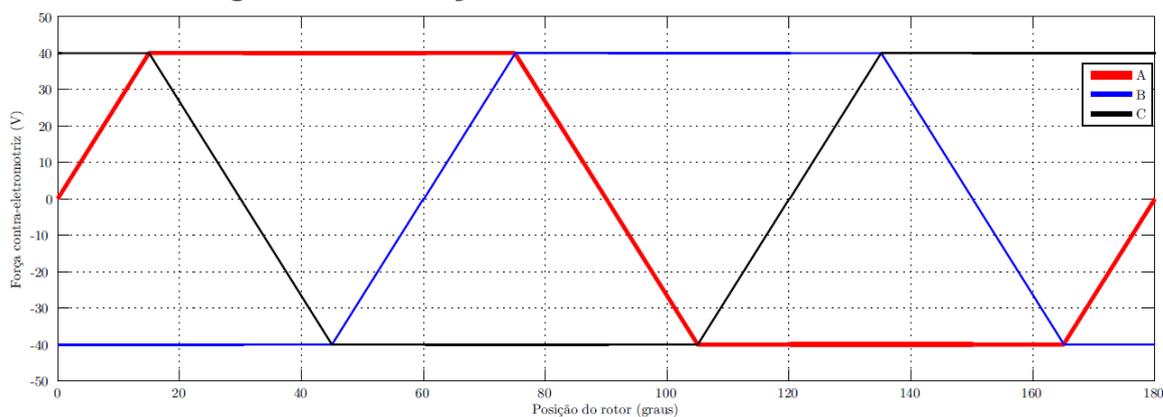
2.2.3 Motores Síncronos *Brushless*

Os motores *brushless* são máquinas síncronas que possuem ímãs no rotor e enrolamentos polifásicos (geralmente trifásicos) de armadura localizados no estator. Eles podem ser classificados em duas categorias dependendo da sua excitação: tem-se os BLDC, os quais possuem uma força eletromotriz trapezoidal e tem-se os BLAC, os quais possuem uma força eletromotriz senoidal. Os dois tem uma construção semelhante, sendo que a diferença entre os dois tipos de máquina esta nos seus controladores e inversores (BRAIWISH, 2016).

Os BLDC possuem um controlador mais simples que alimenta fases de maneira alternada através de uma corrente DC, formando assim, formas de onda retangulares. Desta maneira, a alimentação da máquina é feita através de tensões aplicadas a cada 120° , as quais são limitadas para que a corrente não ultrapasse a capacidade da máquina (ver Figura 10). Já os BLAC possuem uma alimentação através de um inversor que os alimenta diretamente com tensões e correntes senoidais (ver Figura 11), com isso ele possui menos oscilação de torque eletromagnético se comparado aos BLDC (SADOWSKI, 2012).

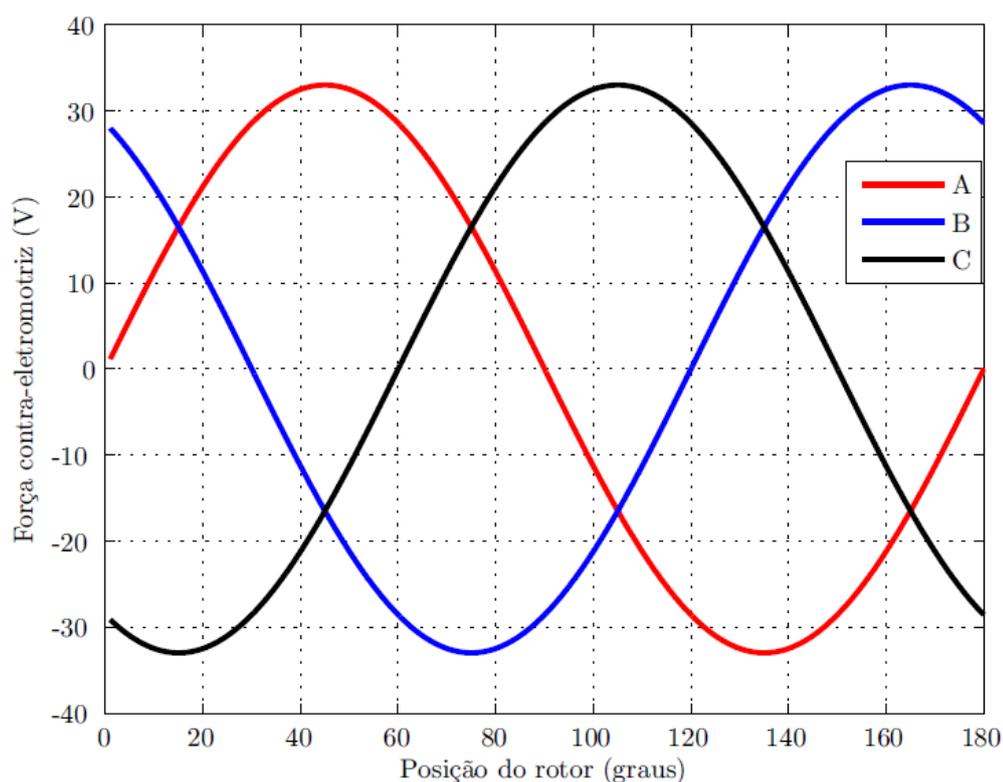
Devido aos seus atrativos como alta densidade de potência, alto fator de potência e um excelente rendimento, as máquinas à ímãs permanentes são as mais interessantes e largamente utilizadas nas aplicações

Figura 10 – Forças eletromotrizes de um BLDC.



Fonte: (SADOWSKI, 2012)

Figura 11 – Forças eletromotrizes de um BLAC.



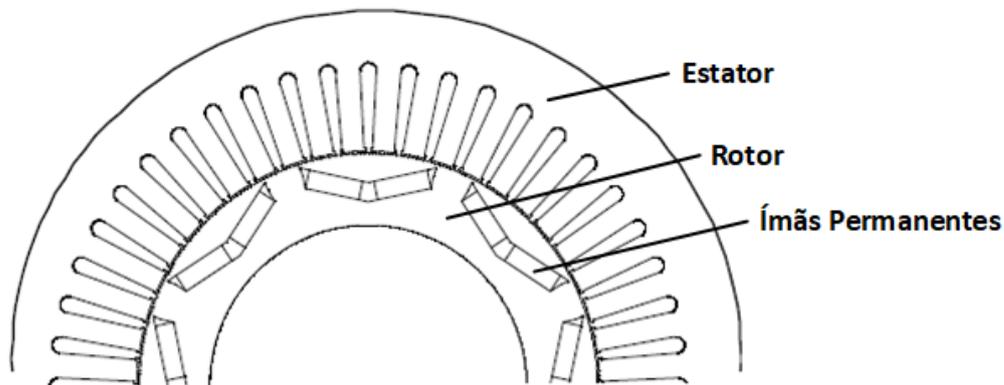
Fonte: (SADOWSKI, 2012)

em alta rotação (CHEBAK, 2013). Entretanto, a construção do rotor utilizando ímãs permanentes gera algumas dificuldades particulares ao nível mecânico, como o risco dos ímãs se soltarem do rotor devido ao estresse gerado pelas forças centrífugas. Outro inconveniente dos motores *brushless* à ímãs permanentes é dado pela possibilidade de desmagnetização dos ímãs, o qual pode ser acentuado pela elevação

da temperatura devido às correntes de *Foucault* geradas nos ímãs que, geralmente, são condutores (caso do NdFeB). Com isso, ímãs menos sensíveis a temperatura são necessários, o que faz o preço do conjunto aumentar (CHEBAK, 2013).

Apesar destes inconvenientes, a máquina à ímãs permanentes continua muito atrativa no domínio da alta velocidade, visto que: o custo dos ímãs pode ser compensado pelo bom rendimento da máquina; a desmagnetização pode ser evitada por um projeto adequado e, eventualmente, utilizando um método de resfriamento no rotor; a fixação dos ímãs ao rotor pode ser assegurada ou pela inserção dos mesmos na estrutura (ímãs enterrados) ou os colando na superfície de rotor ou até mesmo através de cintas mecânicas (CHEBAK, 2013). Na Figura 12, pode-se observar os detalhes da estrutura de um motor do tipo *brushless*.

Figura 12 – Detalhes da estrutura de um BLAC/BLDC com ímãs enterrados.

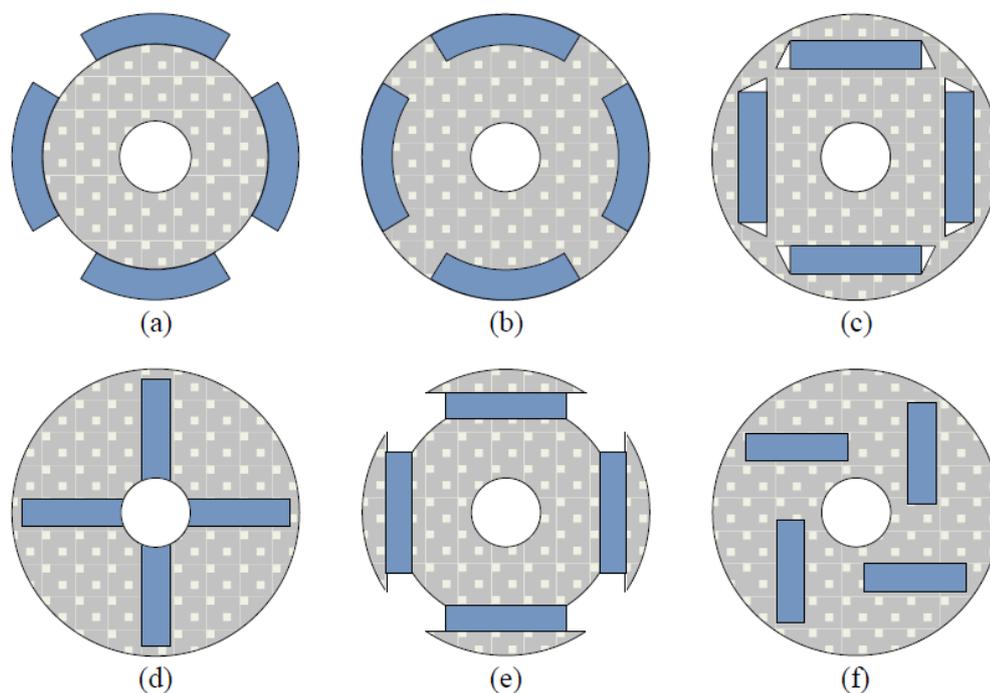


Fonte: Adaptado de (DORRELL; POPESCU; KNIGHT, 2010)

Diferentes tipos de estruturas podem ser implementadas em motores *brushless*, sendo que, elas podem se diferir pelas topologias do estator (com ou sem ranhuras), do rotor (interno ou externo, com polos lisos ou salientes) e pela disposição dos ímãs no circuito magnético. Na Figura 13, observa-se algumas destas topologias dadas em (CHEBAK, 2013), as quais podem ser descritas por:

- (a) Rotor com ímãs montados em superfície;
- (b) Rotor com ímãs inseridos;
- (c) Rotor com ímãs radialmente enterrados;
- (d) Rotor com ímãs enterrados e concentração de fluxo;

Figura 13 – Disposição de ímãs em motores *brushless*.



Fonte: (CHEBAK, 2013)

- (e) Rotor com ímãs cobertos por peças polares;
- (f) Rotor com ímãs enterrados e distribuição assimétrica.

Cada uma das configurações acima possui as suas vantagens e desvantagens em relação as outras, sendo que cabe ao projetista escolher a estrutura que se adapte melhor ao seu projeto.

2.2.4 Comparação entre MAS, MRV e BLAC

Na Tabela 2 apresenta-se um comparativo abordando algumas vantagens e desvantagens das máquinas estudadas nas seções anteriores. Através dessa síntese e dos estudos realizados, pode-se escolher o tipo de motor ideal para o projeto em questão.

Como o objetivo desse trabalho é projetar uma máquina que será acoplada nos cubos de roda do veículo, necessita-se projetar o motor mais compacto possível. Além de ser compacto, é interessante que o motor seja eficiente, pois dessa maneira uma quantidade menor de baterias se vê necessária e, conseqüentemente, obtêm-se um automóvel mais leve e eficiente. Sendo assim, tendo em mãos as pesquisas realizadas e levando-se em conta os dados levantados na Tabela 2, opta-se

Tabela 2 – Comparação entre as diferentes tecnologias de motores.

Tipo de máquina	Vantagem	Desvantagem
MAS	<ul style="list-style-type: none"> - Construção simples do rotor; - Custo baixo; - Rotor robusto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fator de potência baixo; - Perdas elevadas no rotor; - Baixo rendimento.
MRV	<ul style="list-style-type: none"> - Construção simples do rotor; - Rotor robusto; - Sem perdas joules no rotor. 	<ul style="list-style-type: none"> - Torque pulsante; - Fator de potência baixo; - Altas perdas aerodinâmicas; - Perdas de Foucault elevadas (caso rotores maciços).
BLAC/BLDC	<ul style="list-style-type: none"> - Forte densidade de potência; - Baixas perdas no rotor; - Alto fator de potência; - Bom rendimento; - Compacta. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto custo dos ímãs; - Desmagnetização dos ímãs; - Manutenção dos ímãs; - Rotor complexo.

Fonte: (CHEBAK, 2013)

por projetar uma motor à ímãs permanentes e do tipo BLAC.

O projeto de máquinas síncronas *brushless* à ímãs permanentes de alta rotação é difícil e diferente do projeto de máquinas convencionais. Então, para assegurar um dimensionamento otimizado, uma modelagem e método de projeto bem adaptado a esse tipo de máquina devem ser utilizados (ROY, 2016).

3 MODELAGEM DO VEÍCULO

A maneira tradicional de definir as especificações de um sistema de tração elétrico consiste em impor os desempenhos desejados. Os critérios de desempenho geralmente especificados correspondem a inclinação máxima da via onde o veículo poderá circular, a autonomia desejada, bem como a velocidade em função do tempo ou, simplesmente, a simulação do veículo em um ciclo de trajeto urbano (EPA US06, EPA UDDS, NEDC ou outro) (ROY, 2016).

Contudo, essa maneira tradicional de projeto não é apropriada para se dimensionar o sistema de tração de um veículo de Fórmula SAE. Já que este tipo de automóvel não é destinado para a condução urbana ou em rodovias, dessa forma, os ciclos de funcionamento não representam as condições de operação do sistema em questão.

Além disso, os desempenhos desejados de um motor para esta aplicação são por si só desconhecidas, sendo que, os desempenhos do veículo na pista dependem de numerosos fatores, tais como: a suspensão; a direção; a capacidade do piloto de controlar o automóvel e a colocá-lo em seus limites físicos; o conjunto aerodinâmico; a massa e outros vários fatores adicionais. Assim, uma motorização mais potente implica em uma massa mais elevada e não melhora, necessariamente, o desempenho global do veículo.

Portanto, neste capítulo o veículo será modelado e, com base nos resultados obtidos, define-se as especificações do motor a ser implementado. Inicia-se ilustrando características do método de simulação escolhido, em seguida apresenta-se o equacionamento e modelagem do veículo e, por fim, aborda-se os resultados da simulação e a escolha do motor ideal para o projeto.

3.1 METODOLOGIA DE ANÁLISE

O estudo realizado consiste em propor aproximações dos percursos realizados nas provas da competição organizada pela Fórmula SAE Brasil. Tendo estes percursos e a dinâmica do veículo modelados, realizaremos simulações de maneira a variar certos parâmetros da máquina e exprimir os desempenhos do veículo para cada caso.

Com isso, os resultados obtidos são analisados tendo em vista o regulamento da competição e o seu sistema de pontuação. A topologia de motor selecionada permite se obter o maior número de pontos e,

como consequência, se conceber o melhor macro projeto possível para concorrer a primeira posição no evento. Finalmente, as especificações obtidas serão utilizadas no próximo capítulo como parâmetros para se projetar o motor.

O evento organizado pela Fórmula SAE Brasil conta com quatro provas dinâmicas e uma onde se considera a eficiência do sistema, estas provas contabilizam um total de 675 pontos num máximo de 1000 pontos que também contabiliza as provas estáticas (SAE INTERNATIONAL, 2018). As provas dinâmicas são dadas por:

3.1.1 Prova de Aceleração

Esta prova consiste em acelerar o veículo num trajeto retilíneo de 75m no menor tempo possível. A pontuação máxima dada nessa prova é de 100 pontos, onde o menor tempo obtém pontuação máxima e os demais são calculados de acordo com (3.1) e (3.2):

Se $Temp_{eq} < Temp_{max}$,

$$Pont_{ACC} = 95,5 \cdot \left(\frac{\frac{Temp_{max}}{Temp_{eq}} - 1}{\frac{Temp_{max}}{Temp_{min}} - 1} \right) + 4,5 \quad (3.1)$$

Se $Temp_{eq} > Temp_{max}$,

$$Pont_{ACC} = 4,5 \quad (3.2)$$

Onde, $Pont_{ACC}$ é a pontuação na prova de aceleração; $Temp_{eq}$ é o melhor tempo realizado pela equipe; $Temp_{min}$ é o melhor tempo realizado dentre todas as equipes participantes; $Temp_{max}$ corresponde a 150% de $Temp_{min}$.

3.1.2 Prova de *Skid Pad*

Esta prova consiste em realizar um percurso em oito, onde são realizadas duas voltas por piloto e o menor tempo por volta é contabilizado. Nesse caso, a pontuação máxima é de 75 pontos, a qual é dada ao menor tempo. As demais equipes são pontuadas de acordo com (3.3) e (3.4):

Se $Temp_{eq} < Temp_{max}$,

$$Pont_{SP} = 71,5 \cdot \left(\frac{\left(\frac{Temp_{max}}{Temp_{eq}} \right)^2 - 1}{\left(\frac{Temp_{max}}{Temp_{min}} \right)^2 - 1} \right) + 3,5 \quad (3.3)$$

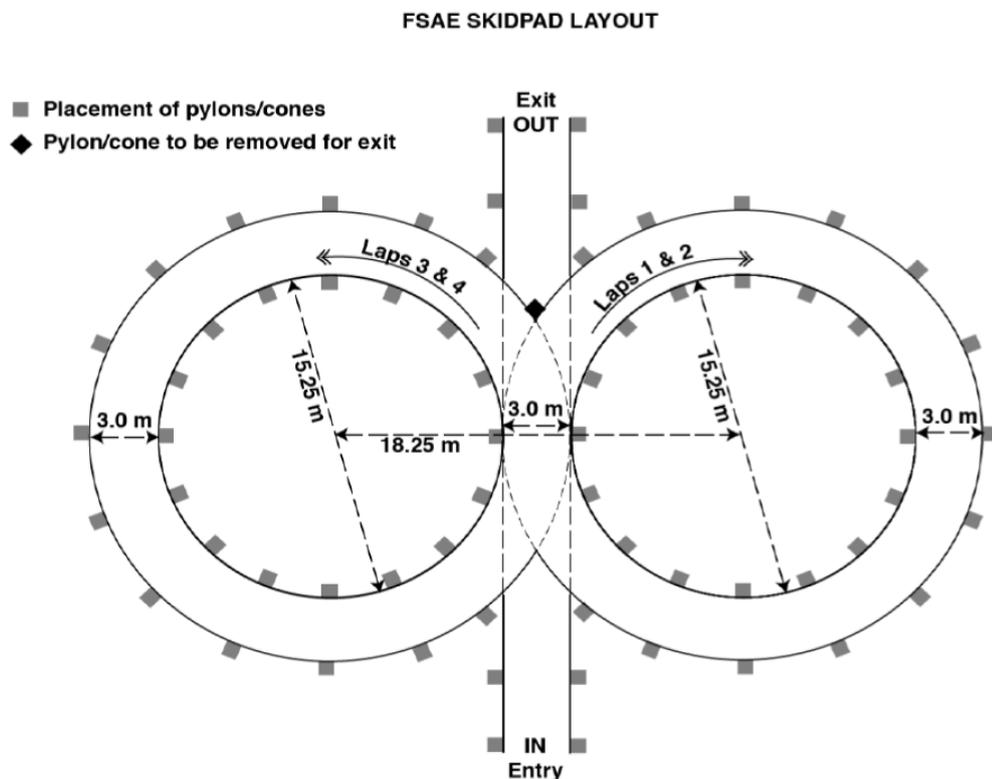
Se $Temp_{eq} > Temp_{max}$,

$$Pont_{SP} = 3,5 \quad (3.4)$$

Onde, $Pont_{SP}$ é a pontuação na prova de *skid pad*; $Temp_{eq}$ é o melhor tempo realizado pela equipe; $Temp_{min}$ é o melhor tempo realizado dentre todas as equipes participantes; $Temp_{max}$ corresponde a 125% de $Temp_{min}$.

Na Figura 14, observar-se detalhes do circuito realizado na prova de *skid pad*. Esse trajeto é padronizado e realizado em todos os eventos de Fórmula SAE em diferentes países.

Figura 14 – Detalhe do trajeto da provas de *Skid Pad*.



Fonte: (SAE INTERNATIONAL, 2018)

3.1.3 Prova de *Autocross*

Esta prova consiste em realizar um percurso de aproximadamente 1,1 Km dado pela comissão organizadora da Fórmula SAE Brasil. A pontuação máxima dessa prova vale 125 pontos, dados à equipe que fizer o menor tempo, para as demais o cálculo da pontuação é dado por (3.5) e (3.6):

Se $Temp_{eq} < Temp_{max}$,

$$Pont_{AUT} = 118,5 \cdot \left(\frac{\frac{Temp_{max}}{Temp_{eq}} - 1}{\frac{Temp_{max}}{Temp_{min}} - 1} \right) + 6,5 \quad (3.5)$$

Se $Temp_{eq} > Temp_{max}$,

$$Pont_{AUT} = 6,5 \quad (3.6)$$

Onde, $Pont_{AUT}$ é a pontuação na prova de *autocross*; $Temp_{eq}$ é o melhor tempo realizado pela equipe; $Temp_{min}$ é o melhor tempo realizado dentre todas as equipes participantes; $Temp_{max}$ corresponde a 145% de $Temp_{min}$.

Na Figura 15, tem-se em detalhe a pista onde é realizada a prova de *autocross*. Diferentemente da prova de *skid pad*, o percurso da prova de *autocross* não é o mesmo utilizado por outras edições da competição, sendo que cada país possui um trajeto diferente, o que se tem em comum é a concepção do circuito de maneira que a velocidade média fique em torno de 40 a 48 Km/h. No Brasil o evento é realizado no Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo (ECPA), localizado no estado de São Paulo. Sendo que, na imagem dada pode-se observar uma vista da pista obtida através do *Google Maps*®.

Tem-se que na Figura 15 as linhas verdes demarcam as extremidades da pista; já as linhas laranjas os cones que a organização da competição utiliza para indicar o trajeto que o veículo deve percorrer; e, por fim, em azul temos o trajeto que o automóvel deve realizar.

3.1.4 Prova de *Enduro*

A prova de *enduro* consiste em realizar o mesmo percurso da prova de *autocross*, cerca de 1,1 Km e ilustrado na Figura 15. Contudo, nesse caso deve-se realizar 22 voltas no percurso para se completar a prova, ou seja, cerca de 24 Km. A pontuação máxima dessa prova vale

Figura 15 – Detalhe do trajeto das provas de *Enduro* e *Autocross*.



Fonte: Autor (2018)

275 pontos, dados à equipe que fizer o menor tempo. Para as demais o cálculo da pontuação é dado por (3.7) e (3.8):

Se $Temp_{eq} < Temp_{max}$,

$$Pont_{END} = 250 \cdot \left(\frac{\frac{Temp_{max}}{Temp_{eq}} - 1}{\frac{Temp_{max}}{Temp_{min}} - 1} \right) + 25 \quad (3.7)$$

Se $Temp_{eq} > Temp_{max}$,

$$Pont_{END} = 25 \quad (3.8)$$

Onde, $Pont_{END}$ é a pontuação na prova de *enduro*; $Temp_{eq}$ é o melhor tempo realizado pela equipe; $Temp_{min}$ é o melhor tempo realizado dentre todas as equipes participantes; $Temp_{max}$ corresponde a 145% de $Temp_{min}$.

3.1.5 Prova de Eficiência Energética

Esta prova consiste em medir a energia gasta para se completar a prova de *enduro*, sendo que a pontuação máxima atribuída é de 100 pontos. Como nos casos anteriores, a pontuação máxima é dada à equipe que obter o melhor desempenho, ou seja, um menor consumo

energético nesse caso. Contudo, até na edição anterior do evento (edição de 2017), a prova de eficiência energética nunca foi realizada no Brasil devido a falta dos aparelhos que devem ser embarcados nos automóveis e realizar as medições, dessa forma não há valores comparativos para se estimar um consumo ideal e atribuir parâmetros de comparação para se estimar qual seria o consumo para se obter a melhor nota.

O procedimento que se vêm adotando no evento é atribuir a nota máxima à todas as equipes que completarem a prova de *enduro*. Porém, para não ignorar esse item, aborda-se a questão de eficiência no projeto da máquina, tendo como um dos objetivos se otimizar essa característica.

3.2 EQUACIONAMENTO DO VEÍCULO

Tendo como base (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012) e os dados de projeto fornecidos pela equipe *Ampera Racing*, pode-se equacionar toda a dinâmica do veículo e assim realizar as simulações desejadas para extrair os parâmetros do sistema de tração ideais para o projeto em questão.

Nesta seção aborda-se o equacionamento da dinâmica do veículo, onde uma modelagem quase estática é realizada. Sendo assim, não trabalha-se com equações diferenciais, mas sim com expressões que definem a dinâmica do sistema em um tempo discretizado. Desenvolve-se o problema em subseções que vão descrevendo gradativamente o equacionamento realizado.

3.2.1 Definição de Constantes

Para realizar análise do sistema, deve-se definir algumas constantes universais, tais como:

$$g_v = 9,81 [m/s^2] \quad (3.9)$$

$$T_{amb} = 30 [^\circ C] \quad (3.10)$$

$$T_{ar} = 303,15 [K] \quad (3.11)$$

$$P_{atm} = 713 [mm \text{ de } Hg] \quad (3.12)$$

Tem-se que, gv corresponde a aceleração da gravidade, utiliza-se esse parâmetro para calcular grandezas como resistência ao rolamento e força máxima nas rodas do automóvel. Já T_{amb} corresponde à estimativa da temperatura ambiente na cidade de Piracicaba-SP para a data do evento; T_{ar} à temperatura do ar em graus Kelvin; e P_{atm} à pressão atmosférica no local do evento (537 m do nível do mar), esses parâmetros serão utilizados para o cálculo de grandezas como as forças de arrasto aerodinâmico.

3.2.2 Parâmetros do Piloto

Com citado anteriormente, trabalha-se com uma simulação quase estática onde a dinâmica do sistema é calculada em intervalos de tempo. As pistas de cada prova da competição foram modeladas e divididas em trechos de retas e curvas e, de acordo com o cálculo da distância percorrida em cada interação, tem-se acesso a velocidade e posição do automóvel no trajeto.

Ao se observar a Figura 15, pode-se ver em azul o percurso que o piloto deve realizar para se obter o melhor tempo possível. Porém, além de seguir esse trajeto, ele deve frear e acelerar de maneira que o veículo trabalhe em seu limite, ou seja, sem perder tração e derrapar em curvas ou retas.

Com a modelagem realizada, sabe-se quais são esses fatores de aceleração e frenagem limitantes. Porém, como o objetivo é realizar uma simulação precisa e se aproximar de um tempo final mais próximo do real, implementamos o que chamamos de "piloto não ideal". Quer dizer, tendo a modelagem da pista sido realizada, no momento de calcular as acelerações e frenagens levamos em conta os seguintes fatores:

- Primeiramente, tem-se o "erro de frenagem ideal". Aqui se leva em conta que, em um caso real, o piloto não vai frear nas proporções ideais. Por exemplo, ao se aproximar de uma curva ele poderia desacelerar o carro com uma velocidade x e entrar mais rápido em uma curva, porém ele desacelera com uma velocidade y e acaba perdendo um pouco de tempo. O erro de frenagem considerado foi de 15%, dado em (3.13):

$$\epsilon_{fren} = 0,85 \quad (3.13)$$

- Tem-se também o "erro na distância de frenagem". Neste caso, considera-se que o piloto não vai frear no momento certo ao entrar

em curvas, ou seja, ele começa a desacelerar a uma certa distância de curvas sendo que se ele freasse mais próximo já seria necessário para se desacelerar e evitar que o carro perca tração. Considera-se que o piloto comece a frear com 2 m de antecedência do ponto ideal, fato dado por (3.14):

$$\epsilon_{dist} = 2 [m] \quad (3.14)$$

- Por fim, tem-se o "erro de incremento do acelerador". Este, corresponde ao tempo despendido para que o piloto pise no acelerador e essa informação seja convertida efetivamente em torque entregue. Esse incremento varia de 0,5 até 100, onde 100 corresponde ao pedal em 100% do seu curso, ou seja, piloto acelerando o máximo possível. Esse incremento de 0,5 é somado a cada interação da simulação levando-se em conta o tempo de amostragem, como se abordará mais adiante. A expressão deste erro é dada em (3.15):

$$\epsilon_{accel} = 0,5 \quad (3.15)$$

3.2.3 Constantes do Carro

Antes de expressar as equações que definem a dinâmica do veículo, existem algumas constantes que descrevem o sistema e necessitam ser definidas. Tratam-se de valores que abordam características físicas do automóvel, onde pode-se começar definindo o coeficiente aerodinâmico e a área frontal, dados por (3.16) e (3.17), respectivamente. Essas grandezas são utilizadas para o cálculo da perdas aerodinâmicas no veículo.

$$A_{front} = 0,78 [m^2] \quad (3.16)$$

$$C_{ar} = 0,3 \quad (3.17)$$

Constantes que definem as inércias dos componentes do sistema a eficiências também devem ser definidas para os futuros cálculos. Sendo assim, define-se algumas constantes ilustradas entre (3.18) e (3.23).

$$J_{motor} = 0,0004 [kg.m^2] \quad (3.18)$$

$$J_{roda} = 0,25 [kg.m^2] \quad (3.19)$$

$$J_{cubo} = 0,016 [kg.m^2] \quad (3.20)$$

$$J_{se} = 0 [kg.m^2] \quad (3.21)$$

$$J_{trans} = 0,01 [kg.m^2] \quad (3.22)$$

$$\eta_{trans} = 0,95 \quad (3.23)$$

Na expressão (3.18), é definida a inércia do motor. Ela foi obtida através de um pré projeto realizado com o auxílio do *software* Motor-Solve[®], nele foram fornecidas as especificações do motor desenvolvido pela equipe de Fórmula SAE da Universidade Laval em Quebec. Esses dados foram obtidos em (ROY, 2016).

Já na em (3.19) é apresentada a inércia da roda do veículo, obtida para o caso de uma roda de aro 10". Na Equação (3.20) é apresentada a inércia do cubo de roda, obtida do projeto da equipe *Ampera Racing* do ano de 2018. Temos na Equação (3.21) a inércia do semi-eixo, que neste caso é nula, já que os motores serão acoplados diretamente ao cubo de roda.

Na Equação (3.22), é apresentada a definição da inércia da transmissão, a qual foi obtida do projeto da equipe *Ampera Racing* do ano de 2018. Trata-se de uma redução do tipo planetária, semelhante a que será desenvolvida para ser acoplada neste projeto. Por fim, na expressão (3.23) tem-se o rendimento da transmissão, que equivale a 95%.

Outras constantes a serem definidas estão associadas, mais diretamente, a dinâmica veicular e são definidas nas relações abaixo:

$$R_{roda} = 0,2145 [m] \quad (3.24)$$

$$u = 1,4 \quad (3.25)$$

$$l = 1,575 [m] \quad (3.26)$$

$$Bit = 1,230 [m] \quad (3.27)$$

$$x_{CG} = l.0,6 [m] \quad (3.28)$$

$$C_{rol} = 0,014 \quad (3.29)$$

$$h_{CG} = 0,320 [m] \quad (3.30)$$

$$Mass = 220 + 80 [kg] \quad (3.31)$$

$$F_{freio} = 4870 [Nm] \quad (3.32)$$

Na expressão (3.24) tem-se o raio da roda de 10". Já na expressão (3.25) é definido o coeficiente de atrito da borracha do pneu com a pista, utilizaremos esse parâmetro para calcular as velocidades limite em curvas, frenagens e acelerações para que o automóvel não perca tração. A Equação (3.26) define o entre eixos do carro desenvolvido pela equipe no ano de 2018 e a Equação (3.27) a bitola, ou seja, a distância entre as rodas.

Existe também uma constante que define a distribuição de massa no veículo, dada na expressão (3.28), onde multiplica-se o valor do entre eixos por 0,6, visto que, a o veículo tem 60% da massa na parte traseira e 40% na parte dianteira. O coeficiente de atrito de rolamento é dado na expressão (3.29), dado que, ele é utilizado para se calcular a resistência ao rolamento devida as perdas no par pneu pista. Essa grandeza é tabelada para diferentes tipos de pistas e dada na Tabela 3.

Outra constante que deve ser definida é a altura do centro de gravidade, sendo que, ela é dada na Equação (3.30). Tem-se também a massa do conjunto carro e piloto dada na expressão (3.31), onde o veículo pesa em torno de 220kg e o piloto em torno de 80kg. Por fim, tem-se a força de frenagem, a qual é dada pela Equação (3.32) e seu valor foi obtido juntamente a equipe *Ampera Racing* do projeto de 2018.

Continuando o raciocínio, ainda define-se algumas constantes referentes ao sistema de tração. Primeiramente, o número de motores deve ser definido. Para o projeto em questão, optou-se por se conceber uma tração nas quatro rodas, ou seja, utiliza-se quatro motores. Escolheu-se a utilização de um sistema com tração integral por melhorar a dinâmica do veículo de forma geral (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012). Sendo assim, obteve-se a relação (3.33).

$$N_{mot} = 4 \quad (3.33)$$

A eficiência do motor deve ser definida para que se obtenha uma melhor aproximação da dinâmica real do veículo na pista. Contudo,

Tabela 3 – Coeficientes de atrito de rolamento.

Tipo de Piso	Valor de "C_{rol}"
Asfalto liso	0,010
Asfalto rugoso	0,011
Cimento rugoso	0,014
Paralelepípedo	0,020
Pedras irregulares	0,032
Pedra britada compacta	0,045
Pedra britada solta	0,08
Terra batida	0,06
Areia solta	0,1 a 0,3
Gramma	0,045 a 0,1
Barro	0,1 a 0,4
Neve profunda	0,045 a 0,3

Fonte: Adaptado de (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012)

nessa etapa ainda não possuía-se acesso a essa informação. Sendo assim, observou-se as eficiências que as máquinas de ímãs permanentes normalmente possuem e escolheu-se um valor aproximado que representasse o sistema em uma situação de baixo rendimento (90%). A eficiência escolhida é dada em (3.34).

$$\eta_{mot} = 0,9 \quad (3.34)$$

Também deve-se definir a velocidade de rotação máxima dos motores, para isto teve-se como base a máquina desenvolvida por (ROY, 2016) em sua dissertação, bem como a velocidade final que o veículo deve atingir considerando as relações de transmissão usuais em projetos deste tipo. Portanto, se chegou a uma rotação máxima dada em (3.35). A qual, através da relação de redução definida no final deste capítulo, proporciona uma velocidade máxima de 129 Km/h ao veículo.

$$rpm_m = 15000 [rpm] \quad (3.35)$$

Tendo definido a velocidade máxima de rotação, deve-se levar em conta parâmetros como torque, relação de redução da transmissão e potência do motor. Dessa forma, pode-se fazer um comparativo entre cada configuração destes parâmetros e dos desempenhos em cada uma das provas dinâmicas. Na seção 3.3 será abordada a simulação da dinâmica e a relação de redução será variada de maneira a se obter a melhor pontuação na competição. Representou-se a relação de redução

por GR .

O torque máximo dos motores também deve ser especificado para o cálculo da dinâmica do veículo na pista. Como no caso da relação de redução, o seu valor será variado e os desempenhos alcançados serão observados. Representou-se esta grandeza por T_{em} .

A potência nominal dos motores também deve ser especificada para os cálculos dinâmicos do veículo. Tendo em vista o limite de 80 kW instantâneos estabelecido pela Fórmula SAE Brasil e o número de motores, estimou-se uma potência por motor que varie entre 20 kW e 25 kW, valores que serão simulados para se obter o melhor resultado. A potência nos motores é representada por P_e .

3.2.4 Cálculo da Dinâmica

Nesta seção é desenvolvida uma formulação simples, que permite que seja avaliada a carga média sobre as rodas de um veículo se deslocando no plano. Essa modelagem quase estática pode ser empregada como um modelo estrutural de carregamentos ou então como um modelo de desempenho (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012).

Pode-se começar definindo o "raio dinâmico", parâmetro que é utilizado para se calcular a velocidade do veículo em função da velocidade de rotação, tanto quanto grandezas como o torque e força nas rodas. Sabe-se que, devido a elasticidade do pneu, o diâmetro da roda varia em função da velocidade pelo efeito da força centrífuga. Dessa maneira, é conveniente definir o raio dinâmico dos pneus. Segundo (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012), o raio dinâmico é definido a partir da distância percorrida em um giro do pneu, na condição de carga máxima admissível, com a velocidade padrão de 60 km/h. Ele é calculado a partir de (3.36).

$$RD = R_{roda} \cdot 2 \cdot 0,47 \cdot 1,02 \quad (3.36)$$

Depois de estimar as inércias individuais de cada componente do sistema, definiu-se a inércia total, a qual é dada por (3.37).

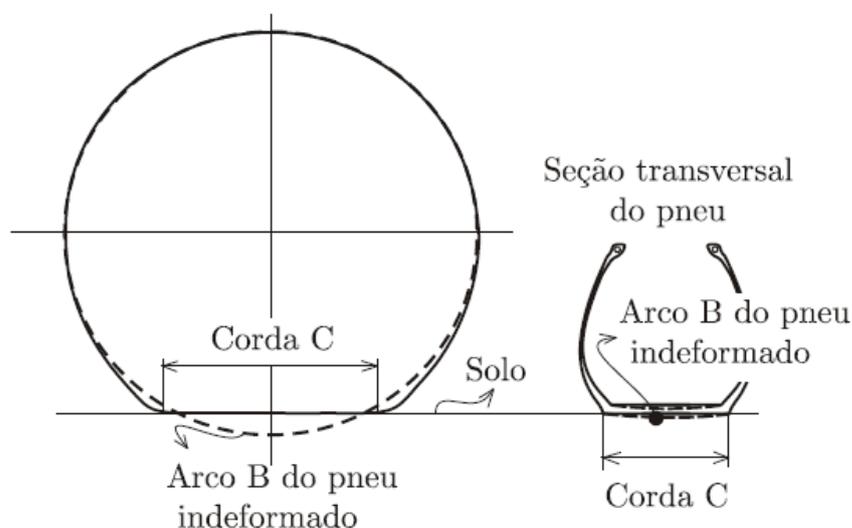
$$J_{tot} = (J_{roda} + J_{cubo}) \cdot 4 + (J_{trans} + J_{se}) \cdot N_{mot} + GR^2 \cdot J_{mot} \cdot N_{mot} \quad (3.37)$$

Para manter um pneu girando sobre o solo, é necessário dispendir uma certa quantidade de energia, consumida pelos diversos tipos de perdas que ocorrem. Essas perdas dão origem à resistência ao rola-

mento do pneu e são provenientes principalmente de duas fontes dissipadoras. Uma é o próprio pneu e a outra é o solo onde o veículo trafega. As perdas no pneu são devidas a sua natureza que não é perfeitamente elástica, então ao sofrer deformações essa energia acaba sendo dissipada de outras formas. Tem-se também as perdas no solo, que correspondem às deformações provocadas pelo pneu ou no próprio solo, as quais o veículo precisa superar para se locomover. Por fim, para complementar os componentes da resistência ao rolamento, considera-se as perdas pneu-solo, as quais correspondem ao escorregamento do pneu no solo.

A Figura 16, ilustra a deformação na periferia do pneu ao entrar em contato com o solo, onde o arco "B" deve assumir um tamanho menor do que o da corda "C", causando um escorregamento tangencial e originando forças de compressão nos dois bordos que limitam longitudinalmente a zona de contato. Pelo efeito do atrito entre a borracha da banda de rodagem e o solo, este escorregamento consome energia (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012).

Figura 16 – Deformação periférica no pneu.



Fonte: (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012)

Sendo assim, a resistência ao rolamento é calculada de acordo com a Equação (3.38):

$$R_{rol} = C_{rol} \cdot Mass \cdot gv \quad (3.38)$$

Outras grandezas que devem ser calculadas e serão utilizadas nos cálculos dinâmicos, são a máxima velocidade do veículo e a máxima força nas rodas para que o automóvel não perca a tração. Estas grandezas são dadas pelas Equações (3.39) e (3.40), respectivamente.

$$Vel_m = \frac{rpm_m \cdot RD \cdot 2 \cdot \pi}{60 \cdot GR} \quad (3.39)$$

$$mfr = gv \cdot u \cdot Mass \quad (3.40)$$

Agora, para efeito de simulação, define-se um tempo de amostragem igual a $1ms$ e o número de amostras vai depender de cada uma das provas a ser simulada. Por exemplo, na prova de aceleração estabelecemos um tempo limite de $5s$, então o número de amostras é dado por esse tempo final sobre o tempo de amostragem. Também define-se algumas constantes iniciais com seus valores nulos, os quais serão incrementados no decorrer da simulação. Constantes como a aceleração lateral (Ac_{lat}); a aceleração (Ac); a velocidade (Vel); a distância percorrida (dit); o torque eletromagnético (T_e) e o incremento do acelerador (Acd) que depende do erro de aceleração definido anteriormente.

Para efeito de cálculos segue-se, em cada interação do sistema, a sequência de eventos descritas a seguir. Onde começa-se com alguns cálculos iniciais que são atualizados em cada interação. Tratam-se das expressões da força de arrasto e das desacelerações em caso de frenagens. Essas duas expressões foram obtidas em (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012), e são dadas, respectivamente, por (3.41) e (3.42).

$$F_{ar} = \frac{P_{atm} \cdot 0,4647 \cdot Vel^2 \cdot C_{ar} \cdot A_{front}}{2 \cdot T_{ar}} \quad (3.41)$$

$$D_{ac} = -\epsilon_{fren} \cdot \frac{gv}{1 + \frac{J_{tot}}{Mass \cdot RD^2}} \cdot \frac{u + C_{rol} + F_{ar}}{Mass \cdot gv} \quad (3.42)$$

Em seguida, calcula-se os limites para retas e curvas. Como havia sido abordado anteriormente, carregou-se no arquivo de simulação as características da pista para cada prova do evento. Desta forma, dependendo da posição do veículo é conhecido se ele está em uma reta ou realizando uma curva. Então, quando em uma curva, define-se no arquivo de simulação uma constante que indica este caso e ainda contempla o raio da curva a ser realizada.

Tem-se que para cada um dos casos, o veículo tem algumas limitações tanto no quesito de não perder tração, quanto em relação a velocidade que pode alcançar. Portanto, para o caso do veículo estar em uma curva, tem-se os seguintes limites:

$$Ac_{lat} = \frac{Vel^2}{Raio} \quad (3.43)$$

$$Vel_m = \sqrt{Raio \cdot u \cdot gv} \quad (3.44)$$

$$F_{est} = \left(\frac{Vel}{Vel_m} \right)^2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) - \operatorname{atan}\left(\frac{l}{Raio}\right) \cdot \frac{Ac_{lat} \cdot Mass}{4} \quad (3.45)$$

Onde a variável *Raio* corresponde ao raio da curva que o veículo está realizando. Já a Equação (3.43) nos trás a aceleração lateral que o veículo esta sujeito e na Equação (3.44) tem-se a máxima velocidade que o automóvel pode rodar sem perder a tração na curva em questão. Em seguida calcula-se a força de esterçamento, dada por (3.45). Trata-se de uma força resistiva ao movimento e é somada juntamente às forças de resistência ao rolamento e de resistência aerodinâmica.

Agora, para o caso do veículo estar em uma reta são calculadas as mesmas três variáveis citadas acima, porém os limites estabelecidos em cada interação são:

$$Ac_{lat} = 0 \quad (3.46)$$

$$Vel = Vel_m \quad (3.47)$$

$$F_{est} = 0 \quad (3.48)$$

Sendo assim, quando o veículo está em um trecho retilíneo as forças de esterçamento e aceleração lateral são nulas. Já a velocidade máxima no trecho se limita a velocidade máxima que o veículo pode atingir (ver Equação (3.39)).

Agora deve-se definir se o carro esta acelerando ou freando no segmento de pista em questão. Caso ele esteja freando, deve-se considerar a chamada distância de frenagem ou distância de parada, a qual é o outro parâmetro fundamental para a definição do desempenho de um freio automotivo. Ela depende da desaceleração e de todas as variáveis que estão relacionadas a esta. A inércia do sistema, a velocidade e os coeficientes de atrito envolvidos na ação de frenagem são as variáveis que mais influenciam a distância de parada enquanto que a desaceleração e a distância de frenagem são as variáveis mais importantes para caracterização da eficiência do freio (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012).

Como tem-se acesso ao comprimento de todos os segmentos da pista, pode-se calcular a distância de frenagem sabendo-se a velocidade

máxima que o veículo pode rodar no segmento em questão, a sua velocidade no momento e a desaceleração que ele é capaz de realizar. A relação (3.49) descreve esse comportamento:

$$D_{seg} - D_{vei} \leq \frac{Vel_m^2 - Vel^2}{2 \cdot D_{ac}} \quad (3.49)$$

Onde D_{seg} é o comprimento do segmento, D_{vei} é a posição do veículo no segmento em questão e a variável Vel_m corresponde a velocidade máxima permitida no momento. Sendo assim, se a relação (3.49) for válida nós devemos desacelerar o veículo e as seguintes relações devem ser estabelecidas:

$$Ac = D_{ac} \quad (3.50)$$

$$F_{roda} = Ac \cdot Mass \quad (3.51)$$

$$T_e = \frac{F_{roda} \cdot RD}{N_{mot} \cdot \eta_{trans} \cdot GR} \quad (3.52)$$

Onde F_{roda} é a força na roda do veículo, a qual é utilizada para se calcular o torque eletromagnético que os motores devem exercer. Cálculo realizado através da Equação (3.52).

Agora para o caso do veículo não estar desacelerando, ou seja, estar em velocidade constante ou acelerando, devem-se levar em conta algumas situações que mudarão o cálculo das grandezas de aceleração, força na roda e torque eletromagnético. Estas situações podem ser divididas no caso de estarmos em um trecho retilíneo ou em uma curva, e estão apresentadas nos dois tópicos abaixo:

RETA -

Primeiramente, considerou-se o caso de um trecho retilíneo da pista e se verificou se a rotação máxima do motor foi atingida. Assim, em caso positivo, os seguintes cálculos são válidos:

$$Ac = 0 \quad (3.53)$$

$$F_{roda} = F_{ar} + R_{rol} + F_{est} \quad (3.54)$$

$$T_e = \frac{F_{roda} \cdot RD}{N_{mot} \cdot \eta_{trans} \cdot GR} \quad (3.55)$$

Agora, se a rotação máxima não foi atingida, deve-se impor o torque máximo do motor (sem que a mfr seja utrapassada) para que o veículo acelere o mais rapidamente possível. Com isso, tem-se as relações abaixo:

$$F_{roda} = N_{mot} \cdot \frac{T_{em}}{RD} \cdot R_{rol} \cdot \eta_{trans} \quad (3.56)$$

$$T_e = T_{em} \quad (3.57)$$

Além dos dois casos acima, ainda se verificou se a potência limite imposta pela organização da Fórmula SAE Brasil não foi ultrapassada e se o acelerador está no seu máximo. Pois, como já foi abordado anteriormente, não considerou-se um caso ideal em que o acelerador passa instantaneamente de 0% a 100%, mas sim onde ele é incrementado a cada nova interação até o seu valor máximo.

Sendo assim, para o caso da limitação do torque pela potência, verificou-se a validade da relação (3.58). Nela P_{FS} representa a potência instantânea máxima que o veículo pode alcançar no evento, que no caso é de 80 kW, contudo ela foi limitada em 78 kW para se obter um fator de segurança e não haver risco da equipe ser penalizada.

$$P_{FS} \geq 78000 \quad (3.58)$$

Caso a relação seja verdadeira, deve-se limitar o torque para não ultrapassar esse limite imposto, sendo assim os seguintes cálculos de torque e força nas rodas são necessários:

$$F_{roda} = \frac{P_{FS} \cdot \eta_{trans}}{Vel} \quad (3.59)$$

$$T_e = \frac{F_{roda} \cdot RD}{N_{mot} \cdot \eta_{trans} \cdot GR} \quad (3.60)$$

Como indicado acima, além do fator da potência máxima, ainda pode-se limitar o torque pela questão do incremento do acelerador. Onde se verificou se a relação (3.61) é válida. Em caso positivo considerou-se a força na roda e torque calculados anteriormente; senão recalculou-se esses dois parâmetros segundo as relações (3.62) e (3.63). Observação: Pe_{ac} é a posição do pedal

do acelerador, ele é incrementado a cada interação com o valor definido por ϵ_{accel} (Equação (3.15)).

$$Pe_{ac} \geq 100 \quad (3.61)$$

$$F_{roda} = \frac{F_{roda} \cdot Pe_{ac}}{100} \quad (3.62)$$

$$T_e = \frac{T_e \cdot Pe_{ac}}{100} \quad (3.63)$$

Por fim, se calculou a aceleração do veículo para o caso onde a velocidade máxima não foi atingida (ver Equação (3.64)). Com isso, utilizou-se a aceleração e velocidades obtidas para atualizar a distancia percorrida pelo veículo na pista.

$$Ac = F_{roda} - \frac{F_{ar} + R_{rol} + F_{est}}{Mass + \frac{J_{tot}}{RD^2}} \quad (3.64)$$

CURVA -

No caso do veículo estar realizando uma curva, a aceleração dele também vai depender da aceleração lateral, pois esta possui um limite que indicará a perda de tração do veículo. Sendo assim, se verificou se a relação (3.65) é verdadeira e, em caso positivo, o veículo perderia tração. Então deve-se limitar a aceleração e força nas rodas.

$$\sqrt{Ac^2 + Ac_{lat}^2} > u \cdot gv \quad (3.65)$$

Assim, levando-se em conta a relação (3.65), as Equações (3.66), (3.67) e (3.68) são válidas.

$$Ac = \sqrt{AC^2 + Ac_{lat}^2} \quad (3.66)$$

$$F_{roda} = Ac \cdot \left(Mass + \frac{J}{RD^2} \right) + F_{ar} + R_{rol} + F_{est} \quad (3.67)$$

$$T_e = \frac{F_{roda} \cdot RD}{N_{mot} \cdot \eta_{trans} \cdot GR} \quad (3.68)$$

No entanto, se a relação (3.65) não for válida, tem-se que o veículo não perde tração. Então seguem-se os mesmos raciocínios de cálculos realizados para o caso do veículo estar em uma reta, ou seja, levando-se em conta as velocidades máximas e acelerações com torque máximo. No mais, para o caso da relação (3.65) ser verdadeira ou não, ainda se verificou se a potência instantânea máxima é respeitada e a posição do acelerador, adotando assim os mesmo procedimentos do caso do veículo estar em uma reta.

Com isso, ao final desta interação, recalcula-se a posição do veículo na pista e a sua velocidade. Parâmetros que serão utilizados na interação seguinte e assim por diante, até que se tenha completado a prova em questão. Com esse conjunto de simulações, expressa-se toda a dinâmica do veículo na prova em função das limitações de torque, potência e parâmetros da construção do automóvel.

3.3 SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DO VEÍCULO

O código desenvolvido para se realizar as simulações do desempenho do veículo nas provas dinâmicas da competição Fórmula SAE Brasil, teve como base as relações de equações apresentadas ao longo deste capítulo. A modelagem quase estática do sistema foi realizada no software de livre acesso Jupyter[®], o qual utiliza a linguagem de programação *Python* (Jupyter, 2018).

Para se contabilizar a pontuação em cada prova dinâmica do evento, é necessário se conhecer o melhor tempo dentre todas as equipes e se fazer um cálculo normativo como apresentado nas seções anteriores. Dessa forma, utilizou-se os melhores tempos contabilizados na edição anterior a realização deste projeto, ou seja, no evento realizado em 2017. Arredondou-se estes tempos para o valor inteiro mais baixo, sendo que, estes valores de referência são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Melhores tempos registrados nas provas dinâmicas da competição Fórmula SAE Brasil em 2017.

Prova Dinâmica	Melhor Tempo Registrado
Aceleração	3,5 s
<i>Skid Pad</i>	5,2 s
<i>Autocross</i>	65 s
<i>Enduro</i>	75 s

Fonte: Autor(2018)

Como visto nas seções anteriores, foram definidos alguns parâmetros do sistema e outros foram variados para se observar os desempenhos alcançados em cada caso. Os parâmetros variados foram o torque eletromagnético máximo dos motores (T_{em}), a potência nominal dos motores (P_e) e a relação de redução da transmissão (GR). Cada um destes parâmetros foram alterados da seguinte maneira:

- Para o caso do torque eletromagnético máximo, foram realizadas simulações com os valores de 20 Nm e 25 Nm. Tais valores foram escolhidos a exemplo de projetos semelhantes como o do caso da dissertação de (ROY, 2016).
- A potência máxima dos motores foi limitada entre 20 kW e 25 kW. Sendo que, o regulamento da competição foi levado em consideração para se estabelecer esses valores.
- Por fim, a relação de redução da transmissão varia de 8 a 10,5, ou seja, a velocidade de rotação do motor é reduzida dentro dessas margens e o seu torque é aumentado proporcionalmente à sua redução. No caso deste parâmetros, os valores foram escolhidos devido a velocidade final que poderíamos obter com tais resultados, bem como com o torque na roda do veículo.

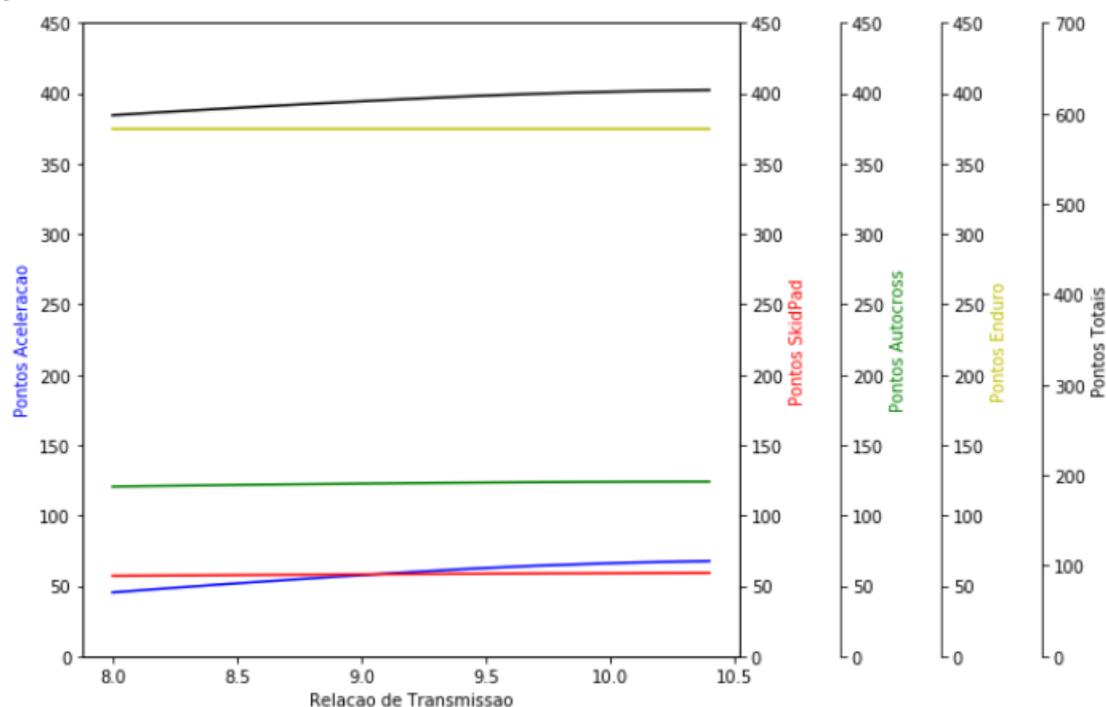
Tendo em vista o conjunto de valores dos parâmetros acima, realizou-se as simulações considerando um sistema com limitações de torque eletromagnético máximo e potência máxima admissíveis e incrementamos os valores de relação de redução em passos de 0,1, variando assim de 8 até 10,5. Dessa maneira, realizou-se 25 simulações para cada uma das provas dinâmicas da competição. As subseções a seguir abordam os resultados de cada conjunto de simulações realizadas.

3.3.1 Simulação para $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 20kW$

Em uma primeira simulação se considerou o caso de um torque eletromagnético máximo de 20 Nm e uma potência máxima de 20 kW. Com isso, após realizar as simulações variando-se a relação de transmissão, obteve-se os resultados apresentados na Figura 17.

Como pode-se observar na Figura 17, é possível ter acesso à pontuação em cada prova da competição, bem como dos pontos totais. Enquanto os valores de redução foram variados, os desempenhos alteravam-se a cada nova simulação e, ao final, obteve-se os valores ide-

Figura 17 – Desempenhos nas provas dinâmicas para $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 20kW$.



Fonte: Autor (2018)

ais da variável GR para as provas individualmente e para o conjunto de provas dinâmicas, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Relações de transmissão para $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 20kW$.

Prova Dinâmica	Relação de Transmissão ideal
Aceleração	10,4
<i>Skid Pad</i>	10,4
<i>Autocross</i>	10,4
<i>Enduro</i>	8
Conjunto das provas	10,4

Fonte: Autor(2018)

Além de se obter a relação de transmissão ideal, também tem-se acesso aos tempos obtidos em cada prova e a pontuação total, a qual é utilizada para fazermos um comparativo entre os desempenhos observados em cada simulação. Estes resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Desempenhos para $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 20kW$.

Prova Dinâmica\Desempenho	Pontuação\Tempo
Aceleração	3,91 s
<i>Skid Pad</i>	5,42 s
<i>Autocross</i>	65,16 s
<i>Enduro</i>	65,38 s
Pontuação Total	625,73

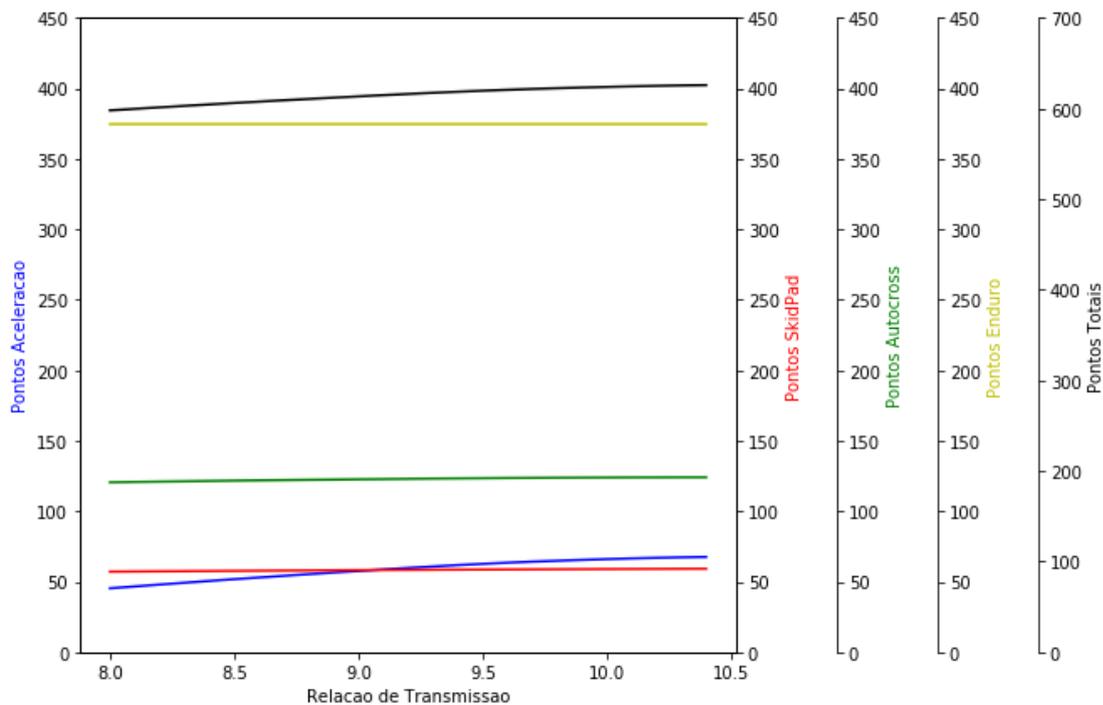
Fonte: Autor(2018)

3.3.2 Simulação para $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 25kW$

Neste caso, manteve-se o torque eletromagnético máximo da simulação anterior, mas se alterou a potência máxima do sistema de tração. Assim, a simulação contou com $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 25kW$, além da relação de redução da transmissão ter sido variada de 8 a 10,5.

Ao se realizar as simulações, obteve-se o conjunto de pontuações por prova apresentadas na Figura 18.

Figura 18 – Desempenhos nas provas dinâmicas para $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 25kW$.



Fonte: Autor (2018)

Tem-se que as relações de transmissão ideais por prova são apre-

sentadas na Tabela 7. Ao se observar os resultados, percebe-se que os valores de GR são idênticos aos obtidos no caso da simulação considerando $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 20kW$.

Tabela 7 – Relações de transmissão para $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 25kW$.

Prova Dinâmica	Relação de Transmissão ideal
Aceleração	10,4
<i>Skid Pad</i>	10,4
<i>Autocross</i>	10,4
<i>Enduro</i>	8
Conjunto das provas	10,4

Fonte: Autor(2018)

Já na Tabela 8, tem-se acesso aos desempenhos obtidos nesta simulação. Como no caso das relações de redução, os desempenhos são idênticos ao caso anterior, onde utilizou-se uma potência máxima de 20 kW. Então, é fácil perceber que para este valor de torque eletromagnético máximo é mais vantajoso se projetar um motor considerando a potência anterior, já que ela é menor o que induz o desenvolvimento uma máquina mais compacta.

Tabela 8 – Desempenhos para $T_{em} = 20Nm$ e $P_e = 25kW$.

Prova Dinâmica\Desempenho	Pontuação\Tempo
Aceleração	3,91 s
<i>Skid Pad</i>	5,42 s
<i>Autocross</i>	65,16 s
<i>Enduro</i>	65,38 s
Pontuação Total	625,73

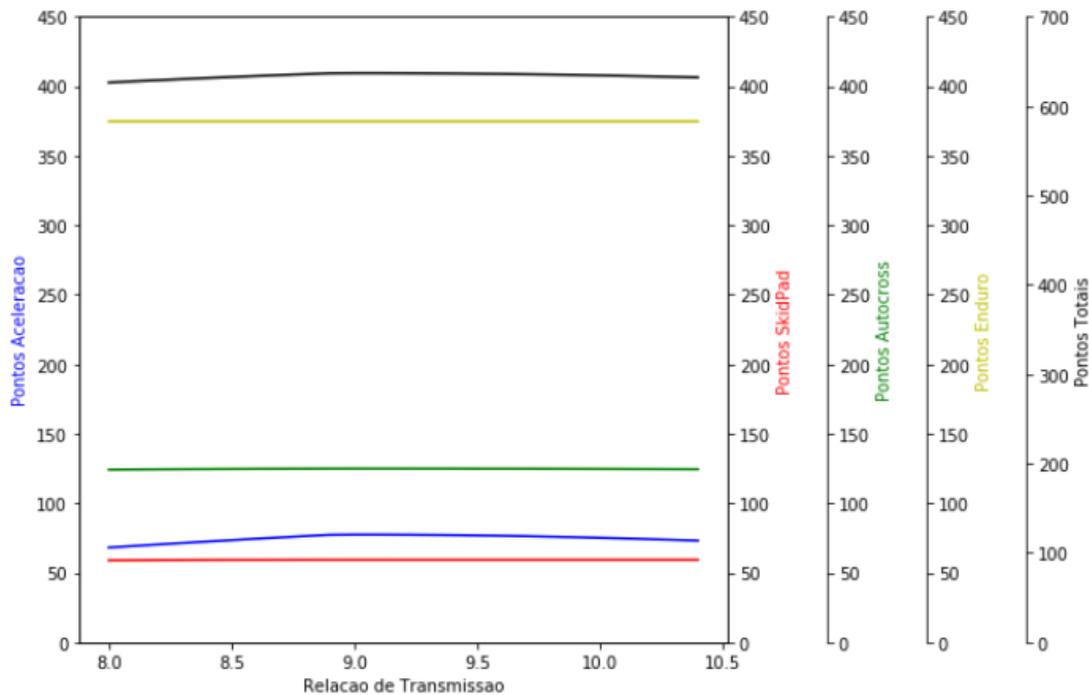
Fonte: Autor(2018)

3.3.3 Simulação para $T_{em} = 25Nm$ e $P_e = 20kW$

Outra simulação realizada considerou uma motorização com um torque eletromagnético máximo de 25 Nm e uma potência máxima de 20 kW. O gráfico apresentando a pontuação obtida por prova, bem como a pontuação geral ao variar-se a relação de redução, é apresentado na Figura 19.

Tem-se que as relações de redução ideais por prova são apre-

Figura 19 – Desempenhos nas provas dinâmicas para $T_{em} = 25Nm$ e $P_e = 20kW$.



Fonte: Autor (2018)

sentadas na Tabela 9. Ao se analisar os resultados percebe-se, como esperado, que as relações de redução diminuíram. Esse fato se deu devido ao aumento do torque do motor, assim necessitando de uma relação de redução menor para atingir as mesmas forças na roda que no caso anterior, barateando e facilitando a fabricação da mesma.

Tabela 9 – Relações de transmissão para $T_{em} = 25Nm$ e $P_e = 20kW$.

Prova Dinâmica	Relação de Transmissão ideal
Aceleração	9
<i>Skid Pad</i>	9
<i>Autocross</i>	9,2
<i>Enduro</i>	8
Conjunto das provas	9

Fonte: Autor(2018)

Já os desempenhos do sistema em questão são apresentados na Tabela 10. Nela pode-se perceber que os tempo obtidos e a pontuação final são expressivamente melhores que nos casos anteriores e nos fazem obter resultados próximos ou melhores que os tempos de referência citados no início dessa seção.

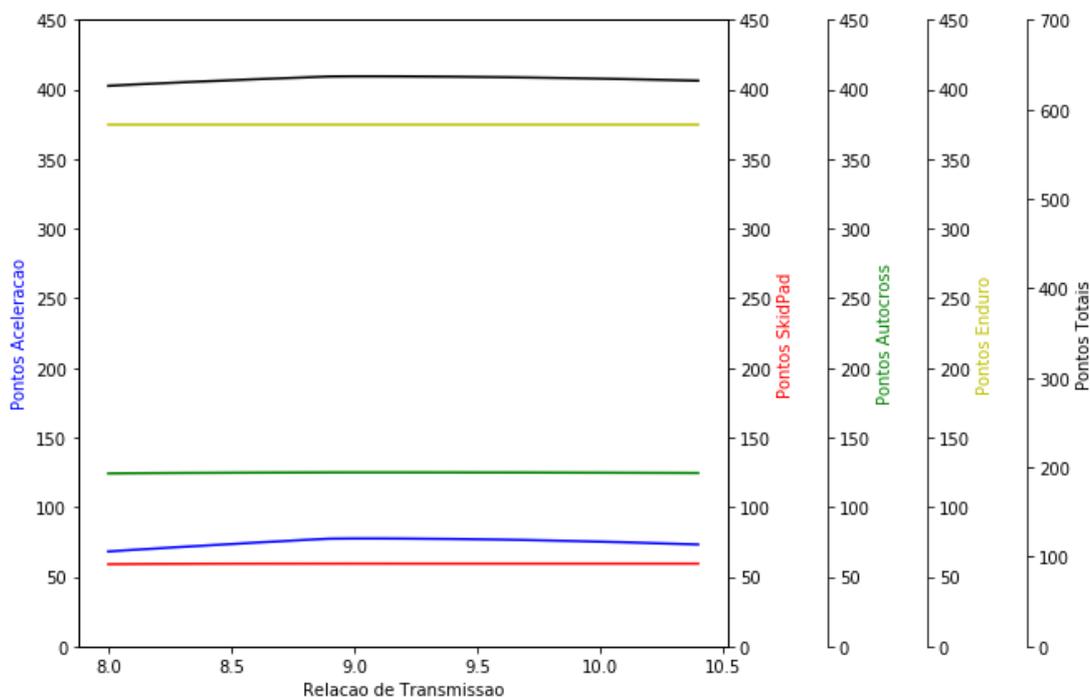
Tabela 10 – Desempenhos para $T_{em} = 25Nm$ e $P_e = 20kW$.

Prova Dinâmica\Desempenho	Pontuação\Tempo
Aceleração	3,77 s
<i>Skid Pad</i>	5,41 s
<i>Autocross</i>	65,02 s
<i>Enduro</i>	65,2 s
Pontuação Total	636,72

Fonte: Autor(2018)

3.3.4 Simulação para $T_{em} = 25Nm$ e $P_e = 25kW$

Na última simulação realizada, se considerou o caso de um sistema de tração com $T_{em} = 25Nm$ e $P_e = 25kW$, ou seja, manteve-se o torque eletromagnético máximo do caso anterior mais a potência máxima foi aumentada. Com isso, obteve-se o gráfico comparando pontuações por prova e pontuação final apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Desempenhos nas provas dinâmicas para $T_{em} = 25Nm$ e $P_e = 25kW$.

Fonte: Autor (2018)

As relações de transmissão ideais obtidas por provas foram semelhantes às do caso anterior. A única que teve uma leve variação foi

a da prova de *autocross*, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Relações de transmissão para $T_{em} = 25Nm$ e $P_e = 25kW$.

Prova Dinâmica	Relação de Transmissão ideal
Aceleração	9
<i>Skid Pad</i>	9
<i>Autocross</i>	9,3
<i>Enduro</i>	8
Conjunto das provas	9

Fonte: Autor(2018)

Já para o caso dos desempenhos obtidos, obteve-se os mesmo resultados do caso anterior. Onde utilizou-se o mesmo torque máximo e uma potência máxima menor.

Tabela 12 – Desempenhos para $T_{em} = 25Nm$ e $P_e = 25kW$.

Prova Dinâmica \ Desempenho	Pontuação \ Tempo
Aceleração	3,77 s
<i>Skid Pad</i>	5,41 s
<i>Autocross</i>	65,02 s
<i>Enduro</i>	65,2 s
Pontuação Total	636,72

Fonte: Autor(2018)

3.4 CARACTERÍSTICAS DA MÁQUINA IDEAL

Tendo em mãos todas as análises, resultados e definições descritas ao longo deste capítulo, teve-se a oportunidade de extrair os parâmetros ideais que o sistema de tração deve possuir para proporcionar o melhor desempenho global nas provas dinâmicas organizadas pela Fórmula SAE Brasil.

Com isso, ao se analisar as Tabelas 6, 8, 10 e 12, percebe-se que as melhores pontuações estão presentes nessas últimas duas situações. Sendo elas o caso de um sistema com $T_{em} = 25Nm$ para ambos, mas diferindo nas potências máximas que valem $P_e = 20kW$ e $P_e = 25kW$ para as Tabelas 10 e 12, respectivamente. Nesses dois casos, as pontuações obtidas são idênticas então, como citado anteriormente, é mais vantajoso se escolher o caso onde a potência necessária é menor, visto

**Protegido sob termo de
sigilo**

4 MODELO ANALÍTICO DO MOTOR

Após definir as especificações do motor desejado, deve-se realizar o seu projeto baseado nestes dados. Porém, o projeto do sistema de tração de um veículo elétrico não é um problema totalmente definido, isso devido ao fato de não existir soluções para todas as especificações dadas e muitas soluções podem atender as mesmas especificações (ROY, 2016). Além disso, na maior parte dos casos existe uma grande complexidade na interação entre os sistemas que compõem a cadeia de tração dos VEs.

Sendo assim, deve-se definir os chamados modelos diretos e indiretos de projetos. A ciência e a engenharia se apoiam sobre o princípio da causalidade, onde se observam os comportamentos naturais do sistema e se desenvolvem modelos que o descrevem. Com isso, os modelos assim desenvolvidos são chamados de modelos comportamentais, no sentido de representarem o comportamento de um sistema a partir das causas (conhecidas) que lhe dão origem. Portanto, esses modelos são chamados de modelos diretos (ROY, 2016).

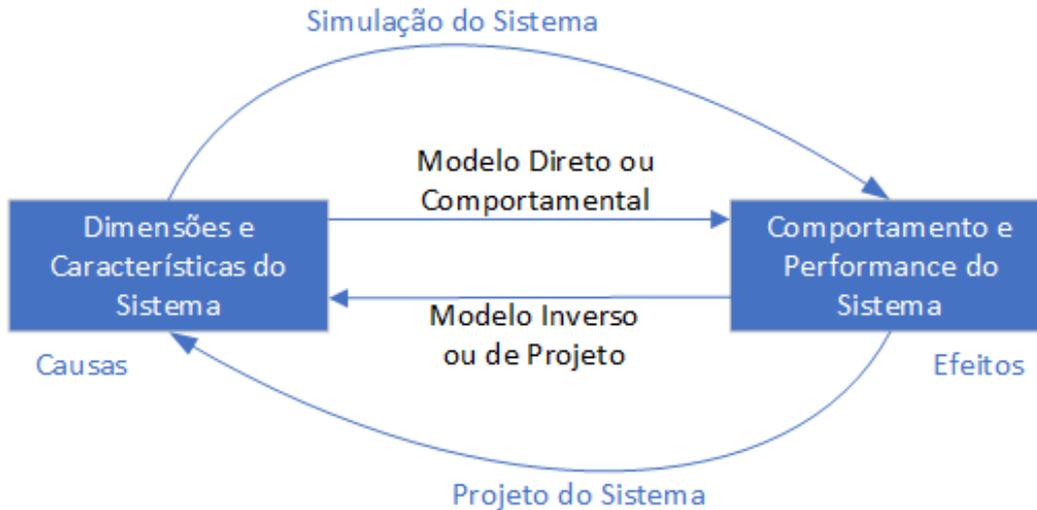
Contudo, o processo de projeto geralmente implica em encontrar as especificações e características do problema em questão para se atingir determinados critérios de desempenhos. Este problema vai ao encontro dos princípios naturais seguindo os princípios da causalidade, ou seja, as causas devem ser determinadas a partir dos desejos de desempenho (ROY, 2016). Com isso, os modelos comportamentais não podem ser aplicados diretamente e devemos utilizar o chamado modelo de projeto, também conhecido como modelo inverso.

Nos capítulos anteriores, as características do motor desejado foram definidas. Dessa forma, o projeto será realizado através do modelo inverso, ou seja, impondo as características de potência, rotação etc, para se obter as características naturais do sistema. As características naturais correspondem aos aspectos construtivos do motor, quer dizer, às dimensões, números de enrolamentos, materiais etc. Daí a importância de se desenvolver um modelo analítico que relacione os parâmetros conhecidos com os desconhecidos, o que nos permitirá o cálculo dos aspectos dimensionais da máquina.

Considerando o caso da resolução de problemas através de modelos inversos, é comum adotar a utilização de algoritmos de otimização que nos ajudem a encontrar uma solução otimizada que satisfaça os desempenhos desejados (ROY, 2016). Dessa maneira, após descrever o modelo analítico adotaremos alguns critérios para se realizar esta oti-

mização. Na Figura 21, tem-se uma ilustração das relações existentes entre os modelos direto e indireto.

Figura 21 – Ilustração da relação entre os modelos comportamental e de projeto.



Fonte: Autor (2018)

4.1 METODOLOGIA DE ANÁLISE

Um modelo analítico é baseado em numerosas equações que são usadas para avaliar as dimensões, os parâmetros eletromagnéticos e os parâmetros elétricos da máquina. Sendo que, cada equação do modelo descreve um fenômeno ou hipótese associada ao problema (BRAIWISH, 2016). Dependendo do problema e função objetivo, temos variáveis que serão mantidas constantes e outras que serão variadas de acordo com as funções de otimização.

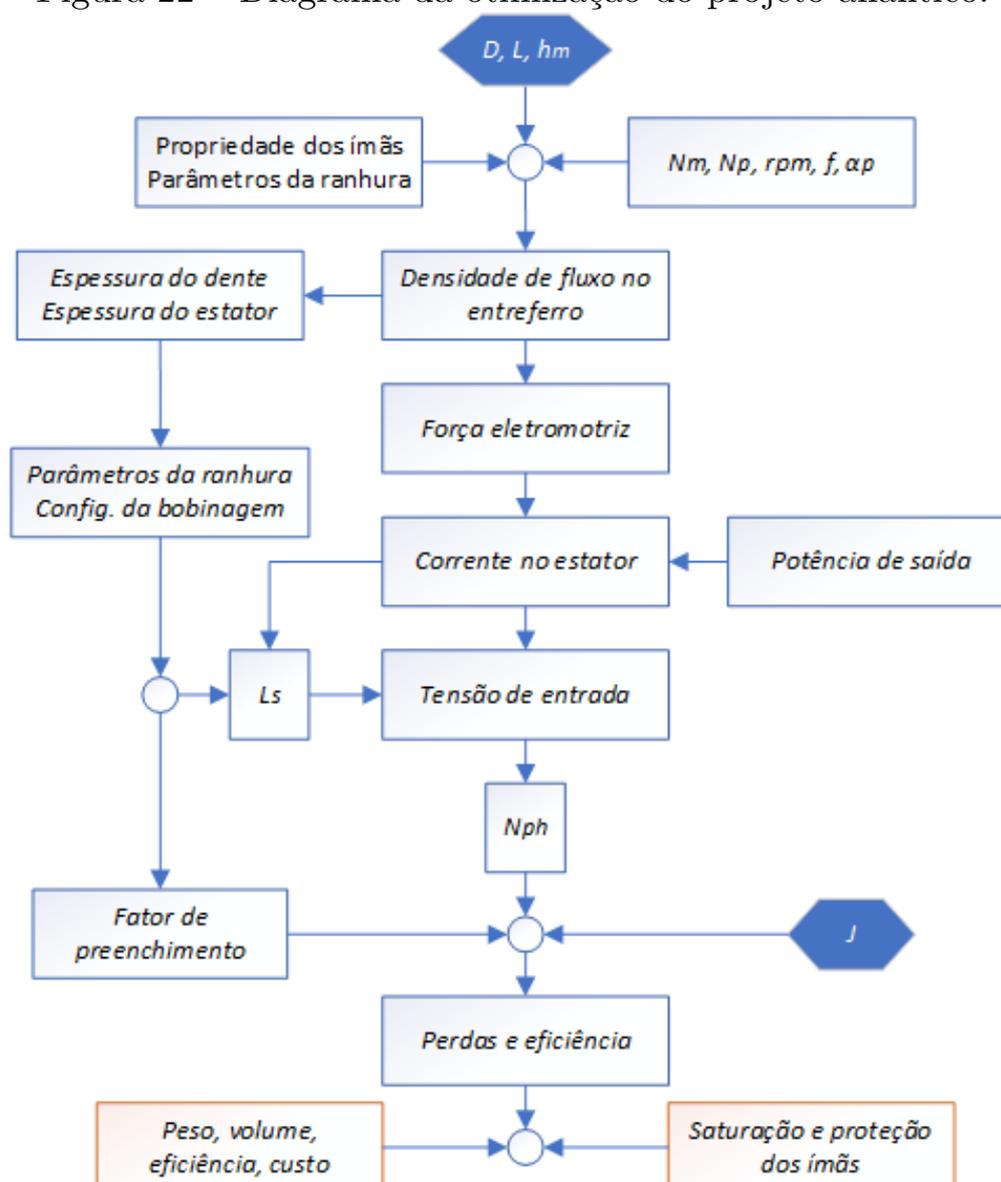
Teve-se como base para o projeto analítico o conjunto de equações descritas em (ROY, 2016) e (BRAIWISH, 2016). Fazendo uso dessas referências, escolheu-se algumas variáveis para serem modificadas pelo algoritmo de otimização, o qual será descrito no próximo capítulo. Sendo que, elas são modificadas a cada interação e servem como base para o cálculo de parâmetros dimensionais, eletromagnéticos, elétricos e térmicos do motor.

Estas variáveis primárias são o diâmetro interno do estator (D), o comprimento do pacote do motor (L), a espessura dos ímãs (h_m) e a densidade de corrente elétrica (J). Após os cálculos do modelo analítico, a saída da função multiobjetivo é calculada e uma nota é

atribuída à cada conjunto de variáveis primárias de acordo com os critérios de otimização.

Enquanto as variáveis primárias mudam constantemente, o problema de otimização considera algumas variáveis como constantes ou dentro de um certo máximo e mínimo, isso a fim de assegurar apenas soluções realizáveis fisicamente. Essas limitações correspondem a propriedades dos materiais, valores tipicamente utilizados em projetos desta natureza ou resultados prévios obtidos a partir de *softwares* de análises por elementos finitos (EF). Na Figura 22, é apresentado um diagrama que sintetiza o procedimento de projeto através do modelo analítico da máquina.

Figura 22 – Diagrama da otimização do projeto analítico.



Fonte: Adaptado de (BRAIWISH, 2016)

4.2 SELEÇÃO DE PARÂMETROS

Nesta seção o processo de seleção de parâmetros é iniciado, os quais serão escolhidos de maneira a melhorar o desempenho do motor. A escolha dos mesmos é baseada em análises segundo o modelo analítico e EF, além de se levar em conta resultados empíricos obtidos de outros trabalhos. Sendo assim, parâmetros como o número de ranhuras, o número de polos e o formato dos ímãs serão abordados nessa seção.

4.2.1 Número de Ranhuras por Polo

Em projetos de máquinas elétricas, a escolha do número de ranhuras por polo é de extrema importância, sendo que essa combinação depende de múltiplos fatores como a configuração das bobinas, distribuição do material magnético e a velocidade de rotação (BRAIWISH, 2016).

Para se encontrar um valor ideal na relação do número de ranhura e polo, poderia-se incluir essa variável entre os parâmetros de otimização. Contudo, essa solução iria complicar o problema de otimização, além de aumentar o esforço computacional e, conseqüentemente, o tempo de cálculo.

No que diz respeito ao número de polos, deve-se levar em consideração a velocidade máxima de rotação para definir essa grandeza. Visto que, a velocidade de rotação é proporcional à frequência e, se ela é diminuída, conseqüentemente as perdas no ferro do motor serão minimizadas (ROY, 2016). Por outro lado, toda vez que o número de polos é dobrado, a espessura do estator se reduz a metade (BRAIWISH, 2016), o que possibilita a confecção de uma máquina mais compacta. Porém, aumentando o número de polos, se vê necessário aumentar o diâmetro do motor para alojá-los. Sendo assim, deve-se levar em conta estas relações de ganhos e perdas para definir o valor dessa grandeza.

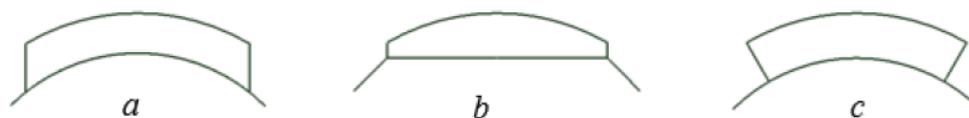
Motores à ímãs permanentes normalmente possuem uma alta distorção de torque, que segundo (BRAIWISH, 2016) é composta principalmente pelo *cogging torque* e *torque ripple* provenientes da má escolha do número de ranhuras por polo e do coeficiente de abertura dos ímãs (α_p). Geralmente as distorções de torque não são desejáveis e degradam o desempenho da máquina.

O *cogging torque* é definido como a oscilação de torque causada pela tendência do rotor se alinhar com o estator em uma direção particular (WANG; YUBO; DAJIN, 2003). Já o *torque ripple*, também chamado

**Protegido sob termo de
sigilo**

**Protegido sob termo de
sigilo**

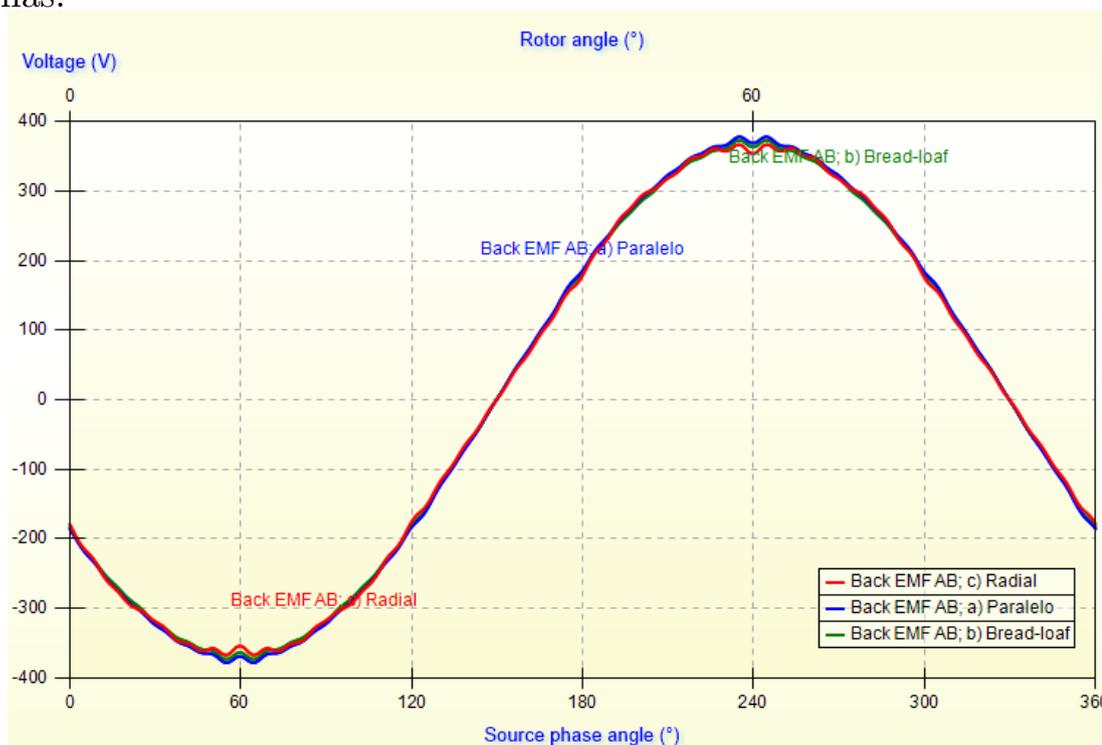
Figura 24 – Topologias de ímãs em superfície.



Fonte: (BRAIWISH, 2016)

Assim, fazendo uso das estruturas apresentadas na Figura 24, simulou-se as três topologias em uma máquina genérica e se observou a força eletromotriz resultante, sendo a que se aproximar mais de um sinal senoidal, a melhor escolha para o projeto em questão. Essas simulações são apresentadas na Figura 25, onde pode-se perceber que as topologias (b) e (c) estão sobrepostas e possuem menos distorção do que a topologia (a). Com isso, para se fazer a seleção da estrutura, dentre as duas que apresentaram melhores resultados, considera-se os aspectos mecânicos envolvidos. Portanto, se levar em consideração as forças de cisalhamento, a estrutura contendo a base plana, ou seja, a configuração *bread-loaf* proporciona a maior robustez e, dessa forma, é mais adequada ao projeto da máquina de alta rotação.

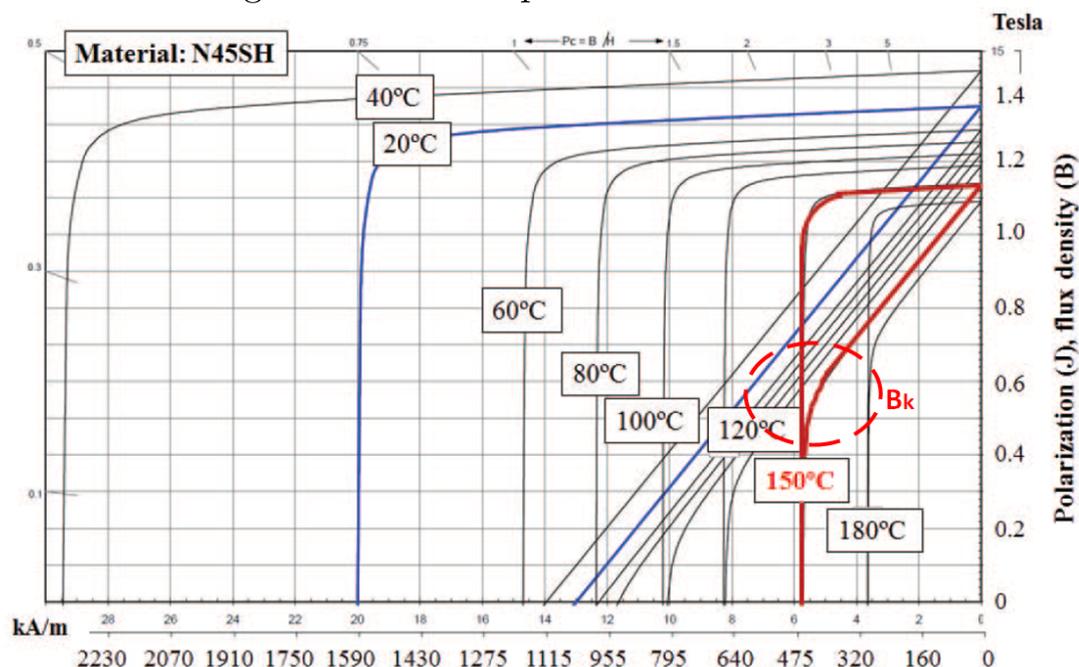
Figura 25 – Força eletromotriz resultante para diferentes topologias de ímãs.



Fonte: Autor(2018)

**Protegido sob termo de
sigilo**

Figura 26 – Desempenhos do ímã N45SH.



Fonte: (NUKKI; LEHTLA; KILK, 2015)

custo e perdas. Contudo, como este projeto está sendo patrocinado pela empresa *Hércules Motores*, o setor de engenharia foi contatado e o aço de melhor qualidade que a empresa possui foi selecionado. Trata-se do aço ISOVAC M330-35A que não é dos melhores presentes no mercado, mas para o projeto em questão se mostrou aceitável. Nas próximas seções, as características deste material serão detalhadas mais precisamente.

Em relação ao eixo e carcaça do motor, após realizar o dimensionamento da máquina será possível selecionar o diâmetro de eixo e simular o torque presente na chaveta e interfaces do mesmo, dessa forma, haverá embasamento para validar essa estrutura. Já a carcaça será uma composição de alumínio injetado e alumínio aeronáutico, de maneira a acrescentar leveza e robustez ao sistema, como detalharemos no capítulo final.

4.3 MODELO ANALÍTICO COM VARIÁVEIS PRIMÁRIAS

Nesta seção descreve-se o modelo analítico do motor BLAC baseado nas variáveis primárias definidas até o momento. Porém, ainda tem-se que abordar a tensão no banco de baterias do veículo e a velocidade de rotação base para os cálculos da máquina.

**Protegido sob termo de
sigilo**

4.3.1 Densidade de Fluxo no Entreferro

Segundo (BRAIWISH, 2016), a amplitude do fundamental pode ser calculada baseada nas equações (4.5) e (4.6), as quais ilustram os cálculos da densidade de fluxo no entreferro e a amplitude do primeiro harmônico do fluxo no entreferro, respectivamente.

$$B_g = \frac{f_{LKG} \cdot \alpha_p \cdot B_r}{1 + \frac{f_{LKG} \cdot g' \cdot \mu_m \cdot \alpha_p}{h_m}} \quad (4.5)$$

$$B_{g(1)} = 4 \cdot \pi \cdot B_g \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \alpha_p}{2}\right) \quad (4.6)$$

Onde, f_{LKG} representa o coeficiente de dispersão do fluxo no entreferro que, segundo (HENDERSHOT; MILLER, 1995), possui valor típico de 0,95 para máquinas pequenas como a desse trabalho. O parâmetro μ_m corresponde a permeabilidade relativa dos ímãs, que vale aproximadamente 1 para o caso do *NdFeB*. Já g' corresponde ao entreferro equivalente, dado por (4.7).

$$g' = g \cdot k_c \quad (4.7)$$

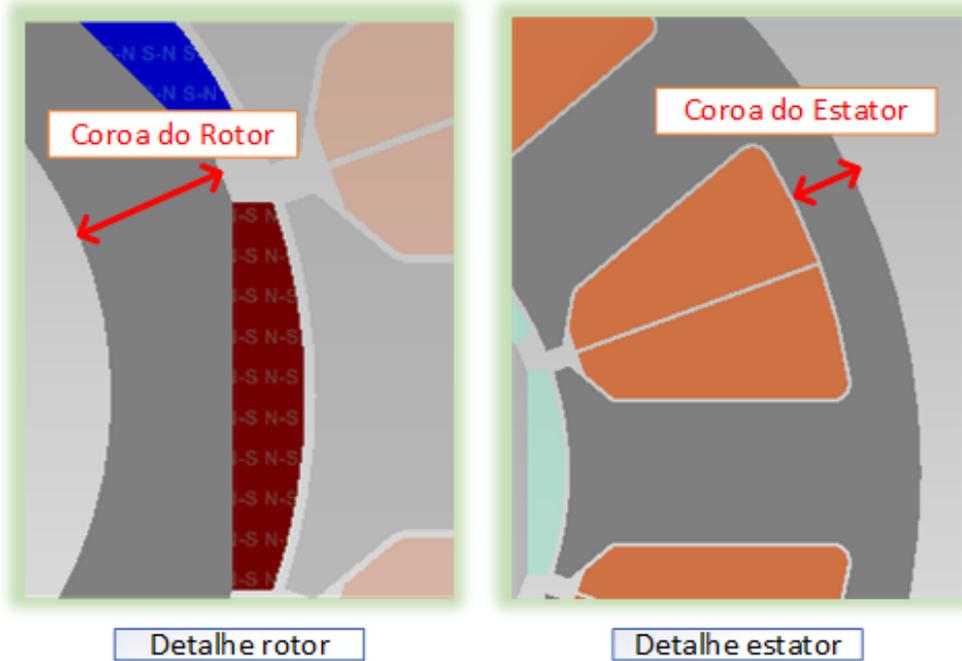
Nesta mesma equação, o termo g corresponde ao entreferro efetivo da máquina e k_c ao coeficiente de Carter, que é calculado levando-se em consideração as aberturas das ranhuras da máquina. Para a escolha desses dois coeficientes levou-se em consideração valores típicos para máquinas deste porte, com isso o entreferro é de 0,5mm e o coeficiente de Carter vale 1.

Através da amplitude do fluxo magnético calculada no entreferro, pode-se determinar os parâmetros elétricos no diagrama fasorial e geometrias do estator e rotor. A densidade de fluxo no entreferro é utilizada para se obter o fluxo por polo, o qual tem a amplitude do seu fundamental dada em (4.8). Onde A_g é a área no entreferro sob um polo da máquina.

$$\phi_{(1)} = B_{g(1)} \cdot A_g = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot L}{N_p} \cdot B_{g(1)} \quad (4.8)$$

Tendo conhecimento do fluxo no entreferro e se conhecendo as propriedades do aço utilizado no projeto, calcula-se as espessuras das coroas do estator e do rotor, aqui representadas por S_{ebi} e R_{ebi} , respectivamente. Na Figura 27, se apresenta o local correspondente à estas grandezas na máquina.

Figura 27 – Detalhes das espessuras do estator e rotor.



Fonte: Autor (2018)

Segundo (BRAIWISH, 2016), antes de calcular o campo de reação na armadura, pode-se considerar a densidade de fluxo no joelho da curva $B \times H$ do aço. Dessa forma, obtêm-se a variável B_{knee} como a máxima indução imposto no aço. O seu valor gira em torno de 1,35T para o aço M330-35A, conforme ilustrado no gráfico da Figura 28, a qual foi obtido em (KEDOUS-LEBOUC; MESSEL; YOUNSSI, 2017) através do ensaio de chapas com larguras de 15, 10, 5 e 3mm. Nela ainda apresentam-se os pontos máximos de indução e saturação do aço.

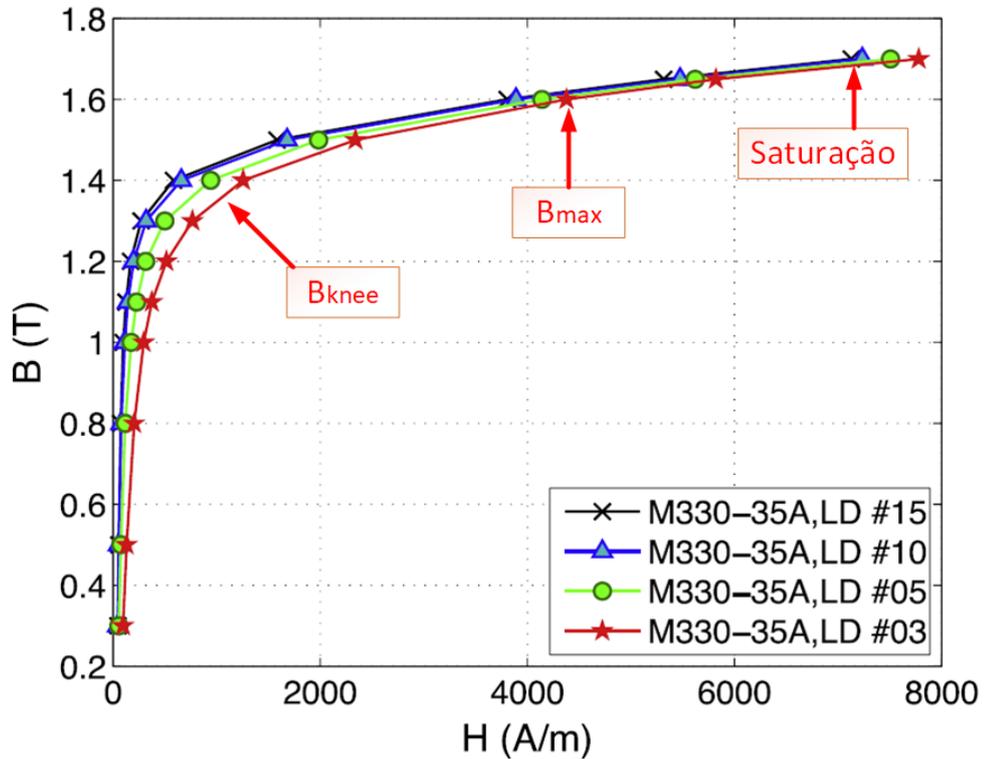
Para realizar o cálculo da espessura das coroas do estator e do rotor, ainda é preciso definir o fator de empilhamento de laminação, definido como k_s . Esse parâmetro compreende a relação entre o volume total de ferro do estator/rotor e o volume total do estator/rotor, sendo que o seu valor varia tipicamente entre 0,95 e 1. Aqui, considerou-se k_s igual a 0,95.

Com isso, as dimensões da coroa do estator e do rotor são dadas por (4.9) e (4.10), respectivamente.

$$S_{ebi} = \frac{\phi_{(1)}}{2 \cdot B_{knee} \cdot L \cdot k_s} \quad (4.9)$$

$$R_{ebi} = \frac{\phi_{(1)}}{2 \cdot B_{knee} \cdot L \cdot k_s} \quad (4.10)$$

Figura 28 – Curvas $B \times H$ para chapas de aço M330-35A com diferentes larguras.



Fonte: Adaptado de (KEDOUS-LEBOUC; MESSEL; YOUNSSI, 2017)

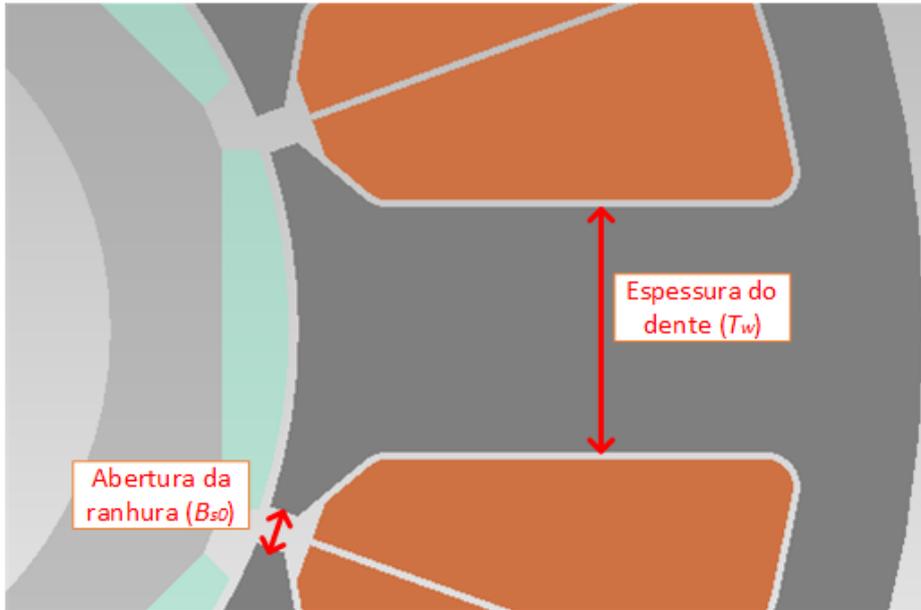
Segundo (BRAIWISH, 2016), a espessura dos dentes no estator devem ser calculadas se considerando o chamado fator de concentração no dente, dado pela Equação (4.11). Onde B_{s0} é a abertura da ranhura, sendo um valor escolhido de acordo com as dimensões da máquina e da bobinagem. Para motores como o deste projeto, é convencional utilizar valores em torno de 3,5mm. Na Figura 29 apresenta-se detalhe do dente e abertura de ranhura.

$$k_{ds} = \frac{\pi \cdot \frac{D}{N_m}}{\pi \cdot \frac{D}{N_m} - B_{s0}} \quad (4.11)$$

Por fim, tem-se condições de calculamos a espessura dos dentes da máquina conforme (4.12).

$$T_w = \frac{\phi_{(1)} \cdot k_{ds}}{B_{knee} \cdot L \cdot k_s} \quad (4.12)$$

Figura 29 – Detalhe do dente e abertura de ranhura da máquina.



Fonte: Autor(2018)

4.3.2 Dimensões dos Ímãs

A partir desse momento, tem-se condições de calcular as dimensões dos ímãs presentes em cada polo da máquina. Como abordado anteriormente, a topologia escolhida é do tipo *bread-loaf*. Sendo que, as suas variáveis dimensionais são apresentadas na Figura 30.

Em um primeiro momento definiremos o diâmetro e o raio externo do ímã, dados pelas expressões (4.13) e (4.14), respectivamente.

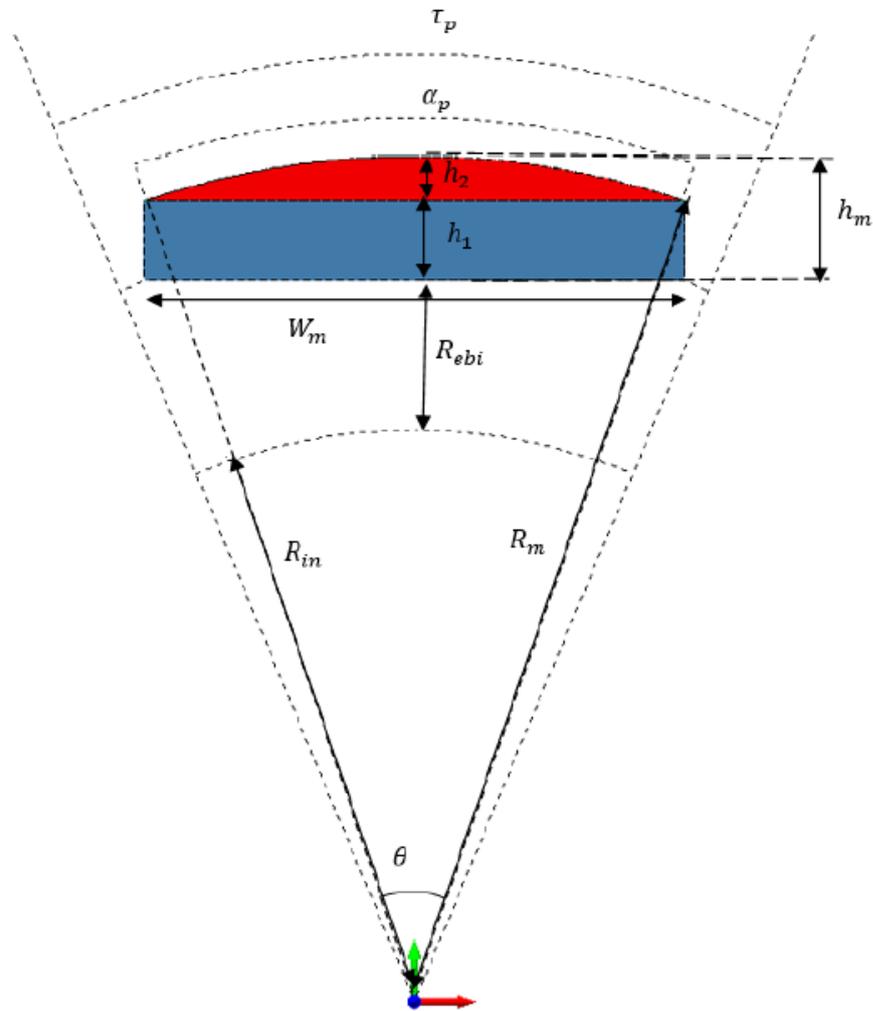
$$D_{mag} = D - 2 \cdot g \quad (4.13)$$

$$R_m = \frac{D_{mag}}{2} \quad (4.14)$$

Além disso, pode-se calcular o diâmetro interno do rotor, dado pela expressão (4.15); o passo do ímã em graus, dado em (4.16); o comprimento da base do ímã, conforme expressão (4.17); e as espessuras da parte retangular e do arco do ímã, de acordo com (4.18), (4.19) e (4.20). A Figura 30 ilustra os parâmetros dimensionais do ímã.

$$R_{in} = D_{mag} - 2 \cdot (h_m + R_{ebi}) \quad (4.15)$$

Figura 30 – Detalhe das variáveis dimensionais de um polo magnético.



Fonte: (BRAIWISH, 2016)

$$\theta = \frac{360}{N_p} \cdot \alpha_p \quad (4.16)$$

$$W_m = 2 \cdot R_m \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (4.17)$$

$$hm1 = \sqrt{(R_m)^2 - \left(\frac{W_m}{2}\right)^2} \quad (4.18)$$

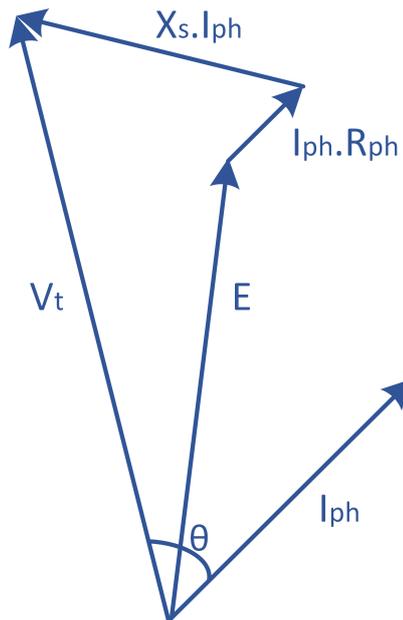
$$hmt = R_m - hm1 \quad (4.19)$$

$$hm2 = h_m - hmt \quad (4.20)$$

4.3.3 Cálculos dos Parâmetros Elétricos

Ainda é preciso extrair os parâmetros elétricos da motor e, para tal, utiliza-se o diagrama fasorial para máquinas síncronas conforme ilustrado na Figura 31.

Figura 31 – Diagrama fasorial de uma máquina síncrona.



Fonte: Autor(2018)

No diagrama, tem-se que a tensão RMS na entrada da máquina, dada por V_t , é calculada pela expressão (4.21), conforme (BRAIWISH, 2016). Já parâmetros como o fundamental da força eletromotriz na máquina (E), a resistência em uma fase (R_{ph}), a indutância síncrona (L_s) e a corrente de fase (I_{ph}) podem ser aproximadas utilizando-se a relação proveniente do diagrama fasorial, conforme dado em (4.22). Nesta equação, X_s é a reatância síncrona da máquina.

$$V_t = \frac{V_{dc} - 10}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}} \quad (4.21)$$

$$\vec{V}_t = \vec{E} + (R_{ph} + jX_s) \cdot \vec{I}_{ph} \quad (4.22)$$

Enquanto o fluxo gerado pelos ímãs se relacionado com as bobinas do estator, a força eletromotriz é proporcional a rotação da máquina. Assim, assumindo que o fluxo no entreferro possui uma forma senoidal com um fundamental $\phi_{(1)}$ e que o fluxo produzido pelos ímãs se relaciona com as bobinas, tem-se que o fundamental da força eletro-

**Protegido sob termo de
sigilo**

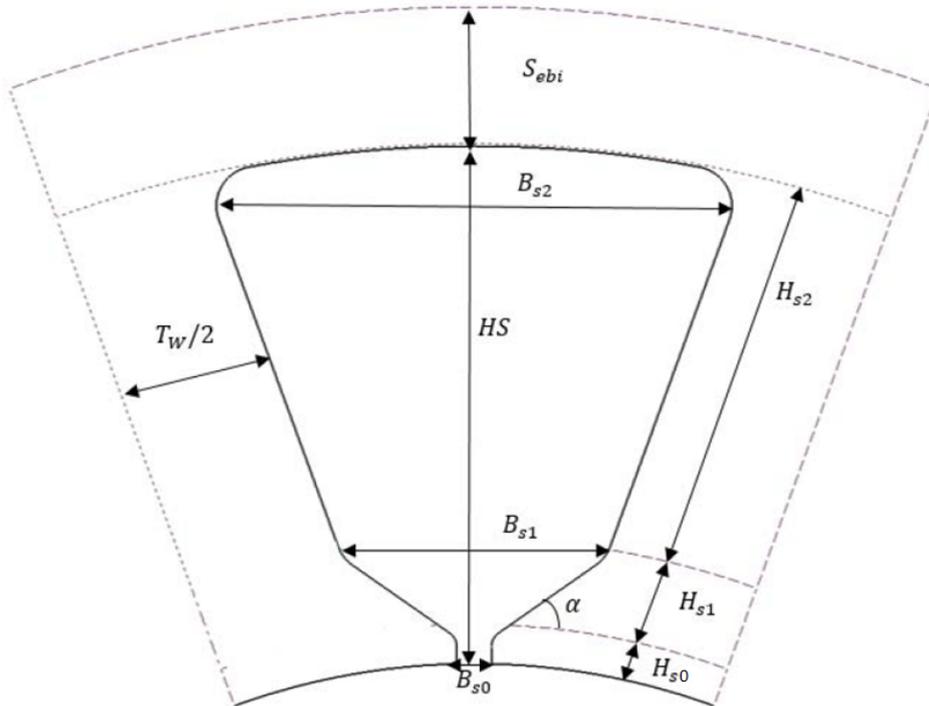
então a expressão (4.29).

$$L_{sl} = \frac{4 \cdot \mu_0 \cdot L \cdot N_{ph}^2}{N_p \cdot q} * \lambda_{sl} \quad (4.29)$$

Onde q é o número de ranhuras por polo e por fase. Já a variável λ_{sl} corresponde ao coeficiente de dispersão nas ranhuras e é calculado através dos parâmetros dimensionais da mesma, conforme Equação (4.30). Na Figura 32 apresenta-se em detalhes uma ranhura e a posição de cada uma das dimensões a ser calculada ou definida.

$$\lambda_{sl} = \left(\frac{2}{3} \frac{H_{s2}}{B_{s1} + B_{s2}} + \frac{2 \cdot H_{s1}}{B_{s0} + B_{s1}} + \frac{H_{s0}}{B_{s0}} \right) \cdot \frac{1 + 3 \cdot \left(\frac{N_m}{N_p} \right)}{4} \quad (4.30)$$

Figura 32 – Ranhura em detalhes.



Fonte: (BRAIWISH, 2016)

Dados os parâmetros dimensionais apresentados na Figura 32, sabe-se que o ângulo de abertura da ranhura (α) é definido como sendo igual a 30° , tendo como base valores de máquinas semelhantes. Já o parâmetro H_{s0} vale 1,5mm; H_{s1} é calculado segundo a expressão (4.31); H_{s2} é dado pela Equação (4.32); B_{s1} pela Equação (4.33); e B_{s2} pela Equação (4.34). Tem-se ainda o parâmetro H_s que corresponde a altura

da ranhura, a qual é calculado pela soma de H_{s0} , H_{s1} e H_{s2} .

$$H_{s1} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{D \cdot \pi}{9} - B_{s0} - T_w \right) \cdot \tan(\alpha) \quad (4.31)$$

$$H_{s2} = 2 \cdot T_w \quad (4.32)$$

$$B_{s1} = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot (H_{s0} + H_{s1}))}{N_m - T_w} \quad (4.33)$$

$$B_{s2} = 1,5 \cdot B_{s1} \quad (4.34)$$

A indutância restante a ser calculada é a de cabeça de bobina. Contudo, devido a complexa conformação dos enrolamentos nas cabeças de bobina o seu cálculo exato é difícil de ser realizado (BRAIWISH, 2016). O seu valor é bastante pequeno e depende principalmente do número de camadas e do comprimento dos arcos semicirculares do enrolamento final, isto é, do passo de enrolamento dado por τ_c (Equação (4.35)). Na Equação (4.36), é apresentada uma formulação simples que permite calcular a indutância de cabeça de bobina para o caso de estarmos utilizando duas camadas de bobinas por ranhura. Já para o caso de uma camada, devemos substituir o coeficiente 16 por 8 na equação.

$$\tau_c = \frac{\pi \cdot (D + H_{s2})}{N_m} \quad (4.35)$$

$$L_{ew} = \frac{\mu_0 \cdot \tau_c \cdot N_{ph}^2}{16} \cdot \ln \left(\frac{\pi \cdot \tau_c^2}{4 \cdot H_s \cdot \frac{B_{s1} + B_{s2}}{2}} \right) \quad (4.36)$$

A fim de finalizar os cálculos dos parâmetros elétricos da máquina, ainda é preciso calcular o valor do número de espiras das bobinas de fase (N_{ph}). Esse parâmetro está relacionado às expressões das indutâncias e força eletromotriz, sendo assim, pode-se utilizar a expressão extraída do diagrama fasorial (Equação (4.22)) para calcular essa variável. Dessa maneira, considerou-se a resistência de fase (R_{ph}) como desprezível e calculou-se as expressões de I_{ph} , E e X_s utilizando as variáveis conhecidas, de maneira a escreve-las em função de N_{ph} , sendo assim, obtêm-se as variáveis I_{ph0} , E_0 e X_{s0} , respectivamente. Com isso, estas expressões em função de N_{ph} são aplicadas na Equação (4.22) e o termo N_{ph} é isolado, ação que proporcionou a Equação (4.37). Estes cálculos estão presentes no "Apêndice A".

$$N_{ph} = \frac{\sqrt{(V_t \cdot E_0)^2 + (V_t \cdot X_{s0} \cdot I_{ph0})^2}}{E_0^2 + (X_{s0} \cdot I_{ph0})^2} \quad (4.37)$$

Tendo definido o número voltas por espira, calcula-se a força eletromotriz e a corrente de fase conforme Equações (4.23) e (4.24), respectivamente. Também pode-se calcular a seção do condutor e, para tal, faz-se uso da densidade de corrente (J) fornecida pelo algoritmo de otimização, conforme Equação (4.38).

$$A_{wire} = \frac{I_{ph}}{J} \quad (4.38)$$

A partir da seção do condutor pode-se calcular a resistência de fase R_{ph} , a qual é dada pela Equação (4.39). Onde ρ_{cu} corresponde a resistividade do cobre e tem-se que a variável L_{wire} corresponde ao comprimento do condutor, ou seja, a soma das distâncias longitudinais e das cabeças de bobinas dos condutores, onde o seu calculo é expressado pela Equação (4.40). Também calcula-se a área de cobre na ranhura, dada pela Equação (4.41).

$$R_{ph} = \frac{\rho_{cu} \cdot L_{wire}}{A_{wire}} \quad (4.39)$$

$$L_{wire} = N_{ph} \cdot 2 \cdot L + N_{ph} \cdot 2 \cdot \frac{\pi \cdot (D + H_s)}{N_m} \quad (4.40)$$

$$A_{cu} = \frac{A_{wire} \cdot N_{ph}}{q \cdot \frac{N_p}{2}} \quad (4.41)$$

Agora que a área de cobre é conhecida, pode-se retomar os cálculos das dimensões da ranhura e, dessa vez, se obter as dimensões que serão aplicadas definitivamente ao projeto. Sendo assim, deve-se começar definindo o fator de preenchimento da ranhura (k_{fill}), do inglês *fill factor*, o qual foi escolhido como sendo 0,5 que, segundo (DAJAKU; GERLING, 2010), é um valor convencional para máquinas com enrolamentos de duas camadas por ranhura, como a deste trabalho. Através do fator de preenchimento k_{fill} e da área de cobre A_{cu} , calcula-se a área da ranhura conforme a Equação (4.42).

$$A_s = \frac{A_{cu}}{k_{fill}} \quad (4.42)$$

Tendo conhecimento da área da ranhura, se torna possível calcular as suas dimensões de maneira a atender essa área obtida. Para

tal, serão mantidos alguns parâmetros com valores pré definidos, como o caso do B_{s0} , H_{s0} e α , os quais valem 3,5mm, 1,5mm e 30° , respectivamente. Os outros parâmetros são calculas através da função interna *fsolve* do *Matlab*, de acordo com o código do "Anexo A".

A parti do momento que os valores dimensionais da ranhura da máquina são conhecidos, pode-se recalculas as indutâncias e, com isso, obter valores mais precisos. Outro parâmetro que é calculado a partir do momento que as dimensões da ranhura são conhecidas é o diâmetro externo do estator, dado por (4.43).

$$S_{OD} = D + 2 \cdot (H_s + S_{ebi}) \quad (4.43)$$

4.4 MODELAGEM DE PERDAS E EFICIÊNCIA

Durante o processo de conversão de energia em máquinas elétricas, ocorrem perdas de energia que são dissipadas nos componentes da máquina em forma de calor. Com isso, essas perdas podem ser computadas e utilizadas para se gerar um modelo térmico da máquina, além de medirem a eficiência e, por consequência, nos impor a utilização de um número maior ou menor de baterias para o caso de veículos elétricos.

Geralmente, tem-se duas fontes primárias de perdas, sendo elas as perdas eletromagnéticas e as perdas mecânicas. As perdas eletromagnéticas compreendem as perdas no cobre (P_{cu}) e as no núcleo de ferro (P_{core}) e, em máquinas pequenas, elas são dominantes e correspondem a maior porcentagem de perdas nas máquina (BRAIWISH, 2016). Já as perdas mecânicas estão ligadas ao atrito como rolamentos e aerodinâmico, sendo assim proporcionais a velocidade de rotação e carga no eixo da máquina, estas contribuem para uma pequena fração da perda total.

4.4.1 Perdas no Cobre

As perdas no cobre são provenientes do fluxo de corrente nos enrolamentos do estator e, para máquinas trifásicas como a deste trabalho, elas são calculadas segundo a Equação (4.44).

$$P_{cu} = 3 \cdot R_{ph} \cdot I_{ph}^2 \quad (4.44)$$

Como abordou-se na seção anterior, as variáveis R_{ph} e I_{ph} correspondem às resistência e corrente de fase, respectivamente.

4.4.2 Perdas no Núcleo de Ferro

As perdas no ferro dependem da densidade de fluxo no núcleo e da frequência que é gerada principalmente na coroa do estator, na coroa do rotor e dentes do estator (BRAIWISH, 2016). A perda total no núcleo de ferro é dada pela soma das perdas por histerese (P_{hys}) e por correntes de *Foucault* (P_{edd}). A componente de histerese está associada à mudança de magnitude e direção da magnetização dos domínios magnéticos, enquanto a perda por correntes de *Foucault* é gerada por correntes induzidas nas lâminas de material magnético (BRAIWISH, 2016). Portanto, a perda no núcleo de ferro é calculada como uma soma linear de P_{hys} e P_{edd} , conforme Equação (4.45) em que o primeiro termo representa as perdas por histerese e o segundo por correntes de *Foucault*.

$$P_{core} = (k_h \cdot f^{\alpha_c} \cdot B_{max}^{\beta} + K_e \cdot (f \cdot B_{max})^2) \cdot Wt_{core} \quad (4.45)$$

Na Equação (4.45), B_{max} é a densidade de fluxo máxima admitida no núcleo de ferro, a qual será abordada quando as funções penalidades forem introduzidas. Já o termo k_h é o coeficiente de histerese, k_e é o coeficiente de corrente de *Foucault*, α_c e β são coeficientes que dependem do material e Wt_{core} é peso do núcleo de ferro. Esses coeficiente foram obtidos em (BRAIWISH, 2016), e seus respectivos valores estão presentes no código apresentado no "Anexo A" deste trabalho. Por fim, o parâmetro Wt_{core} é apresentado na expressão (4.46), onde Wt_{Sebi} , Wt_{Rebi} e Wt_{Tw} são, respectivamente, os pesos da coroa do estator, da coroa do rotor e dos dentes do estator.

$$Wt_{core} = Wt_{Sebi} + Wt_{Rebi} + Wt_{Tw} \quad (4.46)$$

No problema de otimização não são abordadas as perdas por corrente de *Foucault* presentes nos ímãs de neodímio, os quais são materiais condutores e estão sujeitos a indução de correntes. Contudo, ao realizar as simulações no *software* de elementos finitos (EF), estas correntes serão levadas em consideração.

4.4.3 Perdas Mecânicas

As perdas mecânicas compreendem as perdas por atrito dos rolamentos P_{fric} e por atrito do ar com as partes móveis no interior da

carcaça da máquina P_{wind} .

Contudo, segundo (BRAIWISH, 2016), estas perdas só se tornam significantes em máquinas com rotações que atinjam entre 20.000 - 200.000 rpm. Então, como a máquina que está sendo desenvolvida neste trabalho possui uma rotação de até 15.000 rpm, estas perdas não seriam significantes para serem consideradas no modelo analítico. Porém, para efeito de aproximação, é comum se considerar que essas perdas sejam em torno de 1% da potência de saída do sistema.

Tendo levantado todas as perdas presentes no sistema, pode-se calcular o rendimento da máquina segundo a Equação (4.47).

$$\eta_{mot} = \frac{P_e}{P_e + P_{cu} + P_{core} + P_{wind} + P_{fric}} \quad (4.47)$$

4.5 ANÁLISE TÉRMICA

Os modelos analíticos magnéticos e elétricos são projetados para garantir a entrega de potência e torque a uma velocidade requerida com eficiência considerável. Já o modelo térmico é projetado para garantir a adequação do projeto da máquina em termos de manter a temperatura dos componentes dentro de certos limites em condições nominais de operação (BRAIWISH, 2016). Os principais objetivos deste modelo são garantir que os ímãs permanentes não sejam desmagnetizados em decorrência da temperatura e impedir a deterioração do material de isolamento dos enrolamentos. Portanto, o modelo térmico é de extrema importância na validação da máquina elétrica.

Neste projeto, realizou-se a análise térmica através de simulações utilizando-se de métodos de elementos finitos. Como nem todas as perdas existentes no sistema foram dimensionadas, como o caso das correntes induzidas nos ímãs permanentes, a análise térmica não foi considerada no decorrer dos cálculos analíticos. Contudo, conforme citado nas seções precedentes, considerou-se a máquina operando próximo da temperatura máxima suportada pelos ímãs, em 140°C sendo que os ímãs suportam até 150°C.

As simulações térmicas realizadas pelo método de elementos finitos serão apresentadas no Capítulo 6, onde simulou-se as condições de operação da máquina nas diferentes provas da competição organizada pela Fórmula SAE Brasil e obteve-se as temperaturas presentes em cada componente da motor. Caso alguma temperatura ultrapasse as características físicas de determinado componente, os cálculos analíticos

serão retomados e as alterações necessárias serão realizadas para que as condições de operação de cada componente sejam respeitadas.

4.6 FUNÇÕES PENALIDADES

Para se garantir um projeto viável, deve-se restringir valores máximos e mínimos para certos parâmetros. Se algum dos parâmetros limitados for violado durante a pesquisa de otimização, deve-se adicionar uma penalidade à função objetivo. Desta maneira, o valor de saída da função objetivo será aumentado, o que indica que as variáveis primárias inicializadas nessa iteração específica levaram a um projeto com falhas e sua implementação será inviável.

4.6.1 Campo de Reação de Armadura

Segundo (BRAIWISH, 2016), o campo de armadura é definido como o campo eletromagnético gerado devido à corrente fluindo nos condutores do estator. Sabe-se que este tende a distorcer a campo magnético principal gerado pelos ímãs permanentes, dessa maneira, quanto maior o campo de armadura, maior será esta distorção. Considerando o projeto de motores *brushless* à ímãs permanentes, a precisão do cálculo do campo de reação de armadura é requerida para prever se os ímãs permanentes têm a possibilidade de serem desmagnetizados por esses campos. Com isso, uma desmagnetização parcial ou total pode ser evitada. A possibilidade do campo de reação de armadura saturar a coroa do estator ou os dentes do estator, é outro aspecto que nos leva a considerar a importância de se limitar o campo de reação de armadura.

Sabe-se que em condições normais de operação, a corrente nominal da máquina é limitada pelo inversor. Portanto, se a espessura do ímã e a coercividade forem suficientemente grandes, não haverá risco de desmagnetização. Entretanto, em condições de operação anormais, como o caso de um curto-circuito trifásico, a corrente é limitada apenas pela indutância de dispersão e resistência de fase (BRAIWISH, 2016). Sendo que essa corrente é, normalmente, muitas vezes maior que a corrente nominal. Portanto, espera-se que uma corrente mais alta flua no enrolamento e o risco de desmagnetização seja significativamente maior.

Tem-se que o impacto do campo de reação da armadura não é

limitado apenas pela corrente da armadura, mas também depende da disposição e topologia do ímã permanente e do rotor. Quando o ímã é montado na superfície do rotor, como no caso deste trabalho, o impacto do campo de reação da armadura é relativamente fraco. Isso, devido ao fato de existir um grande entreferro equivalente contendo um ímã de baixa permeabilidade, que por sua vez gera uma alta relutância em frente ao campo de reação de armadura, produzido a partir da corrente do estator e enfraquecendo seus efeitos.

Sendo assim, para avaliar o desempenho efetivo da máquina é importante se analisar o campo de reação de armadura e, desse modo, se estimar a pior condição de desmagnetização e de saturação associada ao aço de estator.

4.6.2 Saturação do Estator

A indução máxima permitida no estator deve ser limitada pela saturação do aço utilizado. Portanto, como pudemos observar na Figura 28, devemos limitar em 1,6T a indução no estator. A relação (4.48) deve ser respeitada, senão uma penalidade será atribuída à simulação em questão.

$$B_{max} < 1,6 \quad (4.48)$$

Segundo (BRAIWISH, 2016), ao se desconsiderar a influência das aberturas de ranhuras no campo de reação de armadura, a máxima densidade de fluxo admitida no núcleo de ferro (B_{max}) é dada pela soma linear do campo produzido pelos ímãs permanentes com o campo de reação de armadura. Conforme dado em (4.49).

$$B_{max} = B_{g(1)} + B_{arm} \quad (4.49)$$

Onde B_{arm} é dado por:

$$B_{arm} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_m \cdot MF_{ar}}{g'} \quad (4.50)$$

Já a variável MF_{ar} corresponde à força magnetomotriz produzida na armadura, sendo dada por (4.51).

$$MF_{ar} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{k_w \cdot N_{ph} \cdot I_{ph}}{\frac{N_p}{2}} \quad (4.51)$$

4.6.3 Desmagnetização dos Ímãs

Para o caso da desmagnetização dos ímãs, deve-se definir a máxima corrente admissível (I_{demag}) no sistema para evitar que se crie um campo de reação de armadura capaz de desmagnetizar os ímãs permanentes. Essa corrente é dada em função das características do ímã, como a indução remanente na temperatura de operação (B_r) e a densidade de fluxo na curva de desmagnetização onde o vetor de polarização magnética colapsa (B_k), conforme Figura 26. Tem-se que a corrente de desmagnetização é dada em (4.52).

$$I_{demag} = \frac{\pi \cdot N_p}{6 \cdot \mu_0 \cdot \mu_m \cdot k_w \cdot N_{ph}} \cdot (B_m \cdot h_m - B_k \cdot (g + h_m)) \quad (4.52)$$

Com isso, as correntes de fase devem ser comparadas com a corrente de desmagnetização. Caso elas sejam maiores que o valor de I_{demag} , será adicionada uma penalização para a simulação em questão.

4.6.4 Limitação da Temperatura

Como abordado anteriormente, as limitações de temperatura dos componentes do sistema também são fatores que restringem as variáveis do projeto. Com isso, se alguma limitação foi violada, podemos desqualificar certas soluções obtidas a partir do algoritmo de otimização, visto que, não estamos calculando a temperatura dos componentes da máquina no modelo analítico. Por outro lado, quando se realizar a simulação pelo método de elementos finitos, obtêm-se a temperatura de cada componente do motor em função das condições de funcionamento do veículo, o que nos fornece meios para se analisar o caso das limitações dos componentes terem sido respeitadas.

No projeto em questão, tem-se dois componentes em especial que devem ter as suas limitações em temperatura observadas. São eles os ímãs permanentes que, devido a classe escolhida, devem trabalhar a uma temperatura abaixo de 150°C e, tem-se também, as bobinas do estator, as quais devem trabalhar a uma temperatura de no máximo 155°C devido a classe do isolante selecionada (classe F).

4.6.5 Limitação do Custo

O custo da máquina é uma limitação que pode ser considerada para aceitar ou recusar determinado conjunto de variáveis primários escolhidas pelo algoritmo de otimização. Para tal, leva-se em consideração que o custo da máquina depende principalmente da quantidade de ímãs permanentes utilizados, isso devido ao seu custo elevado se comparado aos demais componentes do sistema. Dessa maneira, limita-se o peso dos ímãs em 600g por máquina, pois com isso um custo razoável na aquisição deste material é obtido.

4.7 FUNÇÃO OBJETIVO

Para se obter o projeto mais otimizado, não é suficiente dizer que o "mais leve", "o mais barato" ou "o menor" é o melhor, já que um único objetivo raramente distingue a adequação geral do projeto à sua aplicação. Portanto, deve-se avaliar uma função multiobjetivos, onde leva-se em consideração um conjunto de variáveis que representem os objetivos do projeto em questão.

Como os objetivos do projeto são minimizar o peso, volume, custo e maximizar a eficiência da máquina, a saída da função objetivo é determinada se considerando essas variáveis, conforme Equação (4.53). A saída do sistema consiste em somar a contribuição de cada uma das variáveis a serem otimizadas com as penalidades atribuídas ou não ao projeto. Então, como o objetivo da otimização é minimizar essas variáveis, a função que possuir o menor valor será a melhor opção a ser implementada. Ainda adiciona-se alguns fatores de ponderação que levam a considerar a melhora de algumas variáveis mais desejáveis do que outras. Por exemplo, se o projetista está mais preocupado com o volume do que com o peso, o volume pode ser multiplicado por um fator maior para indicar sua contribuição à função objetivo.

$$Out = W_{tot} + 20 \cdot W_{mag} + 10 \cdot Vol + (100 - \eta_{mot}) + Pen \quad (4.53)$$

Da Equação (4.53), W_{tot} corresponde ao peso da máquina; W_{mag} representa o peso dos ímãs permanentes; η_{mot} a eficiência do motor; e Pen as penalidades atribuídas ao projeto, se for o caso de desrespeitarmos algum limite estabelecido pelo projetista.

5 OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DO MOTOR

Esta seção aborda o algoritmo evolucionário implementado para a realização da otimização dos parâmetros definidos na função objetivo do modelo analítico da máquina, além dos resultados obtidos a partir das simulações do modelo analítico serem apresentados.

As simulações e otimizações são realizadas com o auxílio do *software* Matlab®. O "Anexo A" contempla o código implementado para se simular os desempenhos obtidas a partir do modelo analítico do motor apresentado no capítulo anterior. Já o "Anexo B" descreve o código implementado para se realizar a otimização da função multiobjetivo apresentada anteriormente.

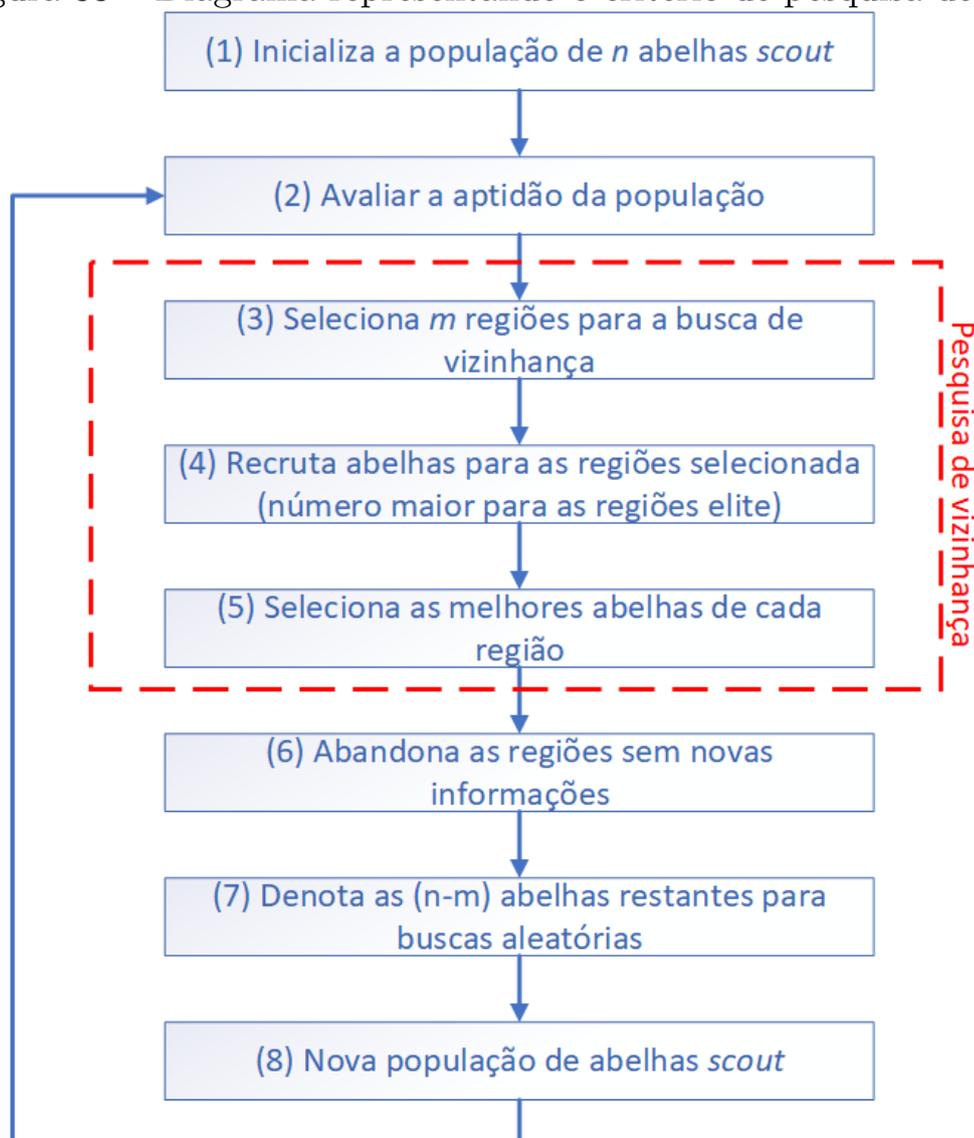
5.1 ALGORÍTIMO DE OTIMIZAÇÃO

Muitos problemas complexos de otimização de múltiplas variáveis não podem ser resolvidos polinomialmente de maneira exata dentro de tempos de computação limitados. Isso gera muito interesse em algoritmos de busca que encontram soluções quase ótimas em tempos de execução razoáveis (PHAM et al., 2006). Algumas classes desses algoritmos são os chamados "algoritmos evolucionários", os quais se baseiam em fenômenos da natureza para buscar soluções ótimas no domínio de cálculo de determinadas variáveis. Pode-se destacar três destes algoritmos, sendo eles:

- Algoritmo Genético (AG): é baseado na seleção natural e na recombinação genética. O algoritmo funciona escolhendo soluções da população atual e, em seguida, aplicando operadores genéticos, como mutação e recombinação de genes, para criar uma nova população. O algoritmo explora com eficiência informações históricas para especular em novas áreas de pesquisa com melhor desempenho (PHAM et al., 2006). Quando aplicado a problemas de otimização, o AG tem a vantagem de realizar uma pesquisa global.
- *Particle Swarm Optimisation* (PSO): é um procedimento de otimização baseado no comportamento social de grupos de animais organizados, por exemplo, o agrupamento de pássaros durante as migrações. Soluções individuais em uma população são vistas como "partículas" que evoluem ou mudam suas posições com o tempo. Cada partícula modifica sua posição no espaço de busca

**Protegido sob termo de
sigilo**

Figura 33 – Diagrama representando o critério de pesquisa do BA.



Fonte: Adaptado de (BRAIWISH et al., 2014)

número de abelhas *scout* (n) sendo distribuídas aleatoriamente no domínio de cálculo. Na etapa 2, a adequação de cada local, visitado por (n), é avaliada e aqueles locais que apresentarem os melhores resultados são escolhidos como as "regiões selecionadas" (m). Na etapa 3 os resultados mais promissores da região m são selecionados e formam-se os chamados "locais de elite" (e). Enquanto na etapa 4, formam-se o grupo de locais não pertencentes à elite ($m - e$) para as pesquisas de vizinhança.

Posteriormente, nos passos 5 e 6, o algoritmo realiza buscas na vizinhança das regiões selecionados, atribuindo mais abelhas para procurar resultados ótimos perto dos locais de elite (e). As abelhas podem ser escolhidas diretamente de acordo com as aptidões associadas aos

locais que visitam. Alternativamente, os valores de aptidão são usados para determinar a probabilidade das abelhas serem selecionadas (BRAIWISH et al., 2014). Pesquisas na vizinhança dos locais de elite (e) que representam soluções mais promissoras são feitas mais detalhadamente ao recrutar um número maior de abelhas para segui-las do que as outras abelhas selecionadas. Juntamente com a utilização de abelhas *scout*, esse recrutamento diferencial é uma operação fundamental do BA. No entanto, para cada conjunto apenas as abelhas com maior aptidão serão selecionadas para formar a próxima população de abelhas. Essa restrição é introduzida aqui para reduzir o número de pontos a serem explorados.

Na etapa 7, as abelhas remanescentes na população são designadas aleatoriamente em torno do espaço de pesquisa para buscar novas soluções potenciais. Já na etapa 8, é formada uma nova população de abelhas *scout*. Essas etapas são repetidas até que o critério de parada seja atendido. No final da iteração, a colônia terá duas partes de sua nova população - representantes de cada fragmento selecionado e outras abelhas *scout* designadas para realizar buscas aleatórias (BRAIWISH et al., 2014).

5.1.2 Escolha dos Parâmetros do Otimizador

A versão padrão do Bees Algorithm (BA), implementada em (BRAIWISH, 2016), requer a configuração dos valores de seis parâmetros que devem ser sistematicamente ajustados para garantir uma busca efetiva e compatível das variáveis primárias ideais. Estes parâmetros são dados pelo número de abelhas exploradoras (n); o número de locais selecionados (m); número de locais de elite selecionados (e); número de abelhas recrutadas para cada local de elite (nep); número de abelhas recrutadas para locais não-elite (nsp); e tamanho da vizinhança (ngh).

Como apresentado anteriormente, a busca pela solução ótima se inicia com as abelhas *scout*, sendo que essa etapa corresponde a escolha aleatória de valores para cada um dos quatro parâmetros aplicados ao modelo analítico (D , L , h_m e J). Porém esses valores devem possuir limites máximo e mínimos, para assim atender a requisitos de projetos e fornecer soluções válidas e factíveis ao modelo analítico.

Os limites impostos à densidade de corrente J devem ser compatíveis com o tipo de sistema de resfriamento empregado ao projeto. Sendo que, para o caso de um sistema de resfriamento natural J varia de 5 a 7,5 A/mm^2 , para um sistema com ventilação forçada varia de

**Protegido sob termo de
sigilo**

de número 7, onde a função objetivo alcançou o valor de "24,5792" e o pior resultado foi obtido na simulação de número 8 com a função objetivo valendo "24,9828". Observa-se que em todas as simulações o BA foi capaz de encontrar soluções convergentes que respeitassem os limites impostos e, além disso, ele proporcionou resultados que convergiram para valores semelhantes de variáveis primárias, o que demonstra que atingiu-se o melhor ponto de custo benefícios para o projeto em questão. O tempo de cálculo também foi computado, sendo que todas as simulações realizadas convergiam entre 60s e 75s após o início da otimização.

Como o melhor resultado foi obtido na simulação **S. 7**, conforme destacado na Tabela 18, estas variáveis primárias serão aplicadas ao modelo analítico de onde serão obtidos os aspectos dimensionais, elétricos e magnéticos para a implementação no *software* de elementos finitos e fabricação do motor.

6 SIMULAÇÃO EM *SOFTWARE* DE EF

Este capítulo aborda os resultados obtidos a partir da implementação do motor em um *software* de elementos finitos (EF) desenvolvido especialmente para simulações de máquinas elétricas. Trata-se do MotorSolve®[®], o qual é distribuído pela empresa norte americana Infolytica.

Nesse *software*, a interface de entrada de dados possui duas partes principais. Na primeira delas é possível selecionar as características de *design*, materiais e resultados que se tenha interesse em analisar e alterar, são as chamadas abas de comando. Já na segunda parte, tem-se a possibilidade de adicionar especificações dos parâmetros da máquina e de simulações, se for o caso. A Figura 38, ilustra a interface de entrada de dados do MotorSolve, onde a parte superior contém as abas de comando e a inferior corresponde ao local onde os dados devem ser inseridos.

Com isso, no decorrer dessa seção essa interface será utilizada para aplicar todos os dados dimensionais, características de materiais, dos parâmetros elétricos e dos parâmetros mecânicos obtidos a partir do modelo analítico implementado. Dessa forma será possível validar o modelo realizado e ainda observar os erros de aproximação que o modelo analítico fornece devido às suas limitações.

A análise teve início através de algumas medições gerais, tais como as indutâncias, resistência de fase, curvas de tensão e de corrente, fluxo no entreferro, potências e eficiência. Com isso comparou-se esses resultados aos do modelo analítico.

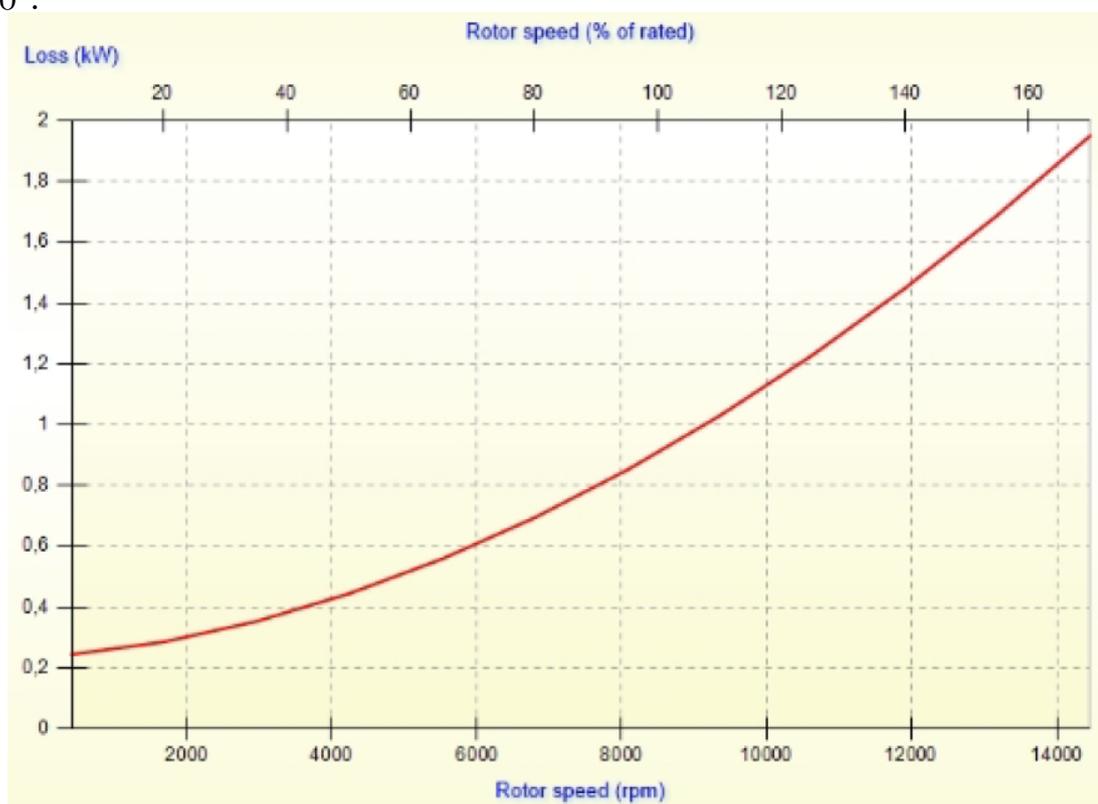
Em seguida, realizou-se medições de torque em função da velocidade de rotação e do ângulo de avanço (ou ângulo de comando) da corrente. Com isso, pode-se observar se o torque fornecido pela máquina é capaz de suprir a demanda exigida pelo veículo no decorrer das provas dinâmicas simuladas nos capítulos precedentes.

Ainda abordou-se aspectos como a distribuição da densidade de fluxo na máquina e os pontos onde o aço apresenta saturações instantâneas. Sendo que, a questão da desmagnetização dos ímãs também é abordada. Por fim, apresenta-se as simulações térmicas para as condições de operação do veículo em cada prova do evento organizado pela Fórmula SAE Brasil.

**Protegido sob termo de
sigilo**

de operação. Considerando um ângulo de avanço de 20° , valor que proporciona torque máximo na velocidade nominal conforme será visto na próxima seção, traçou-se a curva de perdas em função da velocidade, sendo que a Figura 44 traz o gráfico abordando essa simulação. Como pode-se perceber, para o ângulo de avanço de 20° , as perdas aumentam de maneira expressiva devido ao aumento das perdas no ferro e nos ímãs.

Figura 44 – Perdas em função da velocidade para ângulo de avanço de 20° .



Fonte: Autor(2018)

Outra maneira, talvez até mais interessante de se analisar o rendimento da máquina é através do "mapa de eficiência", conforme Figura 45. Nele traçaram-se valores de torque pela velocidade de rotação de maneira a se extrair a eficiência da máquina a cada ponto.

Em relação aos pesos dos componentes, em ambos os casos obteve-se praticamente o mesmo valor para os pesos dos ímãs permanentes (W_{mag}). Porém, no que diz respeito ao peso total, o modelo por EF apresentou 0,189 kg a mais do que obteve-se no modelo analítico (cerca de 3% mais pesado). Isso se deu pelo cálculo mais preciso das seções dos componentes computadas pelo MotorSolve. Já na Figura 46, é apresentada uma síntese dos parâmetros do motor.

**Protegido sob termo de
sigilo**

6.2 MEDIÇÕES DE TORQUE

Nesta seção os desempenhos da máquina referentes ao torque eletromagnético serão abordados. Para tal, inicia-se as análises com o *cogging* torque e, em seguida, aborda-se as influências do ângulo de comando e velocidade de rotação para com o torque eletromagnético.

6.2.1 *Cogging* Torque

Como já abordo nos capítulos anteriores, o *cogging* torque é indesejado e surge a partir da interação entre os ímãs permanentes e os dentes do estator, onde os ímãs tentam se alinhar com os dentes em uma determinada posição. Como é uma grandeza indesejável, buscase minimizá-la o máximo possível. Para isso escolhe-se a topologia de ímãs do tipo *bread-loaf*.

Através de simulações no MotorSolve, obteve-se as características do *cogging* torque, conforme a Figura 47.

Figura 47 – *Cogging* torque.



Fonte: Autor(2018)

Com isso, percebe-se que o valor pico-a-pico que essa grandeza atinge é de 0,44Nm. Como apresentado a seguir, o torque eletromagnético chega a atingir valores em torno de 27Nm, ou seja, o *cogging*

**Protegido sob termo de
sigilo**

6.5 SIMULAÇÃO TÉRMICA

A simulação térmica do motor é uma das análises mais importantes que deve ser realizada no decorrer de projetos de máquinas elétricas. Então, com o objetivo de realizar simulações que retratassem da maneira mais fidedigna as características térmicas do motor, realiza-se simulações considerando as condições de funcionamento da máquina para as provas da competição que o veículo deverá participar e ainda uma temperatura ambiente de 30°C.

Sendo assim, implementou-se as curvas de torque e velocidade de rotação, conforme Figuras 51, 52 e 53, no MotorSolve e obteve-se as características térmicas da máquina trabalhando em cada uma dessas condições.

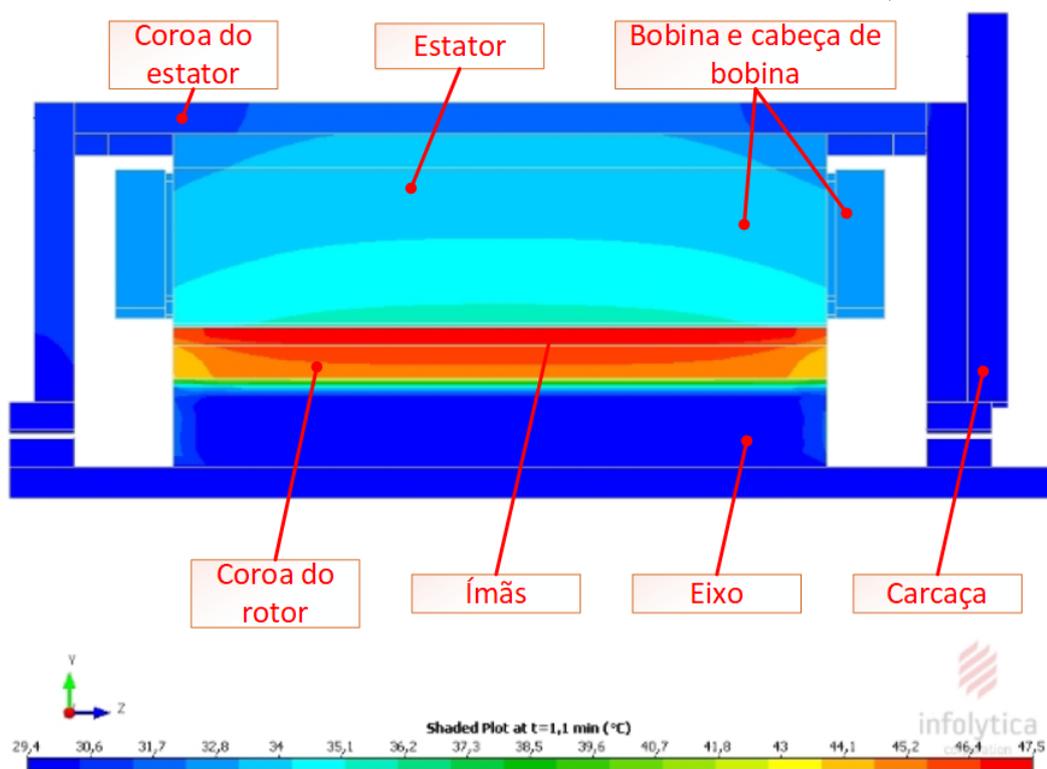
6.5.1 Simulação Térmica - *Autocross*

Iniciou-se as simulações térmicas considerando a situação da prova de *autocross* (ver Figura 53). As características térmicas da máquina obtidas após o final dessa prova estão ilustradas na Figura 56, onde apresenta-se uma vista em corte lateral da máquina contendo as respectivas temperaturas de todos os componentes ativos do motor e a sua carcaça.

Percebe-se que a maior concentração de calor se dá nos ímãs permanentes, a qual é proveniente das correntes de *Foucault* induzidas nos mesmos. Apesar de que a temperatura esteja muito abaixo do limite dos ímãs (47,5°C enquanto o máximo é de 150°C), pode-se diminuir esse valor ao seccionarmos os ímãs, pois dessa forma é possível se minimizar as correntes induzidas de *Foucault*. Portanto, nas próximas simulações considera-se que cada polo possui dois ímãs seccionados longitudinalmente, conforme Figura 39. Ainda pode-se secciona-los mais uma vez ao meio, diminuindo o seu comprimento na metade e obtendo quatro ímãs por polo magnético do motor. Contudo, por limitações no *software* contentou-se com os seccionamentos longitudinais nas simulações aqui realizadas.

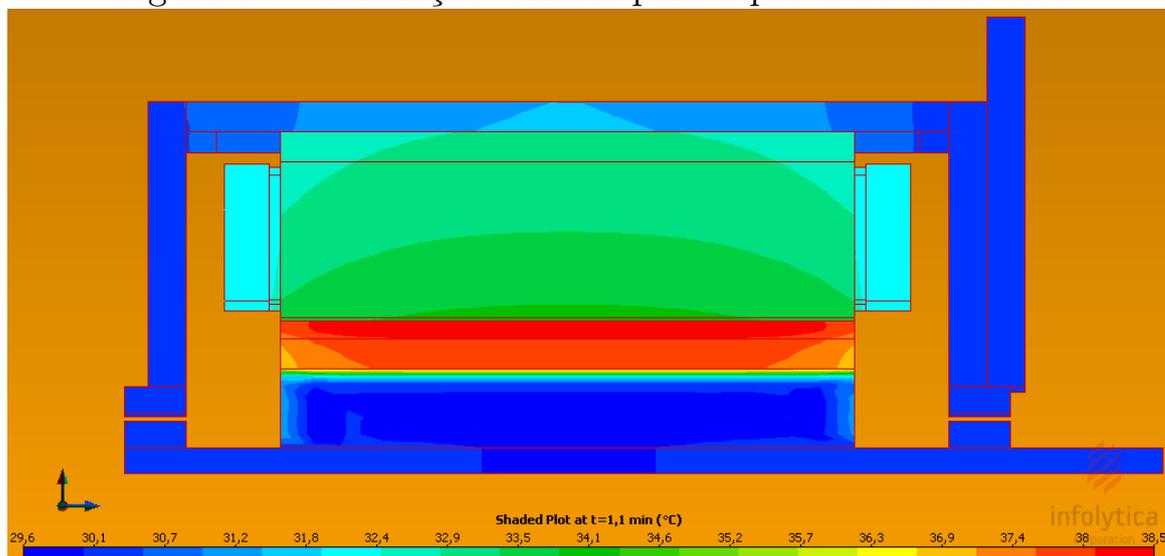
Realizou-se novamente as simulações para a prova de *autocross*, contudo, nesse caso consideramos os ímãs seccionados. Essa nova simulação se mostrou promissora e proporcionou uma redução de 9°C em relação ao caso anterior, conforme Figura 57.

Figura 56 – Simulação térmica para a prova de *autocross* (ímãs inteiros).



Fonte: Autor(2018)

Figura 57 – Simulação térmica para a prova de *autocross*.



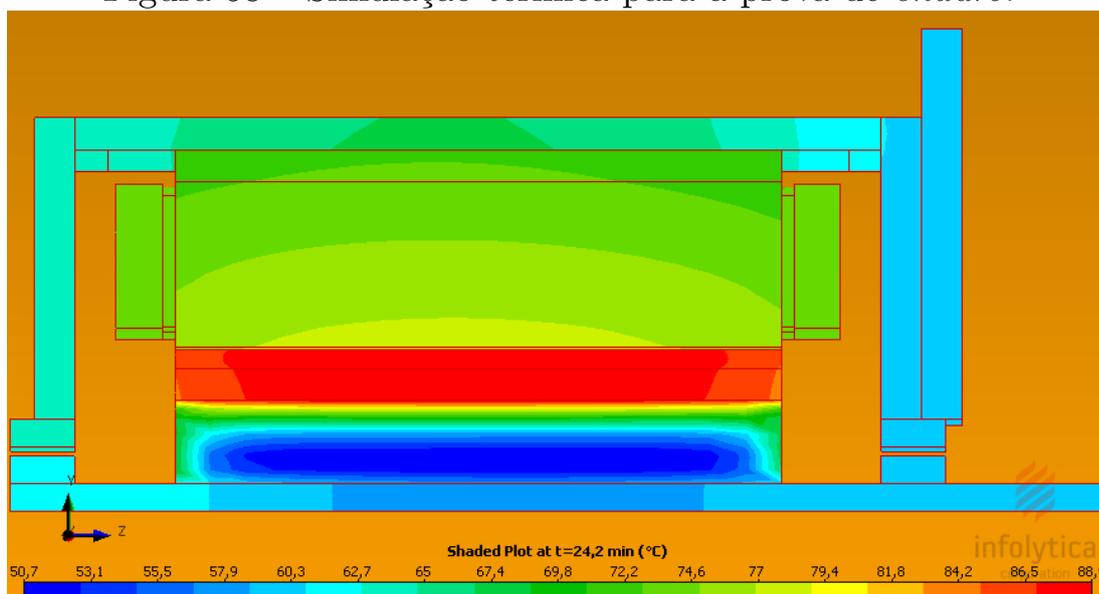
Fonte: Autor(2018)

6.5.2 Simulação Térmica - *Enduro*

A prova de *Enduro* possui o mesmo percurso da prova de *autocross*. Porém, nesse caso, o piloto deve realizar o percurso vinte e

duas vezes. Sendo assim, implementou-se as curvas da Figura 53 e a repetiu-se sucessivamente de maneira a obter as temperaturas finais apresentadas na Figura 58.

Figura 58 – Simulação térmica para a prova de *enduro*.



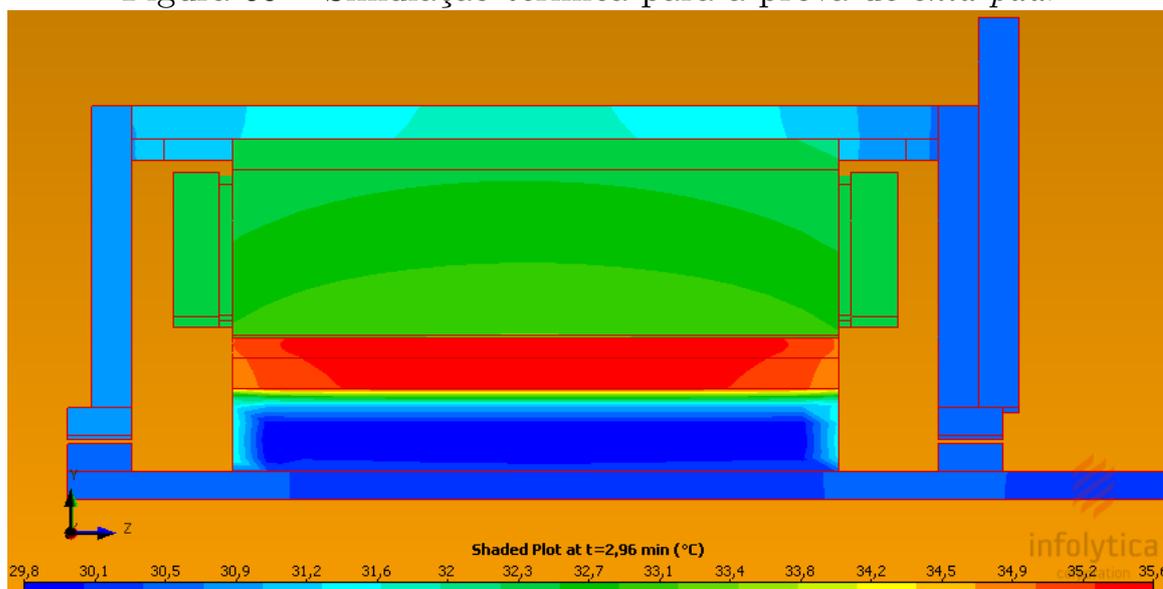
Fonte: Autor(2018)

Como pode-se perceber, a temperatura máxima apresentada novamente se concentrou nos ímãs permanentes e nesse caso atingiu valores em torno de $88,9^{\circ}\text{C}$. Mesmo após 24,2 minutos sendo constantemente exigido, o motor ainda está largamente abaixo do seu limite máximo de temperatura de funcionamento, o qual vale 150°C .

6.5.3 Simulação Térmica - *Skid Pad*

Outra prova que se deve simular é a de *skid pad*, sendo que a Figura 52 apresenta as características de torque e velocidade de rotação para uma volta no circuito em oito da prova. Como na competição deve-se percorrer oito voltas nesse circuito, as simulações foram concebidas de maneira a retratar as condições de funcionamento na competição. Sendo assim, obteve-se as características térmicas ilustradas na Figura 60. Como pode-se perceber, após o final da prova os ímãs do motor aumentam em apenas 6°C a sua temperatura em relação ao seu valor inicial, o que demonstra que a máquina não foi muito exigida nesta prova.

Figura 59 – Simulação térmica para a prova de *skid pad*.



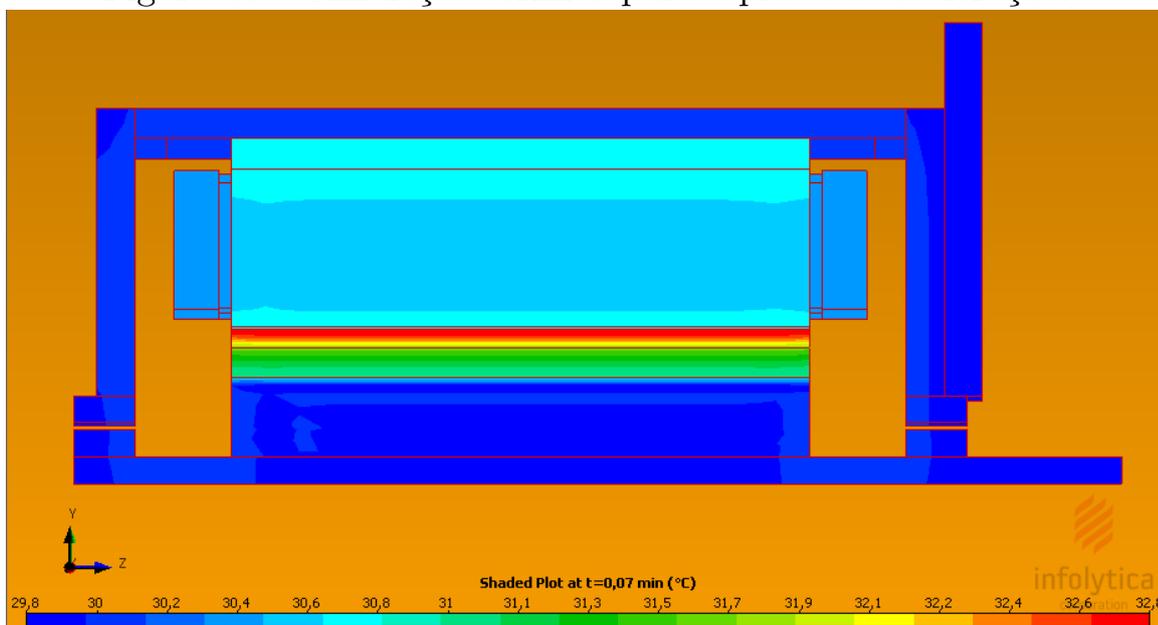
Fonte: Autor(2018)

6.5.4 Simulação Térmica - Aceleração

Por fim, a simulação térmica da prova de aceleração é realizada. Dessa vez utiliza-se as curvas apresentadas na Figura 51 para representar as características de torque e velocidade de rotação do motor durante a simulação térmica. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 60 e, como pode-se perceber, após o final da prova o motor aumenta em $2,8^{\circ}\text{C}$ a temperatura nos ímãs permanentes em relação à temperatura inicial.

Nesse caso, pode-se destacar que a temperatura aumenta significativamente nos ímãs em um período de tempo muito curto, visto que a prova dura apenas 3,7s. Esse aumento brusco de temperatura se dá devido a alta corrente requerida pela máquina para suprir o torque de arrancada, gerando assim fortes correntes de *Foucault* induzidas nos ímãs permanentes. Como o tempo de prova é muito curto os demais componentes não conseguem dissipar a temperatura gerada nos ímãs e também não apresentam perdas significativas para alterarem as suas temperaturas iniciais significativamente, sendo assim, a parte mais quente se concentra principalmente nos ímãs permanentes.

Figura 60 – Simulação térmica para a prova de aceleração.



Fonte: Autor(2018)

**Protegido sob termo de
sigilo**

**Protegido sob termo de
sigilo**

**Protegido sob termo de
sigilo**

8 CONCLUSÃO

Conceber um projeto otimizado de motor com os desempenhos específicos para a aplicação desejada é de extrema importância para se obter o projeto mais eficiente possível. Sendo assim, dimensionou-se o motor com base nos comportamentos desejados de um veículo de Fórmula SAE. Um modelo analítico em cooperação com um algoritmo de otimização se mostrou eficiente em fornecer todos os parâmetros dimensionais, elétricos e magnéticos da máquina e, com isso, uma simulação mais precisa pôde ser realizada para se validar os comportamentos da máquina projetada.

O emprego de simulações em *software* de elementos finitos demonstrou que a máquina dimensionada atende a todas condições de torque e velocidade exigidas pelo veículo. Já as simulações térmicas demonstram que os materiais que compõem o motor não serão danificados nas condições de funcionamento exigidas pelo automóvel.

O veículo atual da equipe *Ampera Racing* conta com dois motores de indução fabricados pela empresa WEG. Cada um dos motores pesa 25 kg e possui 22 kW de potência, ou seja, uma densidade de potência de 880 W/kg. Já o projeto desenvolvido neste trabalho possui um peso final em torno de 8,5kg e uma potência de 20 kW, ou seja, uma densidade de potência de 2350 W/kg. Percebe-se que o novo projeto, otimizado para a aplicação, fornece um aumento de 167% da densidade de potência, o que melhora de maneira expressiva o desempenho do veículo.

Algumas melhorias que podem ser implementadas em estudos futuros são: a utilização de materiais de melhor qualidade no núcleo de ferro; a implementação, no modelo analítico, das perdas por corrente de *Foucault* nos ímãs; e a simulações por elementos finitos considerando os ímãs seccionados em quatro partes.

Após a fabricação e ensaios do protótipo a validação definitiva do projeto aqui implementado será efetuada e, ao analisar os resultados dos ensaios, será possível se praticar novas otimizações no motor.

REFERÊNCIAS

Agence Internationale de l’Energie. Véhicules électriques: Technologie, performances et perspectives. In: **Edition TECHNIP**. Paris, França: [s.n.], 1994.

BECK, R. (Ed.). **Baterias Lítio-íon (LiB) - Perspectivas e Mercado**. III Seminário sobre Lítio - Brasil, 2018. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/images/eventos/2018/iii-litio-brasil/apresentacoes/baterias-ion-litio-perspectiva-mercado.pdf>>. Acesso em: 03 out. 2018.

BOUKER, H. **Conception et optimisation des machines synchrones à aimants permanents à haute vitesse dédiées aux véhicules électriques hybrides**. Tese (Theses) — Université Paris-Saclay, Nov 2016. Disponível em: <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01450394>>.

BRAIWISH, N. **Design Optimisation of Brushless Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles**. Tese (Theses) — Cardiff University, Reino Unido, 2016.

BRAIWISH, N. Y. et al. Design optimisation of permanent magnet synchronous motor for electric vehicles traction using the bees algorithm. In: **2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**. Napoca, Romênia: [s.n.], 2014.

CANDERS, W. High speed machines on magnetic bearings - design concepts and power limits. in **Proc. ICEM**, p. 20–25, 1998.

CHAN, C. C. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. **Proceedings of the IEEE**, v. 95, n. 4, p. 704–718, 2007.

CHAN, C. C.; CHAU, K. T. **Modern Electric Vehicle Technology**. Nova York, EUA: Oxford University Press, 2001. ISBN 0-19-850416-0.

CHEBAK, A. **Modélisation, Conception et Optimisation des Machines sans Encoches à Aimants Permanents à Haute Vitesse**. Tese (Theses) — Université Laval, Québec, 2013.

DAJAKU, G.; GERLING, D. Determination of air-gap flux density due to magnets using the new analytical model. In: **XIX**

International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010. Roma, Itália: [s.n.], 2010.

DORRELL, D. G.; POPESCU, M.; KNIGHT, A. M. Comparison of different motor design drives for hybrid electric vehicles. **2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition**, IEEE, Atlanta, EUA, 2010.

HENDERSHOT, J. R.; MILLER, T. J. E. **Design of Brushless Permanent-Magnet Motors.** 1. ed. [S.l.]: Clarendon Press, 1995. 584 p. ISBN 0198593899.

ILKA, R.; ALINEJAD-BEROMI, Y.; YAGHOBI, H. Geometry optimization of five-phase permanent magnet synchronous motors using bees algorithm. **IRANIAN JOURNAL OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING**, p. 345–353, 2015.

Jupyter. **Homepage Jupyter.** 2018. Disponível em: <<http://jupyter.org/>>. Acesso em: 14 nov. 2018.

KEDOUS-LEBOUC, A.; MESSEL, O.; YOUMSSI, A. Joint punching and frequency effects on practical magnetic characteristics of electrical steels for high-speed machines. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 426, p. 658–665, 2017.

LARMINIE, J.; LOWRY, J. **Electric Vehicle - Technology Explained.** West Sussex, Reino Unido: John Wiley and Sons, Ltd, 2003.

LEAL, L. C. M.; ROSA, E.; NICOLAZZI, L. C. **Uma introdução à modelagem quase-estática de automóveis.** Florianópolis, Brasil: Publicação interna do GRANTE - Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, 2012.

MESTER, V. **Global Optimal Design of Electric Drive Trains Components.** Tese (Theses) — Ecole Centrale de Lille, 2007. Disponível em: <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00160666>>.

NUKKI, R.; LEHTLA, T.; KILK, A. Design of the exterior-rotor pm synchronous motor for an electric powered paraglider. In: **56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON).** Riga, Latvia: [s.n.], 2015.

PHAM, D. et al. The bees algorithm - a novel tool for complex optimisation problems. **Intelligent Production Machines and Systems**, p. 454–459, 2006.

RAHMAN, M.; CHIBA, A.; FUKAO, T. Super high speed electrical machines - summary. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, Denver, EUA, v. 2, p. 1272–1275, 2004.

REICHERT, K.; PASQUARELLA, G. High speed electric machines, status, trends, and problems. **Proc. IEEE/KTH Stockholm Tech. Conf.**, Estocolmo, Suécia, p. 41–49, 1995.

ROY, S. **Conception optimale d'une chaîne de traction électrique pour une voiture de type Formule SAE**. Maîtrise, Québec, Canada, 2016.

SADOWSKI, N. **Máquinas Elétricas - (Transitório, Regime Permanente e Acionamento)**. Florianópolis, Brasil: Notas de Aula, 2012.

SAE INTERNATIONAL. **FSAE Rules**. 2018. Disponível em: <<https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=e179e647-cb8c-4ab0-860c-ec69aae080a3>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

SOYLU, S. **Electric Vehicles - Modelling and Simulations**. 1. ed. Croácia: In Tech, 2011.

WANG, X.; YUBO, Y. F.; DAJIN, F. Study of cogging torque in surface-mounted permanent magnet motors with energy method. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 267, n. 1, p. 80–85, 2003.

APÊNDICE A - Cálculo do Número de Espiras

Este apêndice tem por objetivo apresentar o procedimento de cálculo adotado para se obter o número de espiras do motor. Com isso, define-se a expressão (A.1):

$$\vec{V}_t = \vec{E} + j \cdot X_s \cdot \vec{I}_{ph} \quad (\text{A.1})$$

Conforme visto no decorrer deste trabalho, a força eletromotriz (E); a reatância síncrona (X_s); e a corrente de fase (I_{ph}) são dadas pelas expressões (A.2), (A.3) e (A.4), respectivamente.

$$E = N_{ph} \cdot \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot f}{\sqrt{2}} \cdot k_w \cdot B_{g(1)} \cdot \frac{D \cdot L}{N_p} \right) \quad (\text{A.2})$$

$$I_{ph} = \frac{P_e}{3 \cdot E} = \frac{1}{N_{ph}} \cdot \frac{P_e}{3} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot N_p}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot k_w \cdot B_{g(1)} \cdot D \cdot L} \quad (\text{A.3})$$

$$X_s = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_s \quad (\text{A.4})$$

Onde,

$$L_s = L_{sg} + L_{sl} + L_{ew} \quad (\text{A.5})$$

$$L_{sg} = N_{ph}^2 \cdot \frac{3}{\pi} \cdot \left(\frac{k_w}{\frac{N_p}{2}} \right)^2 \cdot \frac{\mu_0}{g_{eq}} \cdot D \cdot L \quad (\text{A.6})$$

$$L_{sl} = N_{ph}^2 \cdot \frac{4 \cdot \mu_0 \cdot L}{N_p \cdot q} \cdot \lambda_{sl} \quad (\text{A.7})$$

$$L_{ew} = N_{ph}^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot \tau_c}{16} \cdot \ln \left(\frac{\pi \cdot \tau_c^2}{4 \cdot H_s \cdot \frac{B_{s1} + B_{s2}}{2}} \right) \quad (\text{A.8})$$

Ao desconsiderar a variável N_{ph} nas expressões acima, obteve-se as variáveis E_0 , I_{ph0} e X_{s0} . Conforme equações abaixo:

$$E_0 = \frac{4 \cdot \pi \cdot f}{\sqrt{2}} \cdot k_w \cdot B_{g(1)} \cdot \frac{D \cdot L}{N_p} \quad (\text{A.9})$$

$$I_{ph0} = \frac{P_e}{3} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot N_p}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot k_w \cdot B_{g(1)} \cdot D \cdot L} \quad (\text{A.10})$$

$$X_{s0} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{s0} \quad (\text{A.11})$$

Onde,

$$L_{s0} = L_{sg0} + L_{sl0} + L_{ew0} \quad (\text{A.12})$$

$$L_{sg0} = \frac{3}{\pi} \cdot \left(\frac{k_w}{\frac{N_p}{2}} \right)^2 \cdot \frac{\mu_0}{g_{eq}} \cdot D \cdot L \quad (\text{A.13})$$

$$L_{sl0} = \frac{4 \cdot \mu_0 \cdot L}{N_p \cdot q} \cdot \lambda_{sl} \quad (\text{A.14})$$

$$L_{ew0} = \frac{\mu_0 \cdot \tau_c}{16} \cdot \ln \left(\frac{\pi \cdot \tau_c^2}{4 \cdot H_s \cdot \frac{B_{s1} + B_{s2}}{2}} \right) \quad (\text{A.15})$$

Portanto, pode-se reescrever a Equação (A.1), da seguinte forma:

$$\vec{V}_t = N_{ph} \cdot (\vec{E}_0 + j \cdot X_{s0} \cdot I_{ph0}) \quad (\text{A.16})$$

Isolando-se N_{ph} e trabalhando a expressão, chega-se em:

$$N_{ph} = \frac{\sqrt{(V_t \cdot E_0)^2 + (V_t \cdot X_{s0} \cdot I_{ph0})^2}}{E_0^2 + (X_{s0} \cdot I_{ph0})^2} \quad (\text{A.17})$$

APÊNDICE B - Desenhos Técnicos do Motor

**Protegido sob termo de
sigilo**

ANEXO A – Modelo Analítico da Máquina

**Protegido sob termo de
sigilo**

ANEXO B – Algoritmo de Otimização

**Protegido sob termo de
sigilo**

**Protegido sob termo de
sigilo**