

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PEDRO PAGANINI DE MIO

PROJETO DE SISTEMA TRATIVO ELÉTRICO SEM  
REDUÇÕES MECÂNICAS PARA VEÍCULOS  
ELÉTRICOS LEVES DESENVOLVIDO A PARTIR DE  
COLETA E ANÁLISE DE DADOS DE SISTEMA REAL

SÃO CARLOS -SP  
2020

PEDRO PAGANINI DE MIO

Trabalho de Conclusão de curso  
apresentado à Universidade Federal de  
São Carlos, para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof. Dr. Luís Antônio  
Oliveira Araújo

São Carlos-SP  
2020





**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

**COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET**

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 8/2021/CCEMec/CCET

**Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso**

**Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**PEDRO PAGANINI DE MIO**

**PROJETO DE SISTEMA TRATIVO ELÉTRICO SEM REDUÇÕES MECÂNICAS PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS LEVES  
DESENVOLVIDO A PARTIR DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS DE SISTEMA REAL.**

**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos**

São Carlos, 13 de janeiro de 2021

**ASSINATURAS E CIÊNCIAS**

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Luis Antonio Oliveira Araujo
Membro da Banca 1	João Vitor de Carvalho Fontes
Membro da Banca 2	Vitor Ramos Franco



Documento assinado eletronicamente por **Luis Antonio Oliveira Araujo, Docente**, em 20/01/2021, às 01:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Joao Vitor de Carvalho Fontes, Docente**, em 21/01/2021, às 14:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vitor Ramos Franco, Docente**, em 21/01/2021, às 16:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **0315766** e o código CRC **619C8209**.



**Referência:** Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.000974/2021-64

SEI nº 0315766

*Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019*

## RESUMO

Veículos elétricos leves (VEL) do tipo skate elétrico são tradicionalmente construídos com um sistema trativo que faz o uso de transmissão por correia sincronizadora. O presente trabalho é proposto um motor que é acoplado diretamente à roda sem o uso de reduções mecânicas. Para isto, dados de uso foram coletados em um skate elétrico construído pelo autor, este foram processados e requisitos de torque e velocidade definidos bem como vetores de pares de torque e velocidade durante todo percurso de coleta de dados. Para o projeto do novo motor, geometrias de estatores disponíveis foram analisadas e os melhores candidatos selecionados utilizando uma planilha de cálculo. Destes, diversas variações foram analisadas utilizando o software de projeto de motores sem escova Motor XP-PM, novamente os melhores candidatos foram selecionados e os dados de performances simulados em um percurso virtual equivalente ao utilizado para a coleta de dados. O motor candidato escolhido possui dimensões de 93 mm de diâmetro e 109,5 mm de comprimento um estator de 80 mm de diâmetro com 24 dentes e rotor de 28 polos de ímãs classe N42SH. Este é capaz de um torque máximo de 31 N.m.

**Palavras-chave:** VEL. Motor Elétrico. Sem Escovas

## ABSTRACT

Light electric vehicles (LEV) of the electric skate type are traditionally built with a tractive system that makes use of synchronous belt transmission. In this work, a motor is proposed that is directly coupled to the wheel without the use of mechanical reductions. For this, usage data was collected on an electric skateboard built by the author, it was processed and torque and speed requirements were defined as well as torque and speed pairs vectors throughout the data collection course. For the design of the new engine, available stator geometries were analyzed and the best candidates selected using a spreadsheet. Of these, several variations were analyzed using the Motor XP-PM brushless motor design software, again the best candidates were selected and the performance data simulated in a virtual route equivalent to that used for data collection. The candidate motor chosen has dimensions of 93 mm in diameter and 109.5 mm in length, an 80 mm diameter stator with 24 teeth and a 28-pole rotor of class N42SH magnets. This is capable of a maximum torque of 31 N.m.

**Keyword:** Motor. Brushless. LEV

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de ligação de um motor sem escovas.....	15
Figura 2 – Interior de um motor sem escovas.....	16
Figura 3 – Estimativa de tamanho do novo motor.....	18
Figura 4 – Modelagem matemática de um motor sem escovas.....	20
Figuras 5 a 9 – Skates elétricos previamente construídos pelo autor.....	23
Figura 10 – Skate elétrico construído pelo autor utilizado neste trabalho.....	24
Figura 11 – Bateria do skate elétrico construído pelo autor.....	25
Figura 12 – Unidade propulsora do skate utilizado neste trabalho.....	25
Figura 13 – Suporte dos motores.....	26
Figura 14 – Controladores.....	27
Figura 15 – Geometrias de estatores comerciais avaliados.....	28
Figura 16 – Curva de saturação do aço silício M19.....	29
Figura 17 – Perdas no aço silício M19.....	29
Figura 18 – Fluxograma do desenvolvimento do projeto.....	30
Figura 19 – Exemplo de dados coletados.....	31
Figura 20 – Rotas percorridas na coleta de dados.....	31
Figura 21 – Sistema de direção em ângulo máximo.....	33
Figura 22 – Envelope delimitador do motor.....	33
Figura 23 – Envelope do motor inserido no skate.....	34
Figura 24 – Planilha de cálculo para estimativa de desempenho.....	35
Figura 25 – Planilha de cálculo para estimativa de desempenho.....	36
Figura 26 – Exemplo de densidade de fluxo magnético.....	37
Figura 27 – Valores de corrente e rotação coletados.....	38
Figura 28 – Valores de corrente e rotação coletados.....	39
Figura 29 – Perdas no cobre e no núcleo do motor usado na coleta de dados.....	40
Figura 30 – Mapa de eficiência do motor utilizado na coleta de dados.....	40
Figura 31 – Perdas no cobre e no núcleo do motor utilizado na coleta de dados.....	41
Figura 32 – Requerimentos para o motor a ser projetado.....	42
Figura 33 – Mapa de calor dos pontos de velocidade e torque.....	42
Figura 34 – Esquema das limitações geométricas.....	43
Figura 35 – Calculadora de fator de enrolamento.....	44
Figura 36 a 39 – Modelo em CAD do motor 80-28-E_3.....	48
Figura 40 – Montagem em CAD do skate utilizado com motores 80-28-E_3.....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Geometrias de estatores comerciais avaliados.....	28
Tabela 2 – Comprimentos axiais limites.....	43
Tabela 3 – Resultados de estimativas de performance.....	45
Tabela 4 – Resultados das diversas configurações simuladas.....	46
Tabela 5 – Resultados da simulação do percurso.....	47
Tabela 6 – Características do motor 80-28-E_3.....	47

## LISTA DE SIGLAS

VEL Veículo Elétrico Leve

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_g$	Área do vão de ar
$A_m$	Área dos imãs
$B_g$	Densidade de flux no vão de ar
$B_r$	Remanência
$B_{ry}$	Densidade de fluxo no rotor
$B_{sy}$	Densidade de fluxo no jugo do estator
$B_t$	Densidade de fluxo no dente do estator
$C_\emptyset$	Razão entre áreas
$D$	Diâmetro
$K_l$	Fator de vazamento
$K_m$	Constante do motor
$K_r$	Fator de relutância
$K_{st}$	Fator de empilhamento
$K_t$	Constante de torque
$K_v$	Constante de velocidade
$L$	Comprimento
$L_m$	Comprimento do imã
$L_{st}$	Comprimento axial do estator
$N$	Número de voltas em uma bobina
$N_m$	Número de polos magnéticos
$P_c$	Coefficiente de permeância
$P_{cb}$	Perdas no cobre
$P_{nu}$	Perdas no núcleo
$P_r$	Resistência de uma fase
$R_{ri}$	Raio interno do rotor
$T$	Torque
$W_{ry}$	Largura do jugo do rotor
$W_{sy}$	Largura do jugo do estator
$W_{tb}$	Largura do dente do estator
$g$	Espessura do vão de ar
$i$	Corrente elétrica
$\mu_R$	Permeabilidade relativa
$\emptyset_{total}$	Fluxo total

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	14
2.1. OBJETIVO GERAL .....	14
2.2. OBJETIVO ESPECIFICO.....	14
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA</b> .....	15
3.1. VEÍCULOS ELETRICOS LEVES.....	15
3.2. O MOTOR ELÉTRICO SEM ESCOVAS.....	15
3.3. ESTIMATIVAS DE DIMENSIONAMENTO.....	17
3.4. MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA .....	18
<b>4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO</b> .....	22
4.1. MATERIAIS.....	22
<b>4.1.1. Skates Elétricos Construídos pelo Autor</b> .....	22
<b>4.1.2. Skate Elétrico Utilizado para Coleta de Dados</b> .....	24
<b>4.1.3. Estatores Comerciais Considerados</b> .....	27
<b>4.1.4. Imãs</b> .....	30
4.2. MÉTODOS .....	30
<b>4.2.1. Considerações Gerais</b> .....	30
<b>4.2.2. Coleta de Dados de Sistema Real</b> .....	30
<b>4.2.3. Processamento e Análise de Dados</b> .....	32
<b>4.2.4. Condições de Contorno</b> .....	32
4.2.4.1. Geométricas .....	32
4.2.4.2. Elétricas .....	34
<b>4.2.5. Estimativas de Desempenho</b> .....	34
<b>4.2.6. Modelagem Detalhada dos Motores</b> .....	35
<b>4.2.7. Simulação de Percurso</b> .....	37
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	37
5.1. ANALISE SISTEMA REAL.....	37
5.2. ESTATOR .....	43
5.3. GEOMETRIA DO MOTOR.....	44
5.4. SIMULAÇÃO – ESTIMATIVAS.....	44
5.5. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	45
5.6. SIMULAÇÃO PERCURSO REAL.....	46
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	49
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	50
<b>APÊNDICE A – Códigos Desenvolvidos</b> .....	51



## **1. INTRODUÇÃO**

Skates elétricos são um meio de transporte e lazer de pequeno porte e baixo consumo de energia. Tradicionalmente o sistema trativo destes veículos faz uso de um motor acoplado a uma transmissão por correias sincronizadoras que é sujeito a intervalos regulares de manutenção, bem como avarias por detritos e também elevado nível de ruído durante a operação.

De forma a eliminar as necessidades de manutenção bem como a possibilidade de avarias e também resultar em uma operação silenciosa, propõe-se o desenvolvimento de um motor elétrico acoplado diretamente à roda que mantenha as mesmas características de performance e desempenho do sistema que faz uso de reduções por correias

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVOS GERAIS**

O objetivo deste trabalho é o projeto de um sistema trativo sem reduções mecânicas composto de motor elétrico sem escovas acoplado diretamente à roda de um veículo elétrico leve fora de estrada (skate elétrico) que possa substituir o sistema que faz uso de reduções mecânicas, mantendo ou melhorando a performance e eficiência do veículo.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar revisão bibliográfica de forma a identificar modelagens matemáticas adequada para descrever a performance do motor elétrico sem escovas desenvolvido.
- Coletar dados em skate projetado e construído anteriormente pelo autor deste TCC para definir critérios de desempenho.
- Criar metodologia que permita simular o desempenho de um veículo equipado com o motor desenvolvido e comparar com o sistema tradicional que faz uso de reduções mecânicas.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

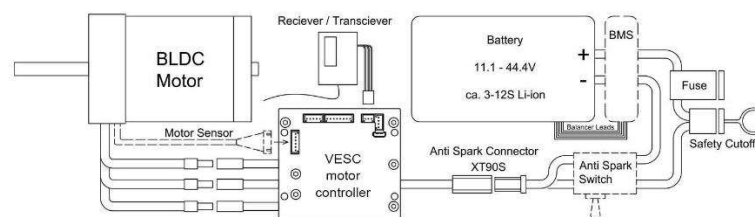
#### 3.1. VEÍCULOS ELETRICOS LEVES

Veículos elétricos leves (VEL), são veículos de propulsão elétrica que ocupam menos espaço na malha viária, necessitam de menos matéria prima e gastos energéticos em sua produção, e consomem menos energia em sua operação (EWERT et al., 2020).. Exemplos destes são bicicletas, patinetes e skates elétricos, este último objeto deste Trabalho de Conclusão de Curso.

#### 3.2. O MOTOR ELÉTRICO SEM ESCOVAS

Motores sem escova de corrente contínua de ímãs permanentes (BLDC – *brushless direct current*) são um subtipo dos motores de corrente alternada (BODINE, 2016). Esta classificação se deve ao fato de que apesar do motor em si trabalhar com corrente alternada, é mandatório o uso de um controlador que converte a corrente contínua de alimentação em corrente alternada de 3 ou mais fases. Em grande maioria, os motores de pequeno formato são trifásicos, pois é o mínimo de fases necessária para um motor funcional e também resulta em um controlador de menor custo. Um possível esquema de ligação do sistema composto de um motor, seu respectivo controlador e uma fonte de alimentação é mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema de ligação de um motor sem escovas



Fonte: TRAMPA BOARDS, (2020)

Uma das principais vantagens do motor elétrico sem escovas é o fato de que desconsiderando os rolamentos, não há partes móveis sujeitas ao desgaste, resultando em longos intervalos de manutenção (DERAMMELAERE et al., 2016). Estes motores podem ser divididos em duas partes, o rotor, que é a parte rotativa, onde residem os ímãs permanentes, e o estator, parte estacionária, onde os enrolamentos de cobre são feitos. Estas partes estão apresentadas na Figura 2.

Figura 2 – Interior de um motor sem escovas



Fonte: Autor.

Os motores sem escovas podem ser definidos por alguns parâmetros principais, sendo os mais importantes para uma modelagem simplificada:

- $K_V$  – Constante de velocidade – Expresso em rpm/V e determina a máxima velocidade angular do motor para dada tensão de alimentação.
- $K_T$  – Constante de torque – Expresso em N.m/A e determina o torque em função da corrente elétrica que circula nos enrolamentos de cobre do motor.
- $K_m$  – Constante do motor – Expresso em N.m/W<sup>-1/2</sup> e determina a perdas resistivas do motor por unidade de torque produzido.
- $R_F$  – Resistência elétrica de uma fase do motor

$K_V$  e  $K_T$  são relacionados e inversamente proporcionais de acordo com a Equação 1.

$$K_T = \frac{60}{2\pi K_V} \quad (1)$$

Há dois mecanismos de perdas principais nos motores sem escovas, perdas no cobre, devido a circulação de correntes elétricas nos enrolamentos de cobre, e perdas no núcleo, que ocorrem devido a interação entre o campo magnético rotativo devido aos ímãs permanentes do rotor e o núcleo de ferro silício do estator (PYRHONEN, 2016).

As perdas no cobre são definidas pela Equação 2 e dependem da corrente elétrica e da resistência elétrica de uma fase do motor.

$$P_{cb} = 1,5 P_R i^2 \quad (2)$$

Perdas no núcleo são divididas em duas componentes, perdas por histerese, que podem ser modeladas por um valor de torque constante em todo regime de funcionamento do motor, e perdas por correntes de Eddie, que são descritas por um torque linearmente proporcional à velocidade angular do rotor e são modeladas pela Equação 3. Os valores das constantes podem ser determinados medindo a potência do motor sem carga aplicada ao eixo de saída em duas ou mais velocidades diferentes e realizando uma regressão linear (LASKARIS; CHANIOTIS; KLADAS, 2010).

$$P_{nu} = \omega (a_0\omega + a_1) \quad (3)$$

### 3.3. ESTIMATIVAS DE DIMENSIONAMENTO

Motores elétricos de fluxo radial podem ter sua capacidade de produção de torque descrita pela Equação 4, em que T é o torque produzido, k é uma constante, D o diâmetro e L o comprimento (HANSELMAN, 2003).

$$T = kD^2L \quad (4)$$

Considerando que o skate elétrico utilizado para coleta de dados faz uso de uma redução mecânica de 5,71, para um motor sem redução produzir a mesma força tratora, o novo torque, chamado de T', precisa ser 5,71 vezes maior. O motor utilizado para a coleta tem diâmetro D = 63 mm e comprimento L = 55 mm, então igualando o torque para ambas situações, podemos determinar o novo diâmetro D' e comprimento L' do motor sem redução.

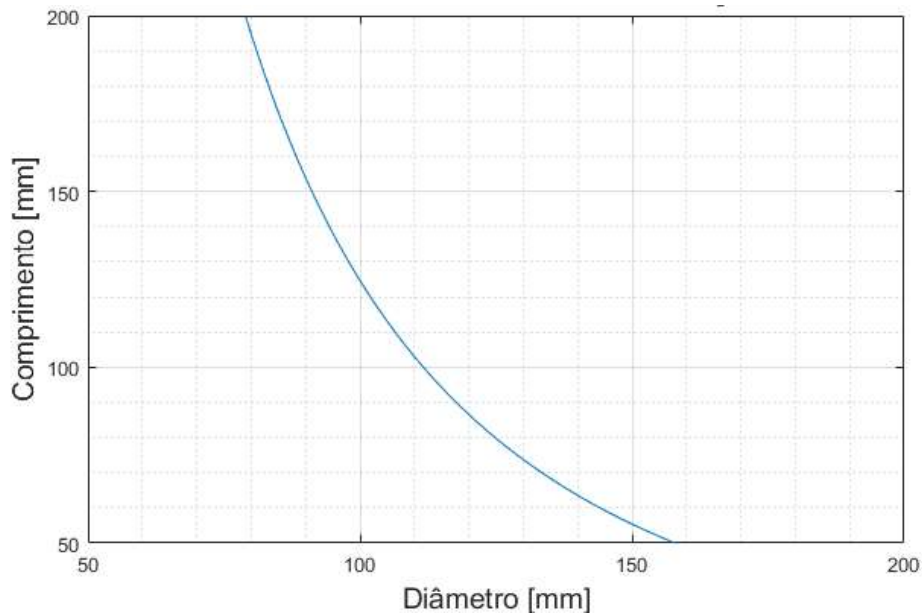
$$T' = kD'^2L' = 5,71T = 5,71kD^2L^2 \quad (5)$$

Substituindo os valores conhecidos, as novas dimensões são determinadas pela Equação 6.

$$D'^2L' = 1246464 \quad (6)$$

Plotando esta, temos a seguinte curva que relaciona o diâmetro com o comprimento para o motor a ser projetado neste trabalho na Figura 3.

Figura 3 – Estimativa de tamanho do novo motor



Fonte: Autor.

Considerando que o diâmetro externo típico de um aro é de 105 mm, o comprimento necessário de 115 mm é promissor, os limites geométricos serão estudados mais a fundo posteriormente.

Outra forma de quantificar a performance de um motor elétrico é por seu  $K_M$ . O motor original utilizado possui um  $K_M$  calculado de 0,309 [N.m/ $\sqrt{W}$ ], portanto, considerando que ao retirar a redução mecânica e aplicando-se o torque diretamente na roda com uma vantagem mecânica 5,71 veze menor, pode se definir como objetivo que o novo motor tenha um  $K_M$  mínimo de 1,764 [N.m/ $\sqrt{W}$ ] para manter as mesmas perdas no cobre por unidade de torque.

É importante notar que considerando somente o  $K_M$ , apenas as perdas no cobre estão sendo consideradas, no entanto também é preciso analisar as perdas no núcleo, pois estas podem ser consideráveis, para resultar em um motor sem redução que mantenha ou melhore o desempenho do sistema original que faz uso de reduções mecânicas (LIBERT, 2004).

#### 3.4. MODELAGEM ELETROMAGNETICA

Apesar de ferramentas computacionais que simulam a performance de um motor elétrico estarem disponíveis, há um demorado processo para definir todas condições de contorno e para criação do modelo, bem como um grande custo computacional, tornando inviável o estudo detalhado de diversas configurações.

Deste modo, utilizou-se a modelagem analítica proposta por (HANSELMAN, 2003).

Devido ao grande número de parâmetros e equações que governam um motor elétrico, toda modelagem foi arranjada em um mapa mental apresentado na Figura 4 de forma a tornar a influência de cada parâmetro mais clara. Com isto foi possível utilizar uma planilha de cálculo para identificar potenciais candidatos a serem analisados mais profundamente.



Um dos principais fatores que determina o torque do motor é a densidade de fluxo magnético no vão de ar entre o rotor e estator determinada pelos seguintes parâmetros:

- Fator de relutância: Compensa a relutância presente em um material ferromagnético.
- Permeabilidade relativa de retração: A permeabilidade relativa na curva de desmagnetização de um ímã permanente.
- Fator de concentração de fluxo: A razão entre a área dos ímãs permanentes e do vão de ar.

$$C_{\phi} = \frac{A_m}{A_g} \quad (7)$$

- Coeficiente de permeância: Ponto de operação de um ímã permanente em um circuito magnético. É determinado pela espessura do ímã, o fator de concentração de fluxo e a espessura do vão de ar.

$$P_c = \frac{l_m}{g C_{\phi}} \quad (8)$$

- Remanência: Máximo fluxo magnético que um ímã permanente pode produzir em um espaço sem permeância.
- Fator de vazamento: relaciona o fluxo de um ímã permanente com o fluxo no vão de ar. Então a densidade de fluxo magnético no vão de ar é dada por:

$$B_g = \frac{K_l C_{\phi}}{1 + K_r \frac{\mu R}{P_c}} B_r \quad (9)$$

Com esta é possível calcular o fluxo magnético total e as densidades de fluxo magnético nas diversas partes do motor.

O fluxo total é dado por:

$$\phi_{total} = B_g 2\pi R_{ri} L_{st} \quad (10)$$

As variáveis que influenciam na densidade de fluxo nas diversas partes do motor são o raio interno do rotor, a altura do empilhamento das laminações, o fator de empilhamento das laminações, o número de ranhuras, o número de polos magnéticos voltados para o vão de ar, a espessura do jugo do rotor e do estator, a espessura do dente.

A densidade de fluxo no jugo do estator é:

$$B_{sy} = \frac{\phi_{total}}{w_{sy} K_{st} L_{st}} \quad (11)$$

A densidade de fluxo no dente do estator é:

$$B_t = \frac{\phi_{total}}{w_{tb} K_{st} L_{st}} \quad (12)$$

A densidade de fluxo no jugo do rotor é:

$$B_{ry} = \frac{\phi_{total}}{w_{ry} K_{st} L_{st}} \quad (13)$$



O torque pode ser calculado com a corrente elétrica que circula no enrolamento e com os parâmetros calculados acima.

$$|T| = 2N_m N B_g L_{st} R_{ro} i \quad (14)$$

Também calculamos a constante do motor, que relaciona as perdas ôhmicas com o torque produzido, e é um dos parâmetros mais importantes para determinar a capacidade de produção de torque de um motor elétrico (LASKARIS; KLADAS, 2008).

$$K_m = B_g R_{ro} \sqrt{\frac{k_{wb} L_{st} N_m A_s}{\rho}} \quad (15)$$

## 4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

### 4.1. MATERIAIS

#### 4.1.1. Skates Elétricos Construídos pelo Autor

Desde 2014, o autor deste TCC vem estudando e construindo diversas versões de skates elétricos, e com isso tem adquirido conhecimento sobre VEL, seus diversos componentes e combinações destes que funcionam em seu ponto ótimo. Alguns exemplos são apresentados nas Figuras 5 a 9.

Figuras 5 a 9 – Skates elétricos previamente construídos pelo autor



Fonte: Autor.

#### 4.1.2. Skate Elétrico Utilizado para Coleta de Dados

Ciclos de percurso para skates elétricos foram estudados previamente (KOLLER, 2019), mas estes não incluem dados de uso fora de estrada, bem como não levam em conta as ineficiências individuais dos sistemas de propulsão de cada fonte de dados, portanto para determinar as necessidades de torque e potência do motor desenvolvido neste Trabalho de Conclusão de Curso, foram coletados e analisados dados de telemetria de um total de 378 km de distância percorrida pela última versão de skate projetado e construído em 2020. VEL projetado e construído pelo autor apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Skate elétrico construído pelo autor utilizado neste trabalho

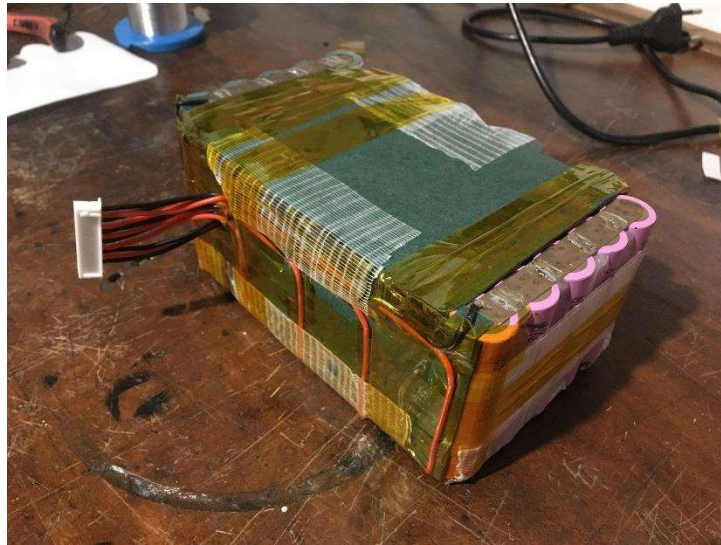


Fonte: Autor.

As principais características do veículo são uma prancha flexível e pneus de 8". Na Figura 11 é mostrado o sistema de armazenagem de energia, que é uma bateria montada pelo autor de íons de lítio de 37 V nominais, composta de 50 células modelo Samsung INR18650-30Q, configuradas em 10 conjuntos em série, cada um deles com 5 células em paralelo resultando nas especificações de 540 Wh de energia armazenada, corrente máxima de 100 A e potência nominal de 3700 W.



Figura 11 – Bateria do skate elétrico construído pelo autor



Fonte: Autor.

A unidade propulsora é composta de um par de motores 6355 190Kv da marca TorqueBoards e de uma transmissão por polias sincronizadoras padrão HTD 5M com uma relação de 14/80. A polia motora feita de aço carbono enegrecido e a movida impressa em 3D feita de plástico ABS. O sistema é apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Unidade propulsora do skate utilizado neste trabalho



Fonte: Autor.

Os suportes dos motores são apresentados na Figura 13 são construídos com chapas de aço inox 304 e a fixação é feita totalmente com fixadores mecânicos, eliminando a necessidade de soldas e evitando o alto custo de peças usinadas.

Figura 13 – Suporte dos motores



Fonte: Autor.

Para o controle de ambos motores é utilizado um par de controladores modelo VESC 6 da marca Trampa Boards, mostrados na Figura 14, este é particularmente interessante pela sua natureza de código aberto e grau de customização altamente elevado, bem como diversas interfaces de comunicação, isso permite comunicação entre diversos controladores de forma que estes trabalhem de maneira conjunta. Dentre os recursos mais interessantes que as interfaces possibilitam, há o controle de tração e possibilidade de conexão com acessórios, como interfaces para a telemetria, controle de luzes, etc. O controlador também possui grande capacidade de corrente, tornando possível o controle de grandes torques em uma unidade compacta, desde que refrigerado adequadamente, sua montagem em uma chapa de aço inox que fica exposta ao ar garante troca de calor adequada.



Figura 14 – Controladores



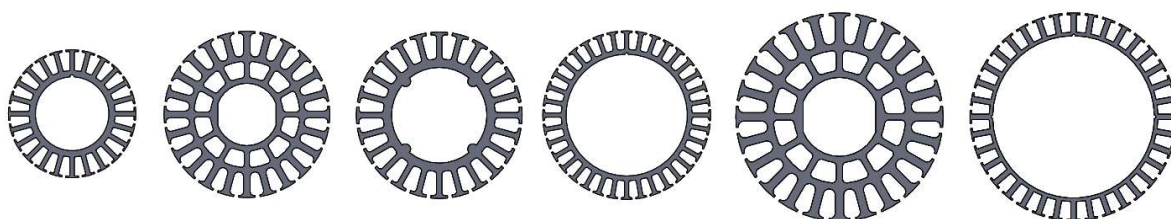
Fonte: Autor.

O skate construído pelo autor e utilizado para os testes possui autonomia que varia de 30 a 45 km dependendo do uso, capacidade de gradientes superiores a 20% e desempenho fora de estrada satisfatório, desconsiderando terrenos demasiadamente arenosos

#### 4.1.3. Estatores Comerciais Considerados

De forma a diminuir custos da produção de um futuro protótipo, optou-se por utilizar modelos comerciais de estatores. Apesar de apresentarem geometrias pré-definidas, a quantidade de laminações empilhadas pode ser escolhida, e isto garante liberdade nas dimensões axiais do motor. 6 modelos foram analisados, mostrados na Figura 15, com base nas estimativas apresentadas na seção 3.5. A tabela 1 apresenta as principais características dos rotores comerciais considerados.

Figura 15 – Geometrias de estatores comerciais avaliados



Fonte: Autor.

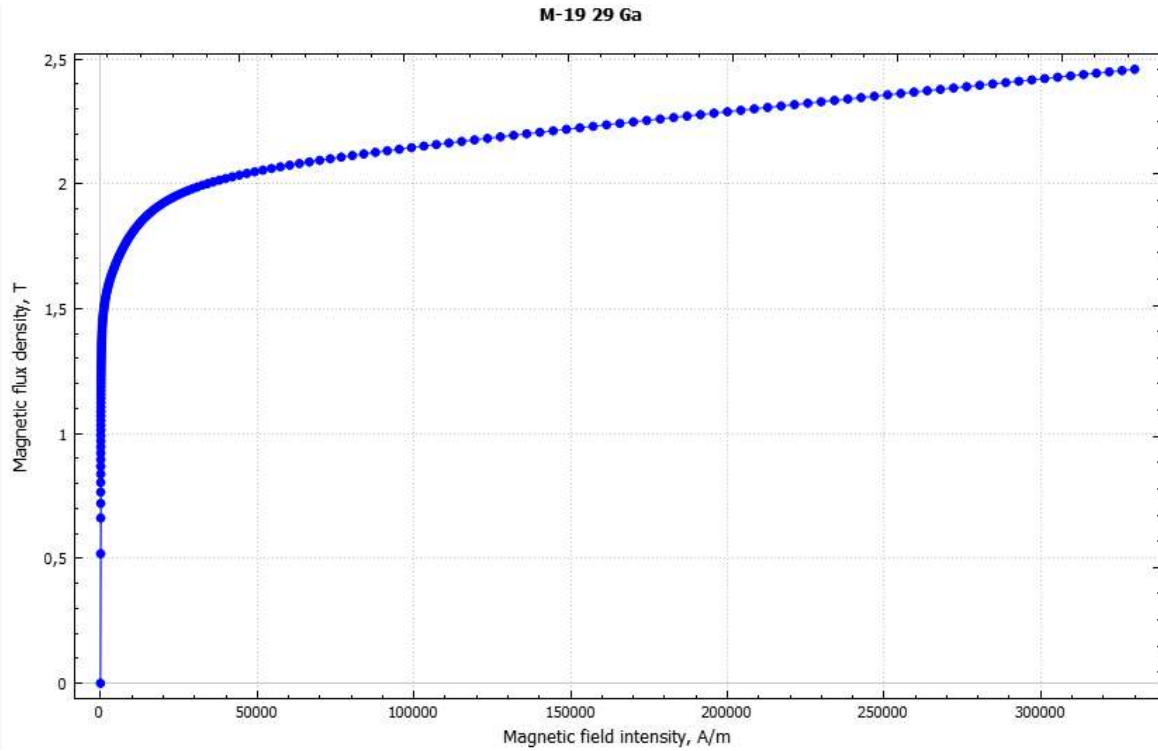
Tabela 1 – Geometrias de estatores comerciais avaliados

<b>Modelo</b>	<b>Diâmetro Externo [mm]</b>	<b>Diâmetro Interno [mm]</b>	<b>Número de Dentes</b>	<b>Área Entre Dentes [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Área Total Entre Dentes [m<sup>2</sup>]</b>
<b>61.5-E-1</b>	61,5	35,5	24	0,0000406	0,0009744
<b>80-28 -E</b>	80	30	24	0,000059	0,001416
<b>80-46-E</b>	80	46	24	0,000068	0,001632
<b>81-E</b>	81	58	36	0,0000337	0,0012132
<b>100.38-E</b>	100	38	24	0,0000918	0,0022032
<b>100.78</b>	100	78	36	0,0000445	0,001602

Fonte: Autor.

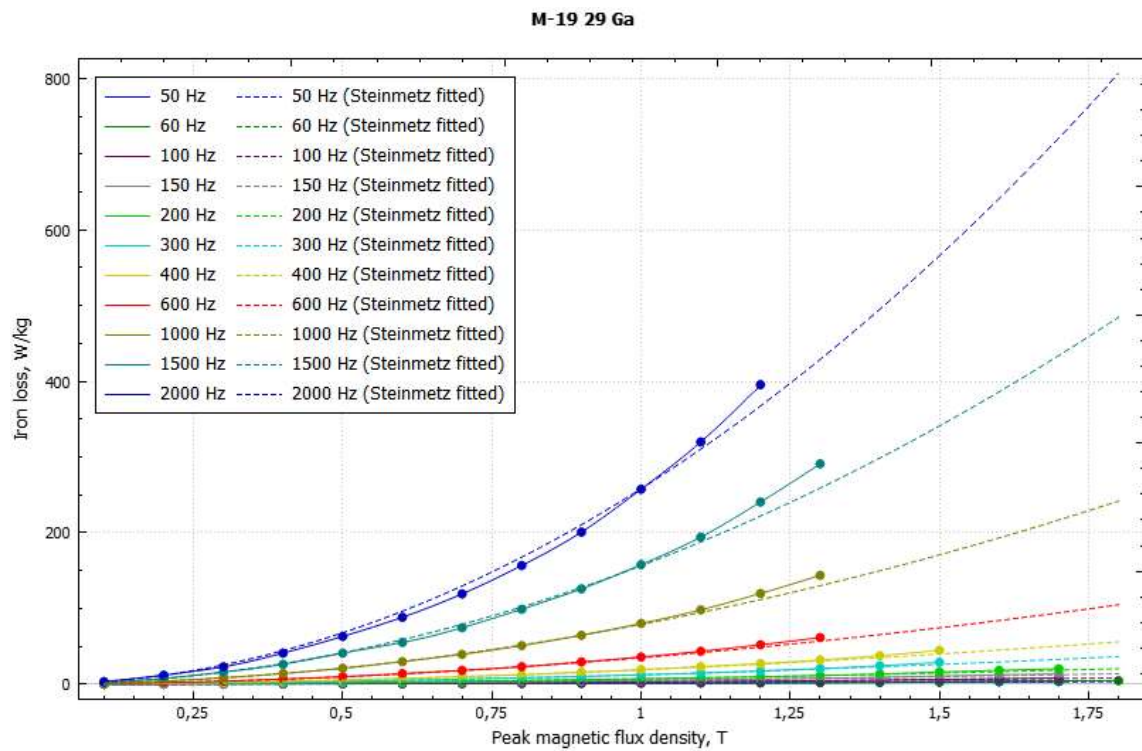
O material selecionado para a confecção do estator é um aço silício capaz de alto fluxo magnético classe M19 de 0,286 mm de espessura. Sua curva de saturação é apresentada na Figura 16 e seus dados para modelagem de perdas no núcleo na Figura 17.

Figura 16 – Curva de saturação do aço silício M19



Fonte: MOTOR XP.

Figura 17 – Perdas no aço silício M19



Fonte: MOTOR XP.



#### 4.1.4. Imãs

De forma a diminuir o número de permutações possíveis, o material do imã foi fixado em classe N42SH.

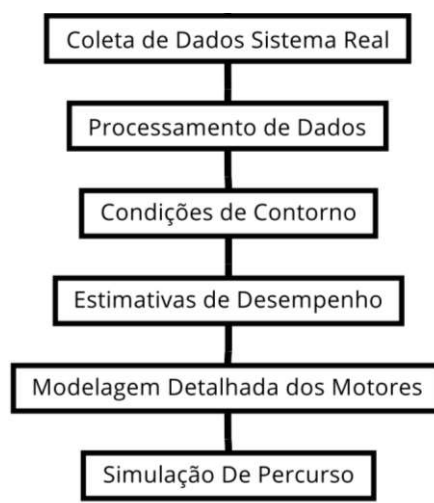
Apesar de o formato do imã ter grande impacto na performance do motor (LASKARIS; KLADAS, 2011), novamente para simplificar o número de configurações, decidiu-se limitar-se a imãs de segmento de anel e de espessura constante

## 4.2. MÉTODOS

### 4.2.1. Considerações Gerais

O fluxograma do desenvolvimento do projeto do motor objeto de estudo deste TCC é apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Fluxograma do desenvolvimento do projeto

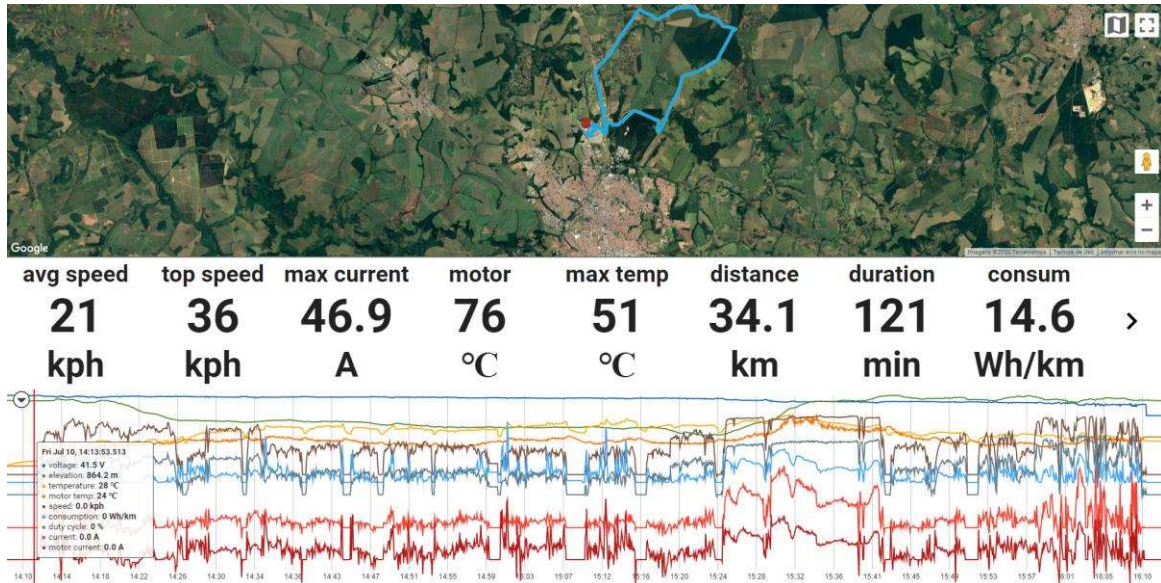


Fonte: Autor.

### 4.2.2. Coleta de Dados do Sistema Real

A coleta de dados foi realizada por meio de um modulo Bluetooth da empresa Metr conectado ao controlador e ao celular para gravação de diversos parâmetros durante o uso, um exemplo de uma sessão de captura é apresentado na Figura 19.

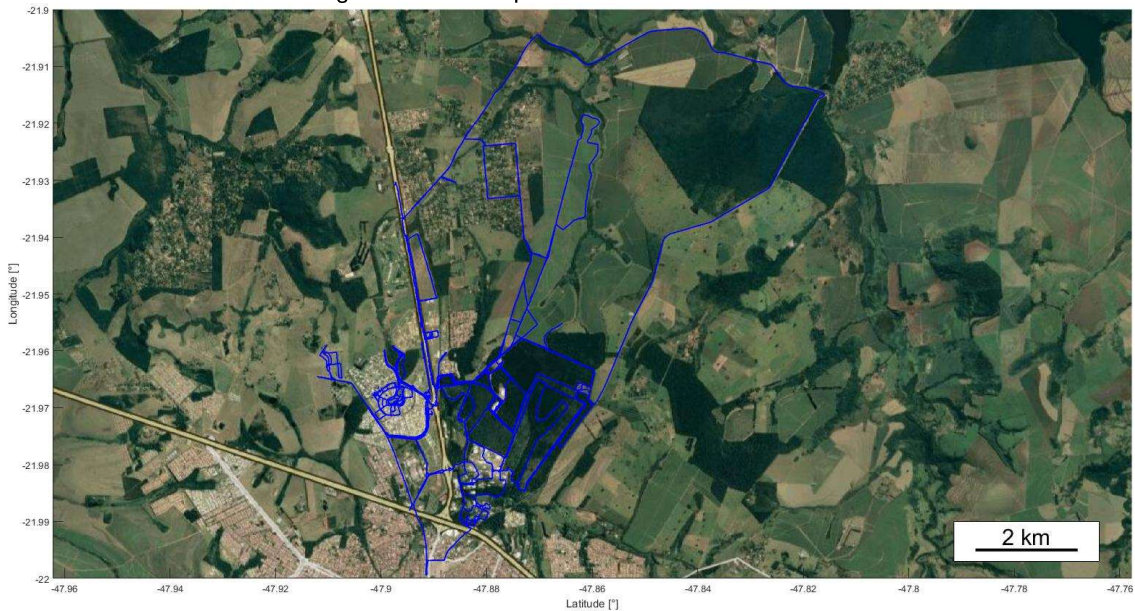
Figura 19 – Exemplo de dados coletados



Fonte: Autor.

Os dados utilizados representam 378 km percorridos e aproximadamente 200.000 pontos. Na Figura 20 é apresentado todo o trajeto percorrido durante esta coleta de dados no período de abril a setembro de 2020, sendo concentrado ao norte da cidade de São Carlos – SP.

Figura 20 – Rotas percorridas na coleta de dados



Fonte: Autor.

### **4.2.3. Processamento de Dados**

Os dados coletados foram processados com o código PROCESSADOR DADOS DE TELEMETRIA, desenvolvido pelo autor e disponível no apêndice A. Os diversos arquivos de dados são lidos e os dados de interesse concatenados em vetores únicos de corrente e rotação de forma a simplificar a análise. Com as características do skate mostrado na seção 4.1.2 conhecidas e utilização da modelagem mostrada na seção 3.4 calcularam-se dois vetores resultantes, de velocidade e de torque na roda, sendo o torque exclusivamente útil, isto é, excluindo as ineficiências do sistema de transmissão e do motor utilizados na coleta de dados.

Com o código GERADOR MAPA DE EFICIENCIA, desenvolvido pelo autor e disponível no apêndice A, fazendo uso das equações 2 e 3, é possível determinar a eficiência de um motor em qualquer ponto de operação.

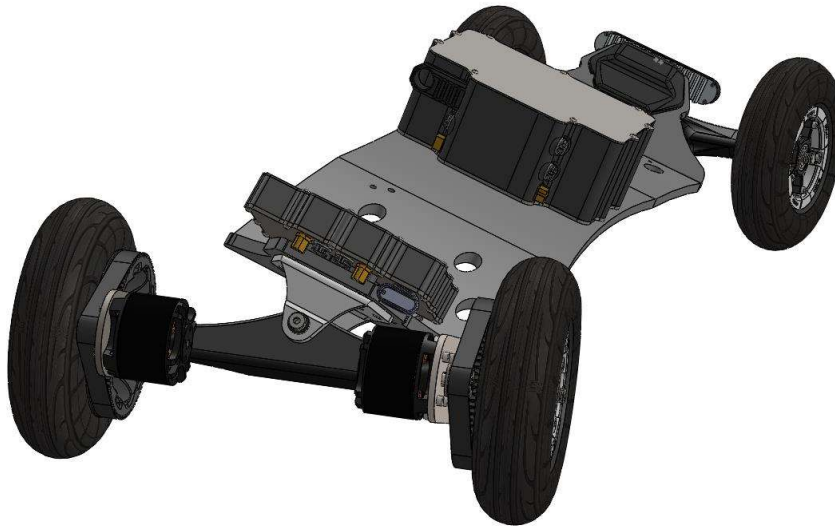
### **4.2.4. Condições de Contorno**

O estabelecimento de condições de contorno tornou-se necessário para compatibilizar o projeto do motor às características do skate elétrico utilizado para testes.

#### **4.2.4.1. Geométricas**

De forma a limitar as dimensões máximas do motor, um estudo foi feito utilizando um modelo 3D já existente e considerando a cinemática do sistema de direção. Na Figura 21 é apresentado o sistema de direção em seu ângulo máximo

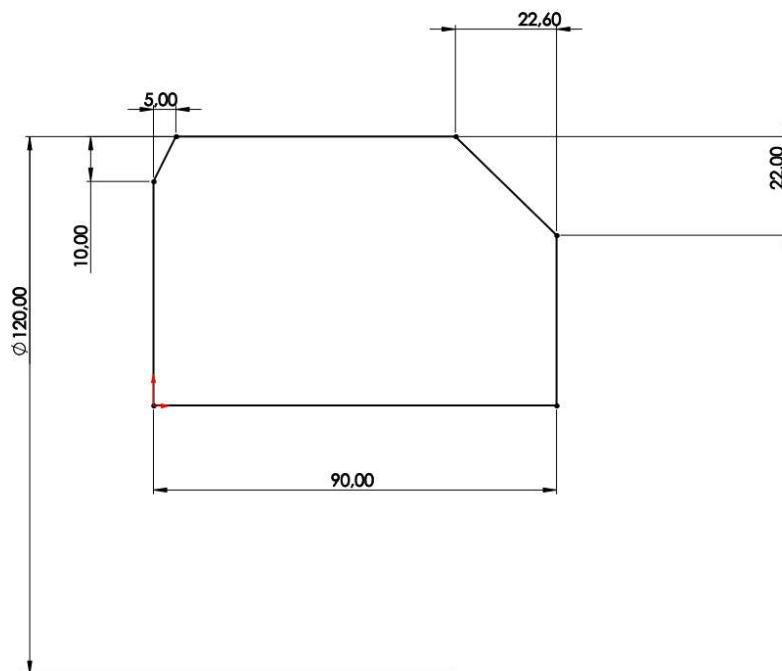
Figura 21 – Sistema de direção em ângulo máximo



Fonte: Autor.

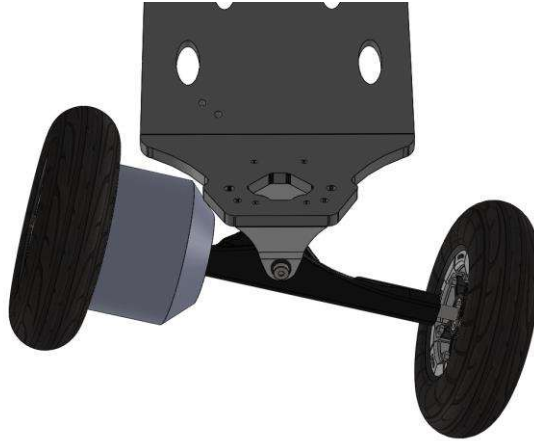
Derivado deste modelo e com folgas mínimas definidas de 10 mm no sentido radial e 6 mm no sentido axial, delimitou-se o envelope onde o motor seria instalado e este é mostrado na Figura 22 e 25.

Figura 22 – Envelope delimitador do motor



Fonte: Autor.

Figura 23 – Envelope do motor inserido no skate



Fonte: Autor.

#### 4.2.4.2. Elétricas

O principal limite é a capacidade de corrente fornecida pelo controlador utilizado. O modelo VESC 6 é capaz de sustentar 100 A de corrente continuamente e 150 A de corrente de pico desde que devidamente resfriado.

A tensão nominal da bateria é de 37 V e varia de 42 V a 30 V, portanto o motor deve ser capaz de obter as velocidades determinadas na seção 4.1 com estas tensões

#### 4.2.5. Estimativas de Desempenho

A partir da modelagem matemática apresentada na seção 3.4, foi desenvolvida uma planilha de cálculo mostrada na Figura 24 que permite comparar os diversos modelos de estatores pré-selecionados de forma simples e sem necessidade de simulações por elementos finitos que demandam grande quantidade de tempo para serem configuradas para cada possível configuração.

Algumas variáveis foram fixadas de forma a isolar o efeito que somente os diversos modelos de estatores tem na performance do motor. Os ímãs recobrem 75% da área do rotor e possuem 3 mm de espessura, o vão de ar é fixado em 0.5 mm, e o preenchimento com fios de cobre em 60% da área total disponível mostrada na tabela 1.

Figura 24 – Planilha de cálculo para estimativa de desempenho

Geometric Parameters Input		Calculated General Parameters	
Magnet Height [m]	0,057	Flux Concentration Factor	0,746
Magnet Width [m]	0,00785	Permeance Coefficient	8,040
Magnet Thickness [m]	0,003		
Number of Magnet Poles	30		
Stator Outside Diameter	0,1		
Axial Stack Length [m]	0,057		
Air Gap Thickness [m]	0,0005		
Number of Slots	36	Calculated Geometric Parameters	
Lamination Staking Factor	0,95	Magnet Cross Section Area [m <sup>2</sup> ]	0,01343
Tooth Body Width [m]	0,0026	Air Gap Cross Section Area [m <sup>2</sup> ]	0,01800
Rotor Yoke Width [m]	0,005	Rotor Inside Radius [m]	0,05025
Stator Yoke Width [m]	0,0017		
Slot Area [m <sup>2</sup> ]	0,0000445		
Slot Fill Factor	70,00%		
Wire Resistivity	0,000000017	Calculated Magnetic Flux	
		Air Gap Flux Density	0,77228
		Total Flux	0,0139
General Parameters		Tooth Flux	0,00039
Leakage Factor	0,9	Stator Tooth Flux Density	2,74214
Reluctance Factor	1	Stator Yoke Flux Density	2,09693
		Rotor Yoke Flux Density	0,67731
Material Properties		Motor Constants	
Remanence [T]	1,3	Km	2,15709
Relative Recoil Permeability	1,05		

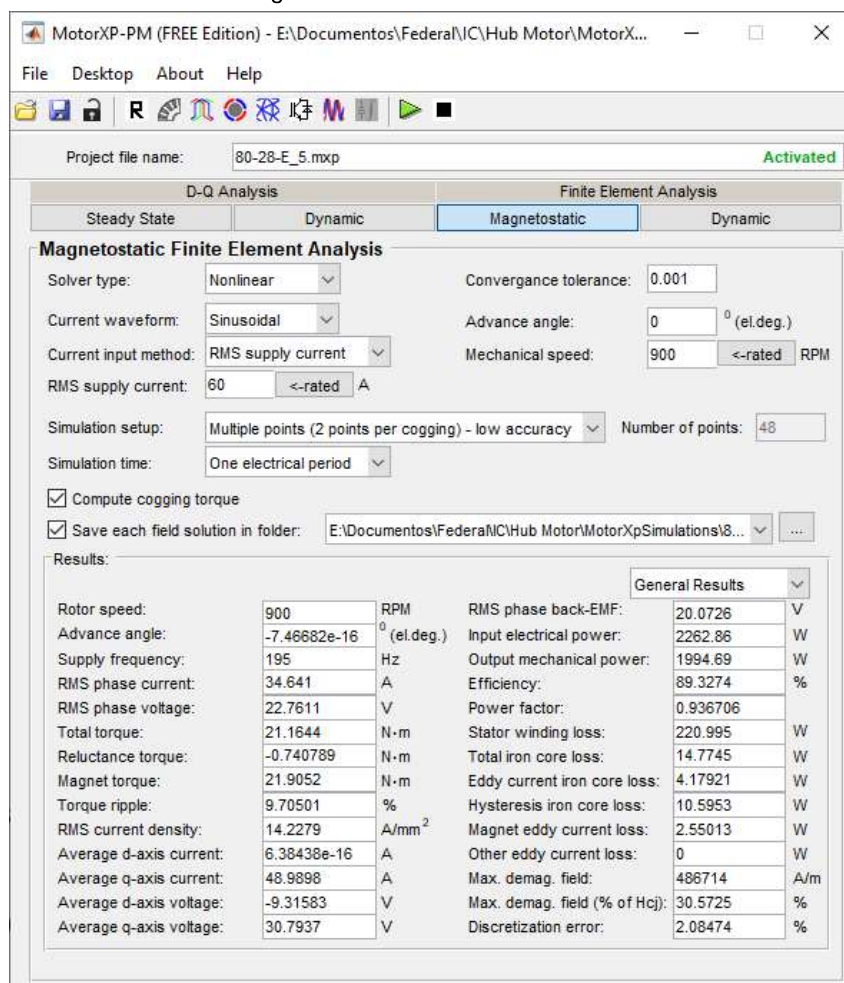
Fonte: Autor.

#### 4.2.6. Modelagem Detalhada dos Motores

De forma a avaliar detalhadamente a performance dos modelos de estatores selecionados na etapa anterior, utilizou-se o software MotorXP-PM, um software dedicado para análise e simulação de motores elétricos sem escova, sua interface principal é mostrada na Figura 25.



Figura 25 – Interface MotorXP-PM



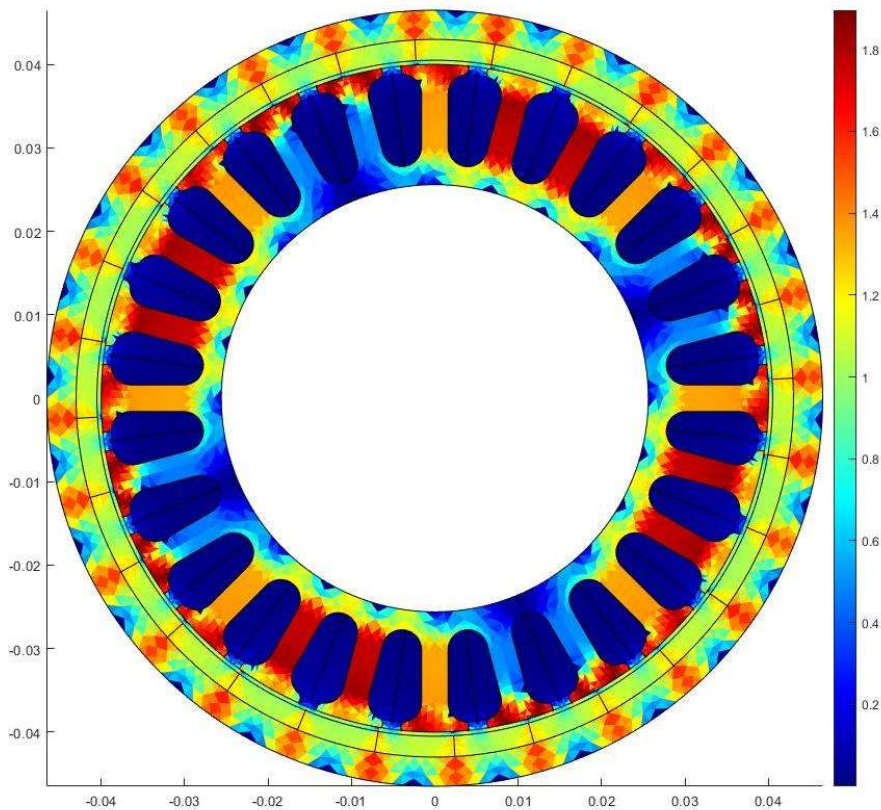
Fonte: Autor.

Para encontrar as melhores configurações, realizou-se uma otimização manual, variando os parâmetros de dimensões dos ímãs, números de polos magnéticos (POTNURU; RAO, 2019), dimensão axial do estator e configuração dos enrolamentos de cobre.

Algumas métricas de performance foram definidas:

- Kv próximo de 30 rpm/V de forma a garantir os requerimentos de velocidade
- Campo de desmagnetização máximo próximo de 70% com o motor a 100°C e corrente de 100 A
- Densidades de fluxo magnético abaixo de 1.8T de forma a minimizar perdas no núcleo, exemplo na Figura 26

Figura 26 – Exemplo de densidade de fluxo magnético



Fonte: Autor.

#### 4.2.7. Simulação de Percurso

Com melhores candidatos selecionados e o código SIMULADOR DE ROTA, desenvolvido pelo autor e disponível no apêndice A, o percurso utilizado na coleta de dados pode ser refeito virtualmente e podemos calcular o consumo de energia e a eficiência global de cada motor. O código funciona calculando através de cada ponto de velocidade e torque as perdas no cobre e no núcleo, bem como a energia útil convertida em energia mecânica.

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 5.1. ANALISE SISTEMA REAL

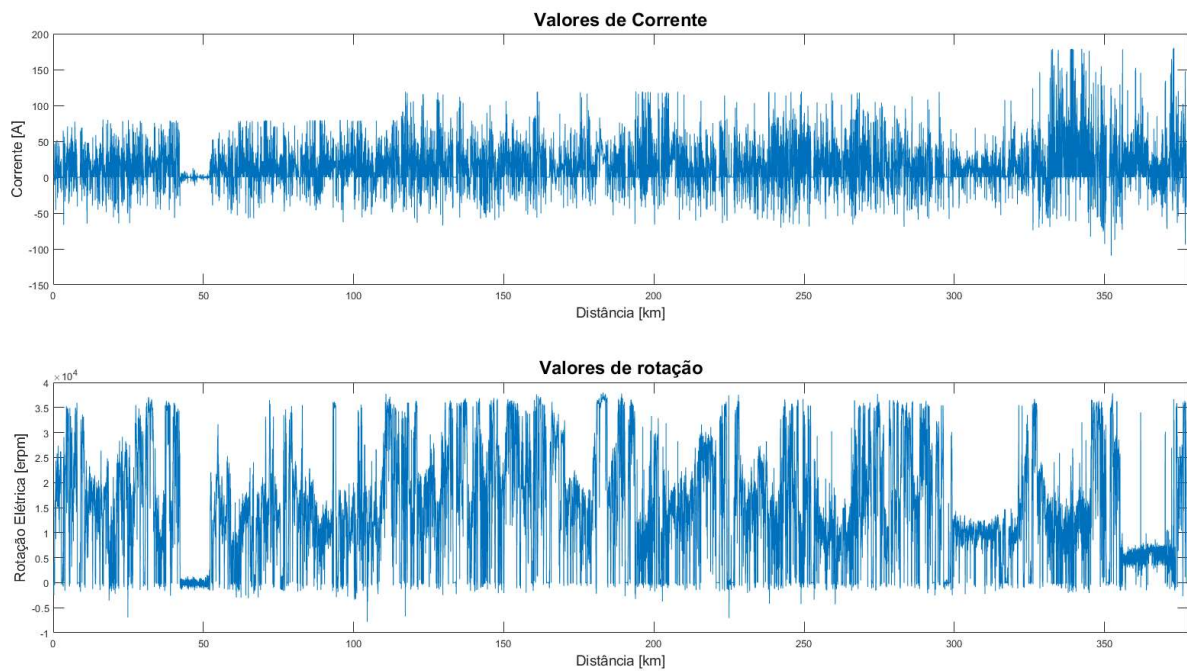
Os dados gerados a partir do descrito em 4.2.2 foram analisados e mostraram que foi utilizado o total de 5052 Wh, dos quais 265 Wh foram regenerados e recarregaram a bateria



durante a frenagem, resultando em um total de 4787 Wh utilizados e uma eficiência energética de 12,67 Wh/km. Desconsiderando a eficiência do carregador das baterias e uma tarifa energética de 0,572 R\$/kWh, esta distância percorrida teve um custo de R\$2,89, evidenciando o baixo custo de uso dos VEL.

Dos dados coletados, são de interesse os vetores de rotação do campo magnético e corrente do motor, que são apresentados na Figura 27.

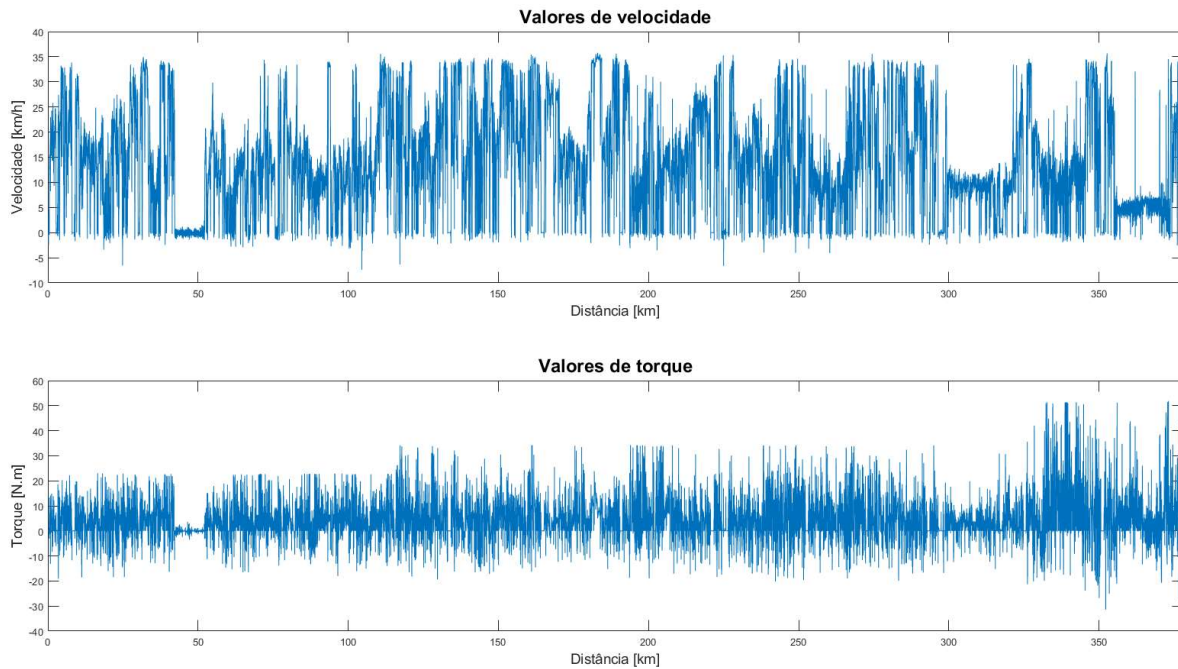
Figura 27 – Valores de corrente e rotação coletados



Fonte: Autor.

A partir da rotação do motor, relação de transmissão e diâmetro da roda, calculou-se um vetor de velocidade, e a partir do vetor de corrente calculou-se um vetor de torque. Os vetores de velocidade e torque na roda são apresentados na Figura 28.

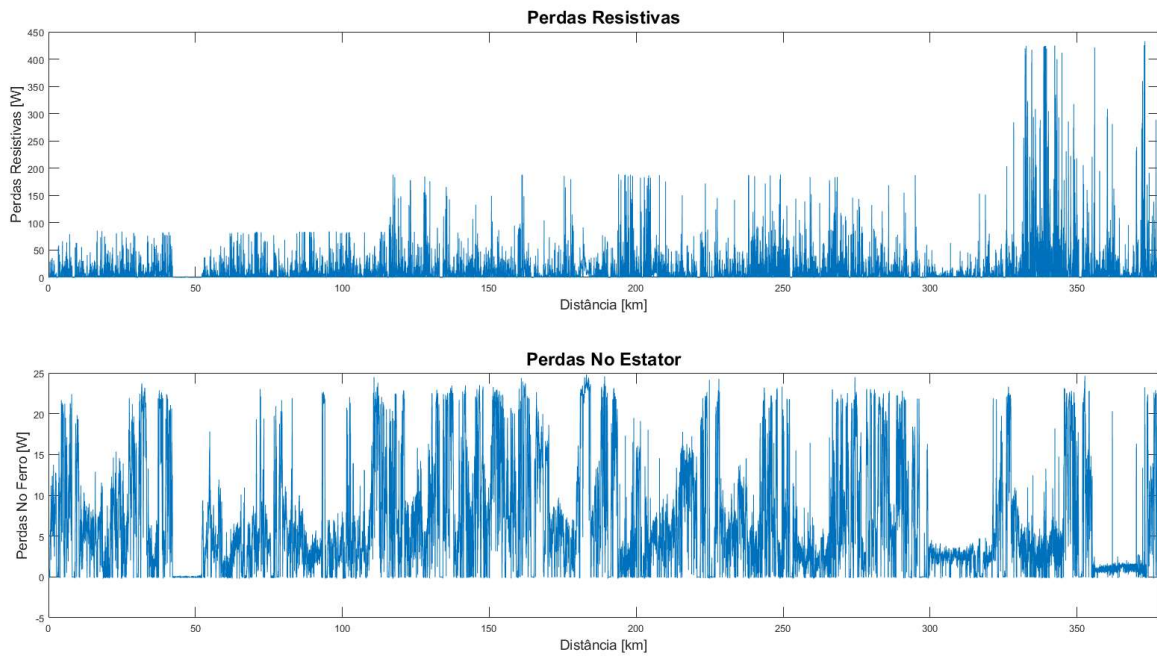
Figura 28 – Valores de corrente e rotação coletados



Fonte: Autor.

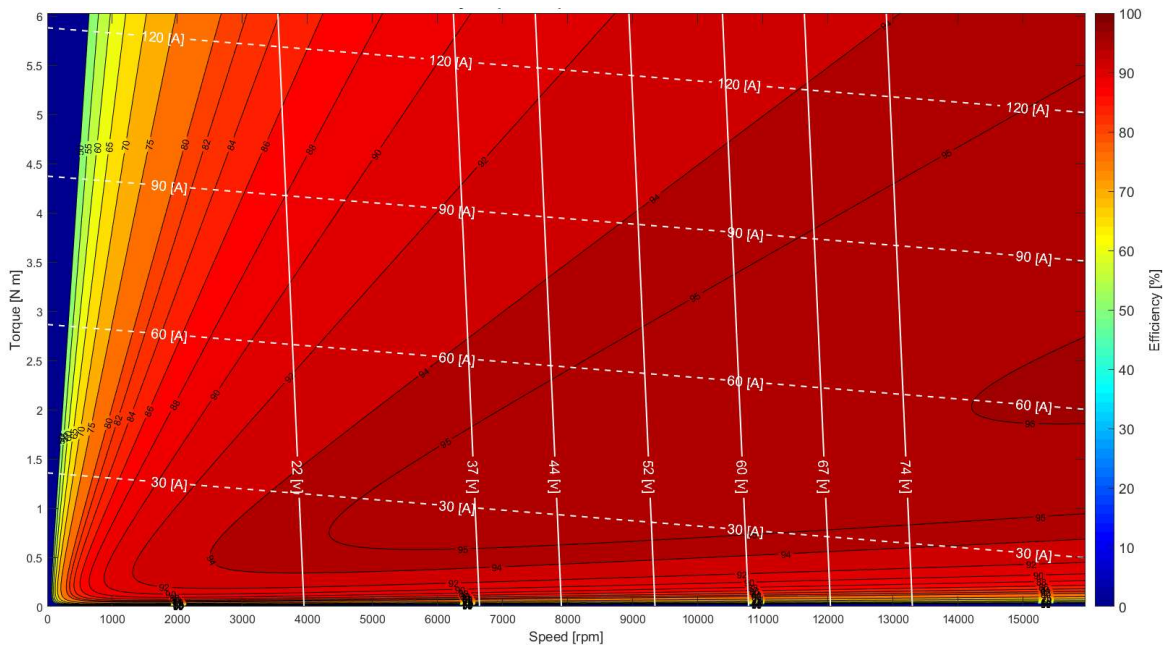
Os valores de torque incluem perdas internas do motor e do sistema de transmissão. As eficiências de transmissão por correia sincronizadora variam de 88% a 99% com grande dependência no torque transmitido (DEREYNE et al., 2000). Considerando a distribuição de torque nos dados coletados, adotou-se um valor de 95 % de eficiência. As perdas resistivas e no estator são apresentadas na Figura 29. A Figura 30 mostra o mapa de eficiência do motor utilizado na coleta de dados e a Figura 31 mostra os mapas de perda no cobre e no núcleo respectivamente.

Figura 29 – Perdas no cobre e no núcleo do motor usado na coleta de dados



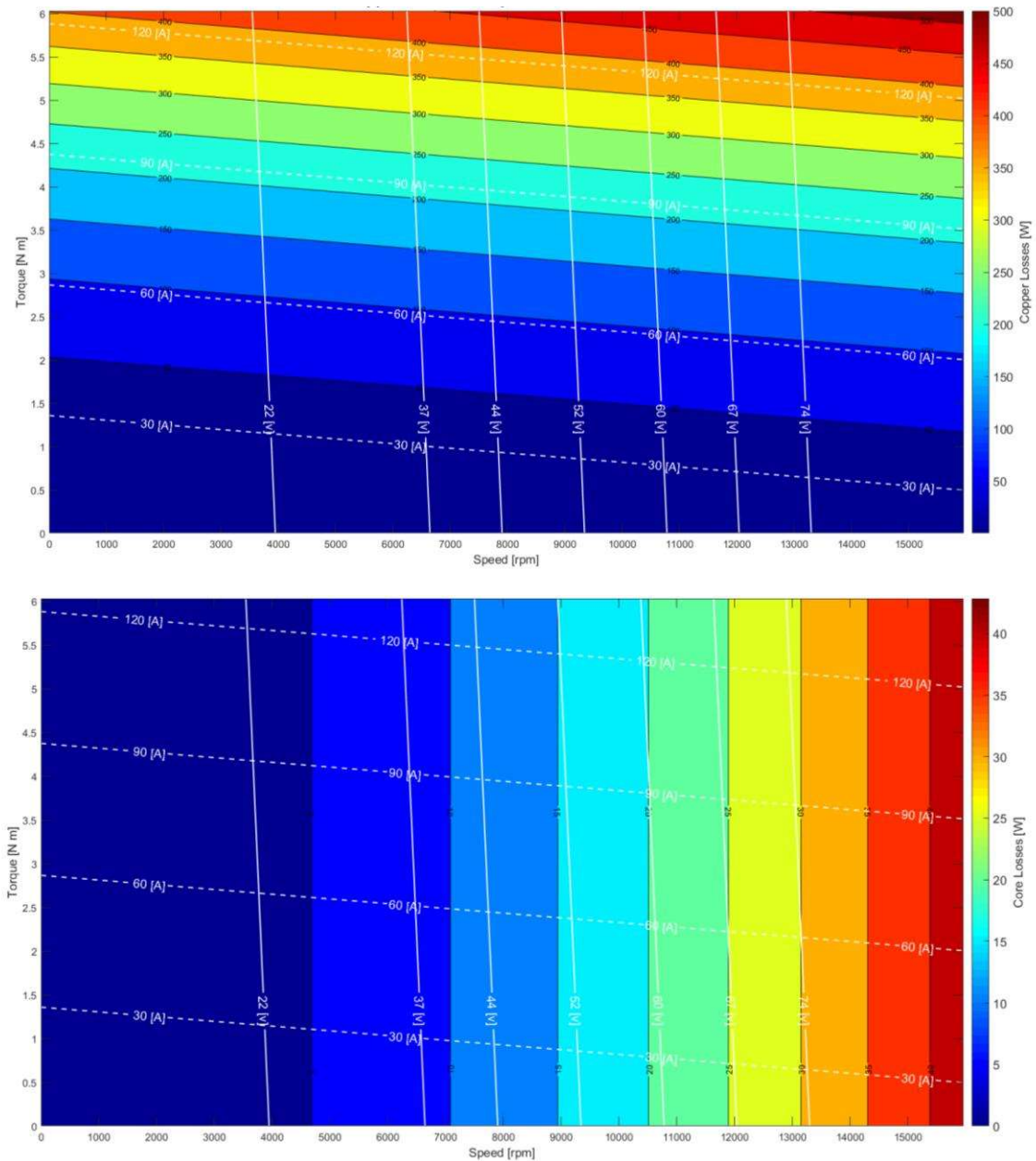
Fonte: Autor.

Figura 30 – Mapa de eficiência do motor utilizado na coleta de dados



Fonte: Autor.

Figura 31 – Perdas no cobre e no núcleo do motor utilizado na coleta de dados

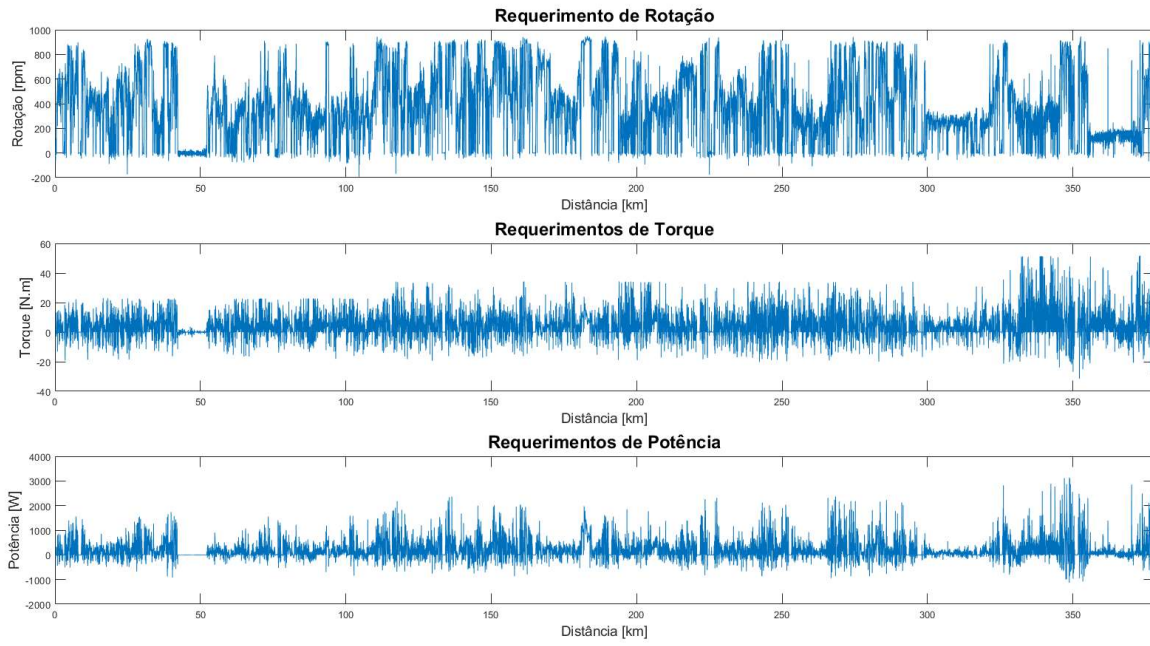


Fonte: Autor.

Integrando estes vetores e comparando com o total de energia convertida pelos motores, as perdas resistivas representam um total de 1,5% e as perdas no ferro do estator 3,28%, quando consideramos também a eficiência da redução por correias, a eficiência total do sistema de tração é de 90,5%. Subtraindo todas perdas, os requerimentos de velocidade e torque útil são mostrados na Figura 32. A Figura 33 mostra um mapa de calor das frequências relativas dos pontos de velocidade e torque, valores próximos de 1 ocorrem frequentemente e valores mais próximos de 0 ocorrem com pouca frequência.

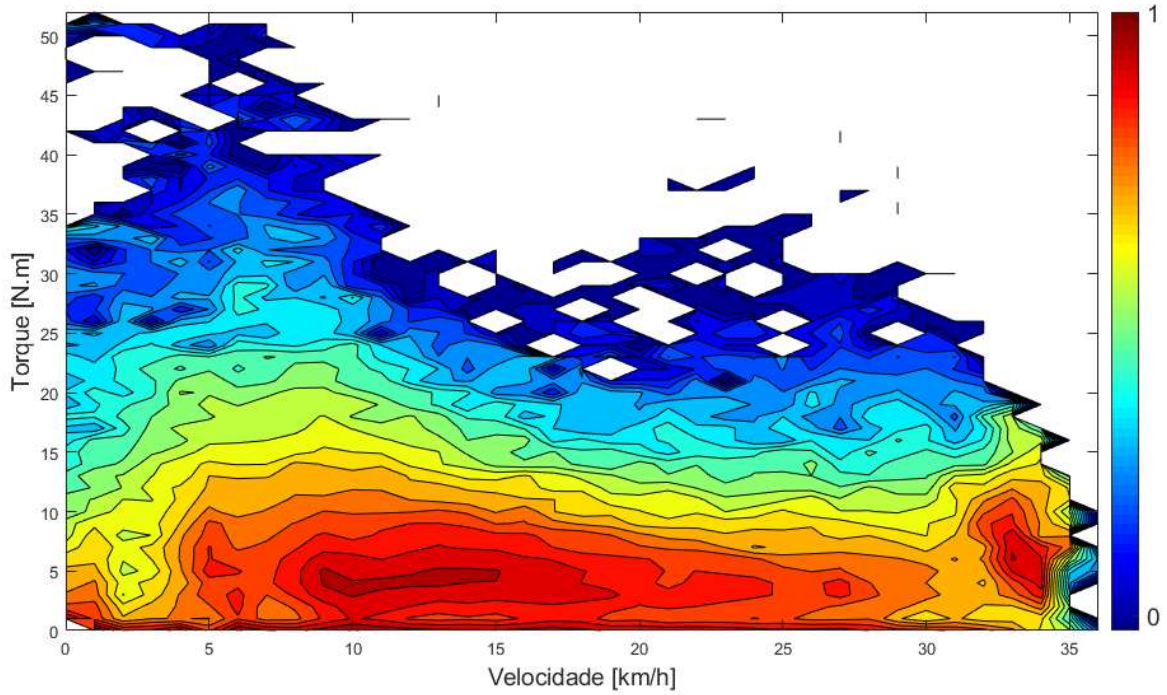


Figura 32 – Requerimentos para o motor a ser projetado



Fonte: Autor.

Figura 33 – Mapa de calor dos pontos de velocidade e torque



Fonte: Autor.

## 5.2. ESTATOR

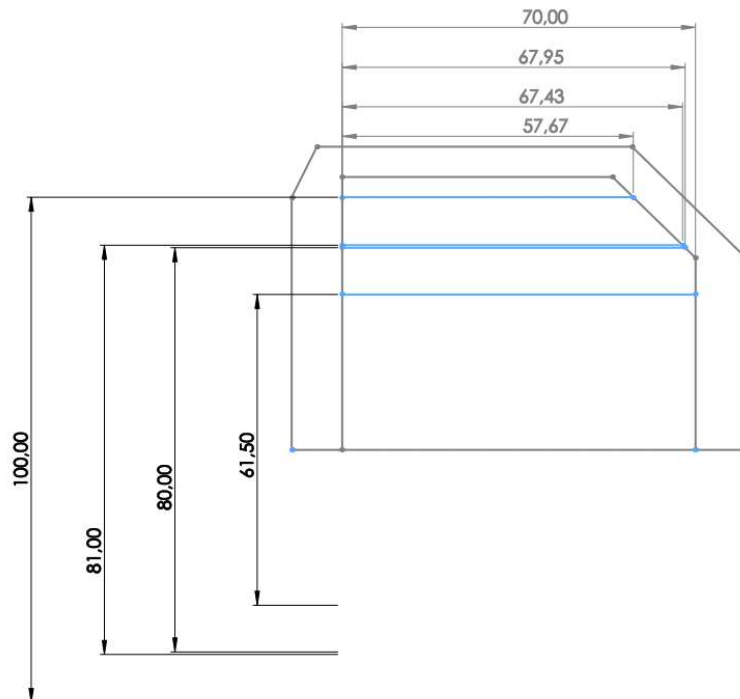
De acordo com as limitações geométricas mostradas na seção 4.2.3, determinou-se um comprimento axial máximo para cada modelo de estator em função de seu diâmetro externo, levando em conta um espaçamento adicional de 6 mm radialmente e 10 mm axialmente com respeito aos eixos de simetria para a carcaça, rolamento e outros componentes do motor além do estator. A tabela 2 e a Figura 34 mostram a correspondência de cada estator com seu comprimento axial máximo.

Tabela 2 – Comprimentos axiais limites

Modelo	Comprimento Axial Máximo [mm]
61.5-E-1	70
80-28 -E	68
80-46-E	68
81-E	67
100.38-E	57
100.78	57

Fonte: Autor.

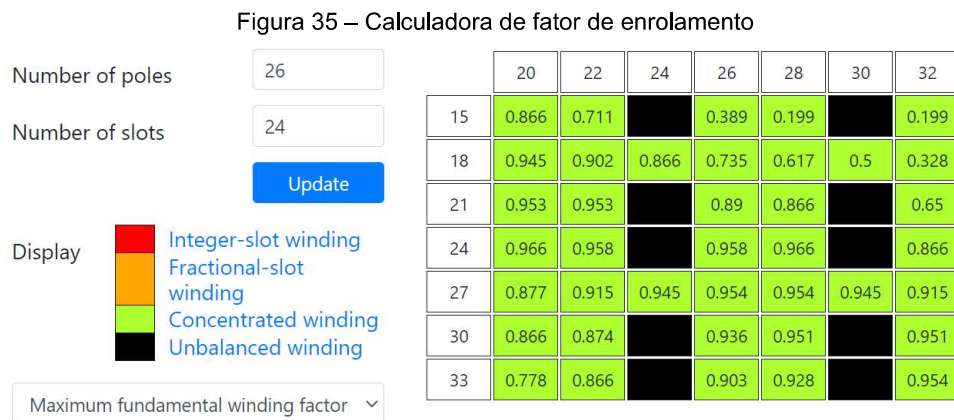
Figura 34 – Esquema das limitações geométricas



Fonte: Autor.

### 5.3. GEOMETRIA DO MOTOR

Dado os números de dentes de 24 e 36 nos modelos de estatores considerados, há diversos números de polos de ímãs válidos, (Emetor, 2020) fornece uma calculadora apresentada na Figura 35 que dada uma combinação de dentes e polos, resulta no fator de enrolamento, que determina a máxima porcentagem do fluxo magnético no vão de ar que realiza trabalho. O torque produzido é diretamente proporcional a este fator.



Fonte: EMETOR, (2020)

A Equação 14 da seção 3.4 mostra que o torque é diretamente proporcional ao número de polos magnéticos, no entanto, ao analisar os fatores de enrolamento, verificamos que quando o número de polos é significativamente maior que o número de dentes, o torque e a constante do motor tendem a diminuir. De forma a isolar somente o efeito dos diversos modelos de estatores, os modelos com 24 dentes foram restringidos a um rotor com 20 polos e os modelos com 36 dentes a um com 30 polos.

### 5.4. SIMULAÇÃO – ESTIMATIVAS

Os resultados de interesse para os diversos modelos de estatores são mostrados na tabela 3.

Tabela 3 – Resultados de estimativas de performance

Modelo	K <sub>m</sub> Máximo	K <sub>m</sub> 30 mm	Fluxo Dente	Fluxo Jugo Estator
61.5-E-1	1,1	0,72	2,99	1,09
80-28 -E	1,77	1,17	2,69	1,86
80-46-E	1,9	1,26	3,29	1,06
81-E	1,65	1,05	2,88	1,15
100.38-E	2,52	1,83	2,67	1,78
100.78	2,15	1,56	2,74	2,09

Fonte: Autor.

Na Tabela X, K<sub>m</sub> máximo representa o máximo valor considerando as dimensões axiais máximas determinadas na seção 4.3. K<sub>m</sub> 30 mm representa o K<sub>m</sub> normalizado para uma dimensão axial de 30 mm.

Os modelos 61.5-E-1, 80-46-E e 81-E possuem fluxo no dente muito acima dos outros modelos considerados, o que significa que é necessário reduzir o fluxo magnético no vão de ar para evitar saturação magnética do material e, portanto, o K<sub>m</sub> seria reduzido. Os modelos 61.5-E-1 e 81-E possuem um K<sub>m</sub> abaixo do definido na seção 3.5.

Foram selecionados dois modelos mais promissores para serem avaliados mais detalhadamente, sendo estes os 80-28-E e 100.38-E, ambos com 24 dentes.

## 5.5. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Avaliou-se 10 configurações de motores diferentes, 6 para o estator modelo 80-28-E e 4 para o 100.38-E e os resultados são mostrados na tabela 4.



Tabela 4 – Resultados das diversas configurações simuladas

Configuração	Polos	Ângulo Elétrico Imã [°]	Espessura Imã [mm]	Comprimento Axial [mm]	Diâmetro Externo [mm]	$K_m$ [N.m/W <sup>1/2</sup> ]	$K_v$ [rpm/V]	Volts por Dente	Perdas no Núcleo [W]	Perdas no Cobre [W]	Eficiência [%]	Campo Desmagnetizante [%]	Densidade Fluxo no Dente [T]	Densidade de Fluxo Centro do Estator [T]
80-28-E_1	20	130	2,5	68	94	1,1	29,44	9	10	365	84%	63%	1,8	1,2
80-28-E_2	20	180	3	68	95	1,23	28,6	9	11,3	365	85,50%	69%	1,87	1,33
80-28-E_3	28	180	2,5	68	93	1,46	30,8	7	16	220	89,50%	70%	1,73	1,24
80-28-E_4	32	180	2,5	68	93	1,37	29,77	7	16,2	221	88,90%	65%	1,49	1,2
80-28-E_5	26	180	2,5	68	93	1,42	31,87	7	14,8	220	89,30%	69%	1,79	1,27
80-28-E_6	28	180	5	45	101	1,15	28,9	11	11,4	383	84,18%	72%	1,81	1,32
100.38-E_1	20	180	3	57	118	1,67	28,8	8	14,7	201	91,52%	73%	1,89	1,25
100.38-E_2	28	180	3	57	116	2,14	29,8	7	21,1	121	93,80%	68%	1,78	1,19
100.38-E_3	28	180	5	45	122	1,89	29,5	9	17,4	166	92,43%	71%	1,81	1,21
100.38-E_4	28	180	7	30	129	1,34	30,9	13	11.1	255	88,25%	73%	1,77	1,29

Fonte: Autor.

Inicialmente verificou-se que aumentar o número de polos resulta em um aumento de  $K_m$  e diminuição do fluxo nos dentes. Verificou-se também que quando toda superfície interna do rotor é coberta com imãs, o que corresponde a um ângulo elétrico de 180°, o  $K_m$  também é maximizado. Destes resultados, 2 configurações que satisfazem os requisitos impostos foram selecionadas, 80-28-E\_3 e 100.38-E\_3. Também foi selecionada a configuração 80-28-E\_6, que possui comprimento axial reduzido e  $K_m$  muito abaixo do mínimo estimado de forma a testar a performance quando simulado no percurso.

## 5.6. SIMULAÇÃO PERCURSO REAL

Para as 3 configurações selecionadas na seção 5.5, os resultados são apresentados na tabela 5. O consumo do skate elétrico utilizado para a coleta de dados com o sistema tradicional de redução por correias teve uma eficiência energética de 12,67 Wh/km.

Tabela 5 – Resultados da simulação do percurso

Modelo	Consumo (Wh/km)	Eficiência (%)	Perdas no Núcleo (%)	Perdas no Cobre (%)
<b>80-28 -E_3</b>	12,948	89,08	5,06	5,86
<b>80-28 -E_6</b>	13,357	84,91	3,43	11,66
<b>100.38-E_3</b>	12,492	92,47	5,38	2,14

Fonte: Autor.

O modelo final selecionado foi o 80-28-E\_3, que apesar de resultar em eficiência 3,4% menor que a configuração 100.38\_E\_3, possui um diâmetro externo 29 mm menor e portando, um vão livre entre a carcaça do motor e o pavimento maior, o que é importante considerando o uso em terrenos acidentados. A tabela 6 mostra as principais características deste motor. As Figuras 36 a 39 apresentam o modelo em CAD e a Figura 40 apresenta uma montagem em CAD de um par de motores no skate elétrico utilizado na coleta de dados deste estudo.

Tabela 6 – Características do motor 80-28-E\_3

<b>K<sub>v</sub> [rpm/V]</b>	30,8
<b>K<sub>m</sub> [N.m/W<sup>-1/2</sup>]</b>	1,46
<b>Comprimento Estator [mm]</b>	68
<b>Diâmetro Estator [mm]</b>	80 mm
<b>Número de Dentes</b>	24
<b>Número de Polos</b>	28
<b>Resistência de Fase [Ω]</b>	0,0614
<b>Torque Máximo @ 100 °C [N.m]</b>	31
<b>Comprimento Externo [mm]</b>	109,5
<b>Diâmetro Externo [mm]</b>	93

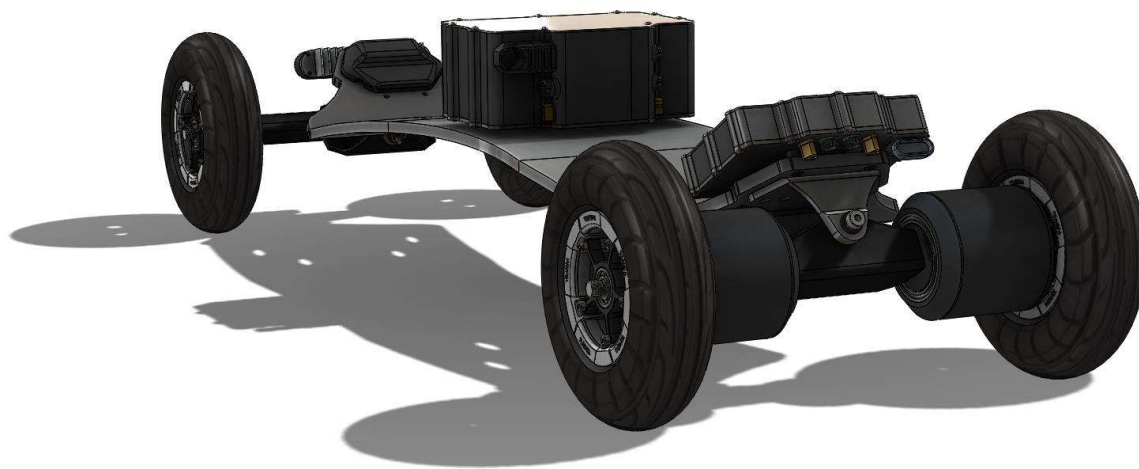
Fonte: Autor.

Figura 36 a 39 – Modelo em CAD do motor 80-28-E\_3



Fonte: Autor.

Figura 40 – Montagem em CAD do skate utilizado com motores 80-28-E\_3



Fonte: Autor.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho realizou-se, como proposto, o projeto de um sistema trativo sem o uso de reduções mecânicas para um skate elétrico de uso fora de estrada, bem como a simulação e comparação com o sistema original que faz uso de reduções mecânicas. Os resultados mostraram que a performance do sistema proposto é similar a um sistema que faz uso de reduções mecânicas, que resultou em um consumo de 12,67 Wh/km, enquanto que o novo motor proposto apresentou um consumo de 12,948 Wh/km no percurso simulado, um aumento de 2%, que é considerado aceitável dado as vantagens de menor chances de danos, menos manutenções necessárias e operação silenciosa

O objetivo geral foi concluído com o projeto final do motor. Os objetivos específicos também foram satisfeitos, com modelagens matemáticas para caracterizar o desempenho de diversas configurações de motor, coleta de dados de um sistema real em condições reais de uso e a definição de uma metodologia que permite dimensionar um motor a partir de dados coletados, esta metodologia pode ser repetida com outros dados coletados ou dados coletados de múltiplos usuários.

Para futuros trabalhos, seria interessante uma modelagem térmica que possa ser aplicada ao projeto, bem como explorar as capacidades de programação disponíveis no software Motor XP-PM para implementar um algoritmo de otimização que automaticamente analise diversas configurações e identifique os melhores motores.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BODINE. **Small Gearmotors, Motors and Controls**. [s.l: s.n.].

DERAMMELAERE, S. et al. A quantitative comparison between BLDC, PMSM, Brushed DC and Stepping Motor Technologies. **2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**, p. 1–5, 2016.

DEREYNE, S. et al. An efficiency measurement campaign on belt drives. 2000.

EMETOR Winding Editor. Disponível em :< <https://www.emetor.com/windings/>>. Acesso em out. de 2020

EWERT, A. et al. **Small and Light Electric Vehicles : An Analysis of Feasible Transport Impacts and Opportunities for Improved Urban Land Use**. 2020.

HANSELMAN, D. C. **Brushless Permanent Magnet Motor Design**. 2. ed. [s.l.] IEEE, 2003. v. 1

KOLLER, M. R. **Case study : Electric Skateboards**. 2019.

LASKARIS, K. I.; CHANIOTIS, A.; KLADAS, A. G. High performance traction motor design and construction for small passenger electric car. **19th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010**, 2010.

LASKARIS, K. I.; KLADAS, A. G. High torque internal permanent magnet wheel motor for electric traction applications. **Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, ICEM'08**, p. 8–11, 2008.

LASKARIS, K. I.; KLADAS, A. G. Permanent-magnet shape optimization effects on synchronous motor performance. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 58, n. 9, p. 3776–3783, 2011.

LIBERT, F. **Design, optimization and comparison of permanent magnet motors for a low-speed direct-driven mixer**. [s.l: s.n.].

Motor XP-PM. Versions 1.0. VEPCO Technologies, 2020

POTNURU, U. K.; RAO, P. M. Assortment Of Slot And Pole Relation For A Permanent Magnet Brushless DC Motor. n. 8, p. 72–75, 2019.

PYRHONEN, J. **Design of Rotating Electrical Machines 2 Windings**. [s.l: s.n.].

## APÊNDICE A – Códigos Desenvolvidos

### PROCESSADOR DADOS DE TELEMETRIA

```
clc;
clear;
close all

Kv = 190; % [rpm/V]
Kt = 9.55 / Kv; % [N*m/A]
gear_ratio = 0.175;
torque_ratio = Kt/gear_ratio;

logs_name = dir('Eu/*.r');

for i = 1:length(logs_name)

logs{i} = jsondecode(fileread(fullfile('Eu\',logs_name(i).name)));

end

concat_current_vector = logs{1}.motorCurrent;
concat_speed_vector = logs{1}.speed;
concat_latitued_vector = logs{1}.latitude;
concat_longitude_vector = logs{1}.longitude;
concat_rpm_vector = logs{1}.rpm;
total_distance = logs{1}.distance;
total_wh = logs{1}.wh;
total_whRegen = logs{1}.whRegen;

for j = 2:length(logs_name)

concat_current_vector = cat(1,concat_current_vector,logs{j}.motorCurrent);
concat_speed_vector = cat(1,concat_speed_vector,logs{j}.speed);
concat_latitued_vector = cat(1,concat_latitued_vector,logs{j}.latitude);
concat_longitude_vector = cat(1,concat_longitude_vector,logs{j}.longitude);
concat_rpm_vector = cat(1,concat_rpm_vector,logs{j}.rpm);
total_distance = logs{j}.distance + total_distance;
total_wh = logs{j}.wh + total_wh;
total_whRegen = logs{j}.whRegen + total_whRegen;
end

Wh_km = (total_wh - total_whRegen)/(total_distance/1000);

%concat_latitued_vector = -concat_latitued_vector;
concat_torque_vector = concat_current_vector .*torque_ratio;

% figure(1)
%plot(concat_current_vector)

torque_distribution_matrix =
zeros(1+round(abs(max(concat_torque_vector))),1+round(abs(max(concat_speed_
vector))));
```

```

speed_vector_scale =
linspace(0,round(abs(max(concat_speed_vector))),1+round(abs(max(concat_spe
d_vector))));
torque_vector_scale =
linspace(0,round(abs(max(concat_torque_vector))),1+round(abs(max(concat_tor
que_vector))));

for i = 1:length(concat_speed_vector)
    x = round(abs(concat_torque_vector(i)));
    y = round(abs(concat_speed_vector(i)));
    torque_distribution_matrix(x+1,y+1) = 1 +
torque_distribution_matrix(x+1,y+1);
end

torque_distribution_matrix(1,1)=0;

% figure(2)
%
contourf(speed_vector_scale,torque_vector_scale,torque_distribution_matrix,
10)
% colormap jet

figure(3)

set(gcf,'color','white')
scatter(concat_longitude_vector,concat_latitued_vector,1,'filled','MarkerEd
geColor','b','MarkerFaceColor','b')
plot_google_map
title('Rotas Percorridas','FontSize',18 )
xlabel('Latitude [°]')
ylabel('Longitude [°]')

```

## GERADOR MAPA DE EFICIENCIA

```

clc;
clear;
close all;

%\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\ Virtual Dyno V1 //////////////////////////////////////
%
%                               Pedro Paganini De Mio

% inputs

motor_model = '6355 TB';
Kv = 190; %[rpm/V]
current = 2 * 60; %[A]
Kt = 9.55 / Kv; % [N*m/A]
pole_pairs = 7;
phase_resistance = 0.0177; %[ ohms]

erpm_meassured = [ 12146 42830 ]; % [erpm]
rpm_meassured = erpm_meassured / pole_pairs; % [rpm]
current_meassured = [ 0.19 0.48 ]; % [A]

voltage = 84; % [V]
peak_rpm = voltage * Kv; % [rpm]

```



```

peak_torque = current * Kt; % [N*m]
peak_dutycycle = 0.95; % [%]

Km = Kt/sqrt(1.5*phase_resistance);

rpm_vector = linspace( 0 , peak_rpm , peak_rpm / 10 ); % [rpm]
torque_vector = linspace( 0 , peak_torque , peak_torque * 100)'; % [N*m]
core_loses_cte = polyfit( rpm_measured , Kt * current_measured , 1 ); %
[N*m/rpm N*m]

core_loss_torque_vector = (core_loses_cte(2) + core_loses_cte(1) *
rpm_vector); % [N*m]
core_loss_power_vector = core_loss_torque_vector .* rpm_vector * 2 * pi /
60;

core_loss_power_matrix = zeros(length(torque_vector),length(rpm_vector));

for i = 1:length(torque_vector)
    core_loss_power_matrix(i,:) = core_loss_power_vector;
end

total_torque_matrix = zeros(length(torque_vector),length(rpm_vector));

for i = 1:length(torque_vector)
    for k = 1:length(rpm_vector)
        total_torque_matrix(i,k) = torque_vector(i) +
core_loss_torque_vector(k);
    end
end

motor_current_matrix = total_torque_matrix ./ Kt;

output_power_matrix = torque_vector * rpm_vector * 2 * pi / 60;

copper_loss_power_matrix = zeros(length(torque_vector),length(rpm_vector));

for i = 1:length(torque_vector)
    for k = 1:length(rpm_vector)
        copper_loss_power_matrix(i,k) = 1.5 * phase_resistance *
(motor_current_matrix(i,k))^2;
    end
end

total_loss_power_matrix = core_loss_power_matrix +
copper_loss_power_matrix;

total_power_matrix = total_loss_power_matrix + output_power_matrix;

motor_efficiency_matrix = 100 * output_power_matrix ./ total_power_matrix;

required_voltage_matrix = zeros(length(torque_vector),length(rpm_vector));

for i = 1:length(torque_vector)
    for k = 1:length(rpm_vector)
        required_voltage_matrix(i,k) = (rpm_vector(k) / Kv +
phase_resistance * motor_current_matrix(i,k))/peak_dutycycle;
    end
end

```



```

drawnow
labels2 = h3.TextPrims;
for k = 1 : numel(labels2)
    LabelValue = str2num(labels2(k).String);
    h3.TextPrims(k).String = [num2str(LabelValue) ' [A]'];
    labels2(k).Font.Size = 14;
end
%caxis([0 100])

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(2)
set(gcf, 'color', 'white')
%set(gcf, 'Position', get(0, 'Screensize'));
[C3,h3] = contourf(rpm_vector,torque_vector,total_loss_power_matrix);
colormap jet
clabel(C3,h3)
h3.LevelList=round(h3.LevelList,0);
clabel(C3,h3, 'LabelSpacing', 300)
c = colorbar;
c.Label.String = 'Losses [W]';
set(c, 'FontSize', 14);

ax = gca;
xticks(0:1000:max(rpm_vector(:)));
ax.FontSize = 12;
yticks(0:0.5:max(torque_vector(:)));
ay.FontSize = 12;

title(['Total Losses - ' motor_model], 'FontSize', 18)
xlabel('Speed [rpm]', 'FontSize', 14)
ylabel('Torque [N m]', 'FontSize', 14)
hold on

voltages = [ 22 , 37 , 44 , 52 , 60 , 67 , 74 ];
[C4,h4] =
contour(rpm_vector,torque_vector,required_voltage_matrix,voltages, '-');
h4.LevelList=round(h4.LevelList,0);
clabel(C4,h4, 'LabelSpacing', 1000, 'FontSize', 26, 'Color', 'w')
h4.LineWidth = 1.5;
h4.LineColor = 'w';
drawnow
labels4 = h4.TextPrims;
for k = 1 : numel(labels4)
    LabelValue = str2num(labels4(k).String);
    h4.TextPrims(k).String = [num2str(LabelValue) ' [v]'];
    labels4(k).Font.Size = 14;
end

hold on

currents = current * [ 0.25 , 0.5 , 0.75 , 1 ];
[C5,h5] = contour(rpm_vector,torque_vector,motor_current_matrix,currents, '-');
h5.LevelList=round(h5.LevelList,0);
clabel(C3,h5, 'LabelSpacing', 300, 'FontSize', 26, 'Color', 'w')
h5.LineWidth = 1.5;
h5.LineColor = 'w';
drawnow
labels5 = h5.TextPrims;

```

```

for k = 1 : numel(labels5)
    LabelValue = str2num(labels5(k).String);
    h5.TextPrims(k).String = [num2str(LabelValue) ' [A]'];
    labels5(k).Font.Size = 14;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(3)
set(gcf, 'color', 'white')
%set(gcf, 'Position', get(0, 'Screensize'));
[C,h] = contourf(rpm_vector,torque_vector,copper_loss_power_matrix);
colormap jet
clabel(C,h)
h.LevelList=round(h.LevelList,0);
clabel(C,h, 'LabelSpacing',300)
c = colorbar;
c.Label.String = 'Copper Losses [W]';
set(c, 'FontSize',14);

ax = gca;
xticks(0:1000:max(rpm_vector(:)));
ax.FontSize = 12;
yticks(0:0.5:max(torque_vector(:)));
ay.FontSize = 12;

title(['Copper Losses - ' motor_model], 'FontSize',18)
xlabel('Speed [rpm]', 'FontSize',14)
ylabel('Torque [N m]', 'FontSize',14)
hold on

voltages = [ 22 , 37 , 44 , 52 , 60 , 67 , 74 ];
[C2,h2] =
contour(rpm_vector,torque_vector,required_voltage_matrix,voltages, '-');
h2.LevelList=round(h2.LevelList,0);
clabel(C2,h2, 'LabelSpacing',1000, 'FontSize',26, 'Color', 'w')
h2.LineWidth = 1.5;
h2.LineColor = 'w';
drawnow
labels = h2.TextPrims;
for k = 1 : numel(labels)
    LabelValue = str2num(labels(k).String);
    h2.TextPrims(k).String = [num2str(LabelValue) ' [v]'];
    labels(k).Font.Size = 14;
end

hold on

currents = current * [ 0.25 , 0.5 , 0.75 , 1 ];
[C3,h3] = contour(rpm_vector,torque_vector,motor_current_matrix,currents, '-');
h3.LevelList=round(h3.LevelList,0);
clabel(C3,h3, 'LabelSpacing',300, 'FontSize',26, 'Color', 'w')
h3.LineWidth = 1.5;
h3.LineColor = 'w';
drawnow
labels2 = h3.TextPrims;
for k = 1 : numel(labels2)
    LabelValue = str2num(labels2(k).String);

```

```

        h3.TextPrims(k).String = [num2str(LabelValue) ' [A]'];
        labels2(k).Font.Size = 14;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

figure(4)
set(gcf, 'color', 'white')
%set(gcf, 'Position', get(0, 'Screensize'));
[C,h] = contourf(rpm_vector,torque_vector,core_loss_power_matrix);
colormap jet
clabel(C,h)
h.LevelList=round(h.LevelList,0);
clabel(C,h, 'LabelSpacing',300)
c = colorbar;
c.Label.String = 'Core Losses [W]';
set(c, 'FontSize',14);

ax = gca;
xticks(0:1000:max(rpm_vector(:)));
ax.FontSize = 12;
yticks(0:0.5:max(torque_vector(:)));
ay.FontSize = 12;

title(['Core Losses - ' motor_model], 'FontSize',18)
xlabel('Speed [rpm]', 'FontSize',14)
ylabel('Torque [N m]', 'FontSize',14)
hold on

voltages = [ 22 , 37 , 44 , 52 , 60 , 67 , 74 ];
[C2,h2] =
contour(rpm_vector,torque_vector,required_voltage_matrix,voltages, '-');
h2.LevelList=round(h2.LevelList,0);
clabel(C2,h2, 'LabelSpacing',1000, 'FontSize',26, 'Color', 'w')
h2.LineWidth = 1.5;
h2.LineColor = 'w';
drawnow
labels = h2.TextPrims;
for k = 1 : numel(labels)
    LabelValue = str2num(labels(k).String);
    h2.TextPrims(k).String = [num2str(LabelValue) ' [v]'];
    labels(k).Font.Size = 14;
end

hold on

currents = current * [ 0.25 , 0.5 , 0.75 , 1 ];
[C3,h3] = contour(rpm_vector,torque_vector,motor_current_matrix,currents, '-');
h3.LevelList=round(h3.LevelList,0);
clabel(C3,h3, 'LabelSpacing',300, 'FontSize',26, 'Color', 'w')
h3.LineWidth = 1.5;
h3.LineColor = 'w';
drawnow
labels3 = h3.TextPrims;
for k = 1 : numel(labels3)
    LabelValue = str2num(labels3(k).String);
    h3.TextPrims(k).String = [num2str(LabelValue) ' [A]'];
    labels3(k).Font.Size = 14;
end

```





```

    labels2(k).Font.Size = 14;
end

```

## SIMULADOR DE ROTA

```

clc;
clear;
close all;

coreloss_1 = 3.32532298677864e-06; %[Nm/rpm]
coreloss_2 = 0.00378008957179809; %[Nm/]

load logs_current_6355.mat
load logs_speed_6355.mat
load logs_torque_6355.mat
load logs_rpm_6355.mat

total_distance_2 = 377724.99;
distance_interval = total_distance_2/length(concat_current_vector);
distance_vector =
linspace(0,total_distance_2,length(concat_current_vector));
distance_vector = distance_vector/1000

ts = 0.439; %[s]

original_gear_ratio = 5.714;
original_wheel_diameter = 0.02; %[m]
original_number_of_motors = 2;
original_pole_pairs = 7;
original_motor_phase_resistance = 0.0177; %[ohms]
belt_efficiency = 0.95;

total_distance = 378; %[km]

original_motor_rpm = concat_rpm_vector/original_pole_pairs;
original_wheel_rpm = original_motor_rpm/original_gear_ratio;

original_motor_mechanical_power = concat_torque_vector .*
original_motor_rpm * 2 * pi / (60 * original_gear_ratio);

original_motors_core_torque_losses =
original_number_of_motors*(original_motor_rpm*coreloss_1 + coreloss_2);
original_motors_core_power_losses = original_motors_core_torque_losses .*
original_motor_rpm * 2 * pi / 60;

original_motors_wheel_torque = concat_torque_vector -
original_motors_core_torque_losses;
original_motors_wheel_power = original_motors_wheel_torque .*
original_motor_rpm * 2 * pi / (60 * original_gear_ratio);
original_motor_copper_losses = original_number_of_motors * 1.5 *
original_motor_phase_resistance * (concat_current_vector ./
original_number_of_motors).^2;
original_motors_input_power = original_motor_mechanical_power +
original_motor_copper_losses;

original_motors_energy_use = sum( original_motors_input_power .* ts) /
3600;

```

```

original_motors_energy_wheel = sum( original_motors_wheel_power .* ts) /
3600;
original_motors_energy_core = sum( original_motors_core_power_losses .* ts)
/ 3600;
original_motors_energy_copper = sum( original_motor_copper_losses .* ts) /
3600;

original_motor_efficiency = 100 * original_motors_energy_wheel /
original_motors_energy_use;
original_motor_core_percentage = 100 * original_motors_energy_core /
original_motors_energy_use;
original_motor_copper_percentage = 100 - original_motor_core_percentage -
original_motor_efficiency;

original_motors_consumption = original_motors_energy_use / total_distance;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

new_motor_core_loss_rpm_points = [ 100 250 500 700 900 ];
new_motor_core_loss_power_points = [0.966439    2.97027 7.24426 11.382
16.1103];

newmotor_phase_resistance = 0.046; %[mOhms]
new_number_of_motors = 2;
new_motor_Kv = 29.5;
new_motor_Kt = 9.55 / new_motor_Kv;

newmotor_core_loss_torque_points = (new_motor_core_loss_power_points ./
new_motor_core_loss_rpm_points) .* 9.5488;

core_losses_cte = polyfit( new_motor_core_loss_rpm_points ,
newmotor_core_loss_torque_points , 1 ); %[N*m/rpm N*m]

new_motors_core_losses_torque = new_number_of_motors * ( original_wheel_rpm
* core_losses_cte(1) + core_losses_cte(2));
new_motors_core_power_losses = new_motors_core_losses_torque .*
original_wheel_rpm * 2 * pi / 60;

new_motors_total_torque = new_motors_core_losses_torque + belt_efficiency *
original_motors_wheel_torque;
new_motors_wheel_power = new_motors_total_torque .* original_wheel_rpm * 2
* pi / 60;
new_motors_required_current = new_motors_total_torque / new_motor_Kt;

new_motors_copper_losses = new_number_of_motors * 1.5 *
newmotor_phase_resistance * (new_motors_required_current ./
new_number_of_motors).^2;

new_motors_input_power = new_motors_wheel_power + new_motors_copper_losses;

new_motors_energy_use = sum( new_motors_input_power .* ts) / 3600;
new_motors_energy_wheel = sum( new_motors_wheel_power .* ts) / 3600;

```

```

new_motors_energy_core = sum( new_motors_core_power_losses .* ts) / 3600;
new_motors_energy_copper = sum( new_motors_copper_losses .* ts) / 3600;

new_motors_consumption = new_motors_energy_use / total_distance;

new_motor_efficiency = 100 * new_motors_energy_wheel /
new_motors_energy_use;
new_motor_core_percentage = 100 * new_motors_energy_core /
new_motors_energy_use;
new_motor_copper_percentage = 100 - new_motor_core_percentage -
new_motor_efficiency;

fprintf('The original powertrain, over 378 km ridden, had a consumption
of %.2f [Wh/km] and a global efficiency
of %.2f%%,\n',original_motors_consumption, original_motor_efficiency)
fprintf('the losses were split between %.2f%% of core losses and %.2f%% of
copper
losses.\n',original_motor_core_percentage,original_motor_copper_percentage)
fprintf('For the pair of direct drive motors version 80-28-E_6, the
consumption would be %.2f [Wh/km] and a global efficiency
of %.2f%%,\n',new_motors_consumption,new_motor_efficiency)
fprintf('the losses would be split between %.2f%% of core losses and %.2f%%
of copper losses.\n',new_motor_core_percentage,new_motor_copper_percentage)

set(groot, 'defaultFigureWindowState', 'maximized');

figure(1)
set(gcf, 'color', 'white')

subplot(2,1,1)
plot(distance_vector,original_motor_copper_losses)
xlim([0 378])
title('Perdas Resistivas', 'FontSize',18)
xlabel('Distância [km]', 'FontSize',14)
ylabel('Perdas Resistivas [W]', 'FontSize',14)

subplot(2,1,2)
plot(distance_vector,original_motors_core_power_losses)
xlim([0 378])
title('Perdas No Estator', 'FontSize',18)
xlabel('Distância [km]', 'FontSize',14)
ylabel('Perdas No Ferro [W]', 'FontSize',14)

figure(2)
set(gcf, 'color', 'white')

subplot(3,1,1)
plot(distance_vector,original_wheel_rpm)
xlim([0 378])
title('Requerimento de Rotação', 'FontSize',18)
xlabel('Distância [km]', 'FontSize',14)
ylabel('Rotação [rpm]', 'FontSize',14)

subplot(3,1,2)

```

```

plot(distance_vector,original_motors_wheel_torque)
xlim([0 378])
title('Requerimentos de Torque','FontSize',18)
xlabel('Distância [km]','FontSize',14)
ylabel('Torque [N.m]','FontSize',14)

```

```

subplot(3,1,3)
plot(distance_vector,original_motors_wheel_power)
xlim([0 378])
title('Requerimentos de Potência','FontSize',18)
xlabel('Distância [km]','FontSize',14)
ylabel('Potência [W]','FontSize',14)

```

figure(3)

```

set(gcf,'color','white')
subplot(2,1,1)
plot(distance_vector,concat_current_vector)
xlim([0 378])
title('Valores de Corrente','FontSize',18)
xlabel('Distância [km]','FontSize',14)
ylabel('Corrente [A]','FontSize',14)
subplot(2,1,2)
plot(distance_vector,concat_rpm_vector)
xlim([0 378])
title('Valores de rotação','FontSize',18)
xlabel('Distância [km]','FontSize',14)
ylabel('Rotação Elétrica [erpm]','FontSize',14)
subplot(2,1,2)

```

figure(4)

```

set(gcf,'color','white')
subplot(2,1,1)
plot(distance_vector,concat_speed_vector)
xlim([0 378])
title('Valores de velocidade','FontSize',18)
xlabel('Distância [km]','FontSize',14)
ylabel('Velocidade [km/h]','FontSize',14)
subplot(2,1,2)
plot(distance_vector,concat_torque_vector)
xlim([0 378])
title('Valores de torque','FontSize',18)
xlabel('Distância [km]','FontSize',14)
ylabel('Torque [N.m]','FontSize',14)

```