

Renan Schwinden

MOTORES ELÉTRICOS PARA BICICLETAS – UM ESTUDO

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica
Orientador: Prof. Dr. Nelson Sadowski
Coorientador: Dr. Tiago Staudt

Florianópolis
2018

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

Schwinden, Renan

Motores elétricos para bicicletas - um estudo /
Renan Schwinden ; orientador, Nelson Sadowski,
coorientador, Tiago Staudt, 2018.

81 p.

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

Inclui referências.

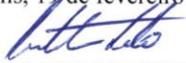
1. Engenharia Elétrica. 2. Análise de soluções
presentes no mercado. 3. Revisão da literatura. 4.
Benchmarking. 5. Projeto de motor. I. Sadowski,
Nelson. II. Staudt, Tiago. III. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia
Elétrica. IV. Título.

Renan Schwinden

MOTORES ELÉTRICOS PARA BICICLETAS – UM ESTUDO

Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em sua forma final, pela Banca Examinadora

Florianópolis, 19 de fevereiro de 2018.



Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Coordenador do Curso

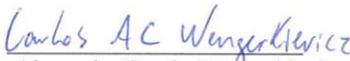
Banca Examinadora:



Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Benjamin J. Mailhé
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Carlos Alexandre Corrêa Wengerkiewicz, M.Sc.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha família e aos meus melhores amigos, que me acompanham.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao povo brasileiro e à minha família, que pagam meus estudos em uma universidade pública. Agradeço também à Embraco pelo suporte dado a este interessante estudo e, em especial, ao Tiago, por ser paciente e responder às dúvidas que tive, e agradeço ao meu orientador, Prof. Nelson Sadowski. Também agradeço a outros integrantes do R&D da Embraco, o Felipe e o Borys, que auxiliaram nesse projeto. Agradeço também ao prof. Renato, ao Carlos e ao Benjamin pelo grande auxílio na documentação do trabalho.

RESUMO

Nesse trabalho, motores de bicicletas elétricas são estudados. O trabalho é dividido em três partes: na parte 1, é feita uma revisão das soluções para *e-bike* disponíveis no mercado. Primeiro, são introduzidos os motores de cubo, que vão na roda, e os *mid-drives*, cujo motor vai junto ao pedal, e as diferenças entre os dois tipos. Em seguida, são explicadas as diferenças entre motores de cubo com e sem redutor de velocidade e são mostradas a desmontagem e as curvas de potência. Na parte 2, é feita uma revisão da literatura. É realizada revisão de seis artigos relevantes sobre projeto de motor de bicicleta elétrica. Na parte 3, baseado nos estudos, um motor de cubo com redução foi adquirido, testado, desmontado, estudado e simulado no software comercial SPEED. Em seguida, é feita a calibração da simulação sob resultados experimentais a fim de se garantir um bom modelo de simulação. Depois, um motor de ímãs permanentes de ferrite é desenvolvido. Por último, conclusões são apresentadas.

Palavras-chave: Motor de cubo, *e-bike*, bicicleta elétrica, rotor externo, tração elétrica, veículo elétrico, alto número de polos, motor de fluxo transversal, alto torque, eficiência

ABSTRACT

In this work, motors for e-bike drives are studied. The report is divided in 3 parts: In part 1, a review of e-bike drive solutions available in the market is made. First, hub drives and mid-drives are introduced. Then, differences between geared hub drives and gearless hub drives and their disassembling are shown. Part 1 shows the main e-bike drives. In part 2, a review of the literature is presented. Six relevant articles about e-bike motor design are summarized and conclusions about them are made. In part 3, a geared hub motor was acquired, tested, dismantled, studied and simulated using the commercial SPEED software. The simulation results were calibrated according to experimental results to achieve a good simulation model. A ferrite permanent motor is developed, and conclusions are finally presented.

Keywords: Hub motor, e-bike, electric bicycle, external rotor, electric traction, electric vehicle, high number of poles, transverse flux motor, high torque, efficiency

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bicicleta com motor de eixo direto.....	22
Figura 2 - Motor de cubo com redução posicionado na roda frontal.	23
Figura 3 - Motores comerciais.....	24
Figura 4 - Motor de eixo 36 V 350 W.....	25
Figura 5 - Caixa rotativa, motor e engrenagens.....	25
Figura 6 - Engrenagem anelar e planetárias.....	26
Figura 7 - Motor com redução e motor sem redução, respectivamente.....	26
Figura 8 - Drive central da Bosch.....	27
Figura 9 - Sistema da Bafang 8 Fun.....	28
Figura 10 - Drive central com rotor interno, ímãs de superfície de neodímio e engrenagem com roda livre.....	29
Figura 11 - Caixa de redução de dois estágios.....	29
Figura 12 - Desmontagem do sistema Bosch.....	30
Figura 13 - Gerador de alternador automotivo.....	34
Figura 14 - Resultados de otimização: eficiência, torque, potência mecânica e número de polos.....	36
Figura 15 - Resultados de otimização: eficiência, torque, custo e densidade de corrente.....	36
Figura 16 - Motor de fluxo transversal.....	37
Figura 17 - Motor de fluxo transversal.....	38
Figura 18 - Seção transversal do motor de fluxo transversal.....	38
Figura 19 - Periodicidade mínima do motor, utilizada em simulações.....	38
Figura 20 - Eficiência versus torque: comparação entre as melhores máquinas a 250 rpm.....	40
Figura 21 - Comparação do custo da matéria-prima por máquina.	40
Figura 22 - Vista isométrica e frontal da máquina ID 321 proposta.	41
Figura 23 - Simulação trifásica 3D de elementos finitos da máquina ID 321.....	41
Figura 24 - Motor de referência na roda traseira de uma bicicleta.	42
Figura 25 - Temperaturas para o motor atualmente utilizado.....	45
Figura 26- Temperaturas para o novo IPMSM.....	45
Figura 27 - Temperatura do motor novo a 30Nm.....	46

Figura 28 - Motor de relutância projetado: 6 ranhuras, 10 polos.	48
Figura 29 - Fluxo magnético e corrente.....	49
Figura 30 - Tensão do Motor Testado.	50
Figura 31 - Corrente do Motor Testado.....	50
Figura 32 - Modelo do motor em FEMAG.....	52
Figura 33 - Um motor de fluxo axial.....	53
Figura 34 - Zonas de operação do motor.	55
Figura 35 - O motor de fluxo chaveado.....	57
Figura 36 - Linhas de fluxo do PMFSM.....	58
Figura 37 - Cogging do motor.	58
Figura 38 - Potência vs. corrente de armadura.	59
Figura 39 - Torque e potência versus velocidade.	59
Figura 40 - Excitação do motor de eixo.....	64
Figura 41 - Forma da onda de corrente na bateria a vazio.....	65
Figura 42 - Foto do teste de bEMF.....	66
Figura 43 - bEMF do motor.....	66
Figura 44 - Motor com redutor e suas cotas.	70
Figura 45 – Vista frontal do motor.	70
Figura 46 - Estator interno.....	71
Figura 47 – Estator.	71
Figura 48 - Rotor externo.	72
Figura 49 – Concha rotor com engrenagens planetas da redução planetária.	72
Figura 50 - Esquema de bobinagem do motor.	73
Figura 51 - Estator e sensores hall.....	74
Figura 52 - Motor simulado em SPEED.....	74
Figura 53 - bEMF simulada comparada com a medida.	75
Figura 54 – Curva torque vs. velocidade por simulação.....	76
Figura 55 - Eficiência vs. Torque a 738 rpm.	76
Figura 56 - Torque versus velocidade - motor de ferrite.	78
Figura 57 - Comparação de eficiência.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados nominais de produtos da CNEBikes.....	21
Tabela 2 - Dados sobre as topologias estudadas.....	32
Tabela 3 - Características do motor de fluxo transversal.....	35
Tabela 4 - Características do motor síncrono a ímãs permanentes inseridos.	43
Tabela 5- Dados do motor utilizado atualmente.....	44
Tabela 6 - Dados do motor proposto	44
Tabela 7 - Características do motor com relutância comutada ...	48
Tabela 8 - Dados do Motor IPMSM.....	51
Tabela 9 - Eficiência das unidades propostas.	52
Tabela 10 - Dados do motor de fluxo axial	54
Tabela 11 - Dados do motor de fluxo chaveado	56
Tabela 12 - Informações de construção do motor de fluxo chaveado	57
Tabela 13 - Comparação de performance.....	59
Tabela 14 - Dados do teste de excitação.....	64
Tabela 15 - Dados do teste.	67
Tabela 16 - Motor 350 W da CNEBikes.	67
Tabela 17 - Especificação de motor da CNEBikes.....	67
Tabela 18 – Ponto de operação em regime permanente	68
Tabela 19 - Dimensões do motor estudado.....	69

LISTA ABREVIACÕES

bEMF – Back Electromotive Force
BLAC – Brushless AC
BLDC – Brushless DC
DCIPM – Internal Permanent Magnet
PMTFM – Permanent Magnet Transverse Flux Machine
IPMSM – Internal Permanent Magnet Synchronous Motor
PM – Permanent Magnet
PMBLDC – Permanent Magnet Brushless DC
PMFSM – Permanent Magnet Flux Switching Machine
SPMSM – Surface Permanent Magnet Synchronous Machine
SRM – Switched Reluctance Machine
SMC – Soft Magnetic Composites

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Motivação.....	19
1.2	Metodologia	19
1.3	Objetivos	19
1.3.1	Objetivos gerais	19
1.3.2	Objetivos específicos	19
1.4	Descrição dos capítulos.....	20
2	REVISÃO DE SOLUÇÕES DISPONÍVEIS NO MERCADO	21
2.1	Motores de cubo.....	21
2.1.1	Introdução aos motores de cubo	21
2.1.2	Requisitos de projeto	21
2.1.3	Motores de cubo de eixo direto	22
2.1.4	Motores com redução de velocidade	22
2.1.5	Desmontagem de um motor de cubo	24
2.2	Motor central.....	27
2.2.1	Desmontagem de um sistema central	28
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
3.1	Introdução	31
3.2	Artigos mais relevantes pesquisados.....	33
3.2.1	Design e otimização de uma máquina de fluxo transversal de ímã permanentes	33
3.2.2	Um novo motor síncrono de ímãs permanentes para uma cadeia de vendas de e-bikes	43
3.2.3	Motor de relutância comutado 6-10 com rotor externo para bicicleta elétrica	47
3.2.4	Análise de uma máquina síncrona permanente de ímã permanente de seis e três fases com concentração de fluxo para uma bicicleta elétrica	51

3.2.5	Projeto orientado por cenário de condução de um motor síncrono de ímãs permanentes de fluxo axial para uma bicicleta elétrica	53
3.2.6	Projeto e análise de desempenho de motor de fluxo chaveado para aplicação de bicicleta elétrica	56
3.2.7	Conclusões dos artigos apresentados.....	61
4	ESTUDO DE MOTOR DE CUBO COMO BENCHMARKING	63
4.1	Testes do motor.....	63
4.1.1	Teste sem carga	63
4.1.2	Teste de back EMF	65
4.2	Especificações do motor	67
4.3	Desmonte do motor com dimensões mecânicas.....	69
4.4	Esquema de bobinagem.....	72
4.5	Calibração do software SPEED	74
4.6	Curvas de torque e potência do motor.....	75
4.7	Design de um motor com ímãs de ferrite para a mesma tensão.	77
5	CONCLUSÕES	79
	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Veículos elétricos são uma promessa para meios de transporte menos poluentes e, em países com matriz energética elétrica predominantemente renovável como o Brasil, a utilização de veículos elétricos se torna mais relevante. Bicycletas elétricas são uma maneira de instigar pessoas a mudarem seu hábito de uso diário de carros convencionais a gasolina pelo uso de um veículo menos poluente. Além disso, a eletrificação de bicycletas faz com que a adesão ao uso de bicycletas seja maior, e bicycletas geram muito menos trânsito e consomem menos espaço do que carros, ou seja, há também um benefício social de se trocar carros por bicycletas. Além disso, se um motor elétrico sem ímãs permanentes comercialmente competitivo for desenvolvido e produzido no Brasil, trata-se de uma grande oportunidade de mercado uma vez que *kits* elétricos para bicycletas são produzidos na China e chegam caros no Brasil. Portanto, trata-se de um grande mercado consumidor que é uma demanda reprimida pelos altos preços dos *kits* elétricos. Por isso, pretende-se entender os requisitos de projeto destes motores.

1.2 Metodologia

Busca no mercado e na bibliografia dos principais tipos de motores elétricos para bicycletas. Busca de informações de torque, velocidade, potência, eficiência, topologia, densidade de corrente elétrica, número de polos e custo. Desmontagem e estudo de um motor comercial e proposta de um novo modelo sem ímãs de terras raras.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos gerais

Estudar os atuais motores elétricos para bicycletas elétricas e obter suas características.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudar motores comerciais de bicycleta e compreender seus requisitos como: torque, velocidade, topologia, dimensões mecânicas (ex: comprimento e espessura do dente).
- Revisar motores para bicycleta propostos na literatura.
- Estudar um motor comercial. Entender sua bobinagem, número de polos, de ranhuras e suas dimensões mecânicas.
- Extrair curvas de potência de um motor comercial

- Projetar um motor de bicicleta que não utilize ímãs de terras raras.

1.4 Descrição dos capítulos

No **Capítulo 1**, são explicados a motivação da realização, a metodologia e os objetivos deste trabalho.

No **Capítulo 2**, são explicadas as tecnologias de motores no cubo (hub drives) e os motores de centro (*mid-drives*), que vão no centro da bicicleta.

Em seguida, no **Capítulo 3**, uma revisão da literatura é feita. Para a elaboração desse capítulo, foram examinados 44 artigos de motores elétricos de bicicletas, *scooters*, carros, cadeira de rodas, e de aplicações fotovoltaicas, como bombas para oxigenação da água para piscicultura. Entre os artigos examinados, 6 mais relevantes foram escolhidos e resumidos nesse trabalho.

Depois, no **Capítulo 4**, um motor elétrico de cubo para bicicleta foi adquirido para *benchmarking*. Esse motor foi estudado, desmontado para medição, e simulado no software SPEED, de simulação de motores. Ao final, foi projetado um motor do mesmo tamanho do motor estudado, mas que utiliza ferrite como ímã. Os resultados são comparados com os dados coletados durante o *benchmarking*.

No **Capítulo 5**, são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE SOLUÇÕES DISPONÍVEIS NO MERCADO

2.1 Motores de cubo

2.1.1 Introdução aos motores de cubo

Os motores de cubo são motores instalados na roda, onde o rotor externo está conectado aos raios da roda. Este sistema pode ser instalado na frente ou na parte traseira de uma bicicleta normal.

Esses motores são de corrente contínua sem escovas, conhecidos como motores “*brushless DC*” (BLDC), com rotor externo, muitos polos (20 ou mais) e utilizam ímãs de neodímio. A maior quantidade de polos é necessária para as baixas velocidades, torque alto e baixa ondulação de torque (*cogging*) que são exigidos.

Esses motores são alimentados por bateria de 36 V ou 48 V e sua potência vai de 250 W a 1000 W, sendo potências mais baixas para o dia-a-dia, na estrada, nas aplicações da cidade. Potências superiores são designadas para áreas montanhosas e aplicações *off-road*. Potências superiores de 1000 W geralmente são usados em *e-scooters*.

O motor de cubo (motor de eixo) é dividido em duas classes de motores: eixo direto (sem engrenagens) e com redução (com engrenagens).

2.1.2 Requisitos de projeto

De acordo com o site da CNEBikes, um fornecedor chinês, os *drives* com engrenagens são principalmente usados para baixa potência: 250 W-350 W. *Drives* de eixo direto, por sua vez, são usados de 250 W a 1000 W, toda a faixa de potência.

A eficiência global máxima dos motores do cubo é mantida em torno de 80 %. Mas toda a curva de potência, desde baixas até altas velocidades, é importante para veículos elétricos, uma vez que os motores de tração funcionam a velocidade variável.

A Tabela 1 mostra os dados nominais de alguns motores de cubo.

Tabela 1 - Dados nominais de produtos da CNEBikes.

Potência (W)	350	500	1000
Torque (N.m)	15	32	45
RPM	200	240	300

Na Europa, as *e-bikes* têm a velocidade máxima de 25Km/h. Como 200 rpm em roda de tamanho médio resulta nesta velocidade, muitos modelos giram a 200 rpm.

2.1.3 Motores de cubo de eixo direto

Drives diretos são motores mecanicamente simples. Eles são compostos apenas por um estator interno e um rotor externo conectado à roda. Eles têm um bom torque de alta velocidade e quase não necessitam de manutenção. As suas desvantagens são que eles resultam em autonomia um pouco menor, são maiores e mais pesados quando comparados aos motores de cubo com engrenagens.

Transmissões diretas também oferecem a possibilidade de frenagem regenerativa, bom para áreas montanhosas, mas isso significa que eles não têm roda livre, ou seja, eles oferecem resistência quando não estão ajudando o pedal. A Figura 1 mostra uma bicicleta com motor de cubo eixo direto.

Figura 1 - Bicicleta com motor de eixo direto.



Fonte: **Pete's Electric Bikes – Electric Bikes, Cars, Trucks and Accessories**. Disponível em: <<https://petesebikes.com/>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

2.1.4 Motores com redução de velocidade

Drives com redução de velocidade usam engrenagens planetárias dentro da unidade. Com isso, um motor pequeno e de alta velocidade pode ser usado. A relação de tais engrenagens planetárias é de cerca de 5: 1.

Motores com redução são mais eficientes a baixas velocidades, têm um bom torque de baixa velocidade, possuem autonomia levemente maior, são pequenos e pesam a metade em relação a um motor de eixo

direto. Sua principal desvantagem é o desgaste das engrenagens planetárias de nylon e, no Brasil e em outros países, é difícil encontrar manutenção para a caixa de redução.

Graças à presença de roda livre, os motores com redução mostram muito menos resistência ao movimento quando não estão tracionando, mas isso também elimina a possibilidade de frenagem regenerativa. A Figura 2 mostra uma bicicleta equipada com um motor com redutor de velocidade.

Motores comerciais são mostrados na Figura 3.

Figura 2 - Motor de cubo com redução posicionado na roda frontal.



Fonte: “velo électrique vintage” in Zap...d’arts! le zapping d’images et d’idées....;-) | Scoop.it. Disponível em: <<https://www.scoop.it/t/zap-d-arts/?&tag=velo+électrique+vintage>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

Figura 3 - Motores comerciais



Fontes: **china mid drive electric bike,electric bike supplier, fat ebike manufacturer,electric bike manufactory-CNEBIKES**. Disponível em: <http://www.cnebikes.com/product_category/E-bike-motor.html>. Acesso em: 14 fev. 2018.

2.1.5 Desmontagem de um motor de cubo

A seguir, a partir da Figura 4 até a Figura 6, mostra-se a desmontagem de um motor de eixo com redução de velocidade de 36 V, 350 W. Possui rotor externo com ímãs de neodímio, 20 polos, 3 fases, e engrenagem de redução planetária de relação de cerca de 5: 1.

Na Figura 4, é mostrado o estator de 18 bobinas, e rotor de 20 polos dentro da carcaça do motor. A engrenagem planetária está no outro lado do motor, dentro da caixa.

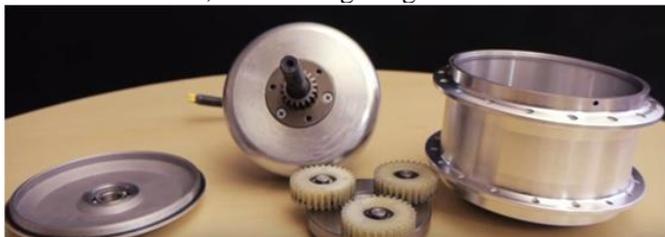
Figura 4 - Motor de eixo 36 V 350 W.



Fonte: **The inside of an e-bike hub motor, with planetary gears.** - **YouTube.** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=pH-52IgJui8>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

Na Figura 5, é mostrado o outro lado do motor, onde fica a engrenagem planetária. No rotor externo é fixada a engrenagem "sol" (central) da redução planetária que está conectada às engrenagens planetárias de nylon. Por sua vez, as engrenagens planetas ligam a engrenagem central à engrenagem anelar situada dentro da caixa rotativa externa, conforme mostrado na Figura 6.

Figura 5 - Caixa rotativa, motor e engrenagens.



Fonte: **The inside of an e-bike hub motor, with planetary gears.** - **YouTube.** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=pH-52IgJui8>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

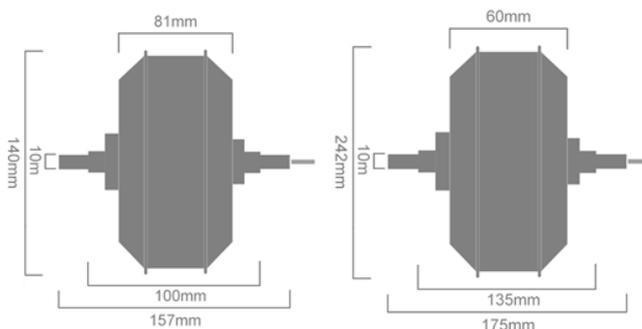
Figura 6 - Engrenagem anelar e planetárias.



Fonte: **The inside of an e-bike hub motor, with planetary gears.** - **YouTube.** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=pH-52IgJui8>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

Abaixo, são mostradas as dimensões do invólucro externo de um motor de cubo com engrenagens (à esquerda) e de um modelo sem engrenagens (à direita) vendidos pela CNEBikes. Estes estão disponíveis também no site da CNEBikes. O modelo sem engrenagens é mais fino, mas seu diâmetro é quase o dobro do modelo com engrenagens.

Figura 7 - Motor com redução e motor sem redução, respectivamente.



Fonte: **250W/350W rear geared motor.** Disponível em: <<http://www.cnebikes.com/product/250W-Rear-geared-hub-motor.html>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

2.2 Motor central

Os sistemas centrais são colocados no meio da bicicleta e estão conectados à coroa. Eles consistem em um rotor interno conectado a uma engrenagem de duas etapas de uma relação de 20: 1 a 30: 1. Este sistema possui uma eficiência maior que a dos motores de cubo porque eles usam também a relação variável das marchas da bicicleta, o que significa que, ao invés de consumir grandes correntes enquanto se sobe uma colina como um motor de cubo de relação fixa, a mudança de marcha ajuda o motor a continuar a funcionar em pontos de operação mais eficientes. Motores centrais também oferecem um melhor equilíbrio de peso da bicicleta quando comparados a motores de cubo, questão importante para aplicações *off-road*.

Esses sistemas também são mais complexos e cerca de três vezes mais caros do que a solução na roda e, no caso do Bosch e a japonesa Shimano, é necessário um quadro especial. A chinesa Bafang 8Fun produz *drives* centrais que podem ser instalados em uma bicicleta comum.

Na Figura 8, mostra-se o sistema central da Bosch. O quadro desta *e-bike* é especialmente concebido para este sistema central; portanto, é uma solução bastante dispendiosa. Também é apresentado o sistema mais simples que pode ser adaptado em qualquer bicicleta normal (Figura 9).

Figura 8 - Drive central da Bosch.



Fonte: **Trek and others add more Bosch mid-drive models | ELECTRICBIKE.COM.** Disponível em: <<http://www.electricbike.com/trek-bosch/>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

Figura 9 - Sistema da Bafang 8 Fun.



Fonte: **Bafang BBS02, 750W mid-drive electric bike motor Kit REVIEW | ELECTRICBIKE.COM.** Disponível em: <<https://www.electricbike.com/bafang-bbso2-750w-mid-drive/>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

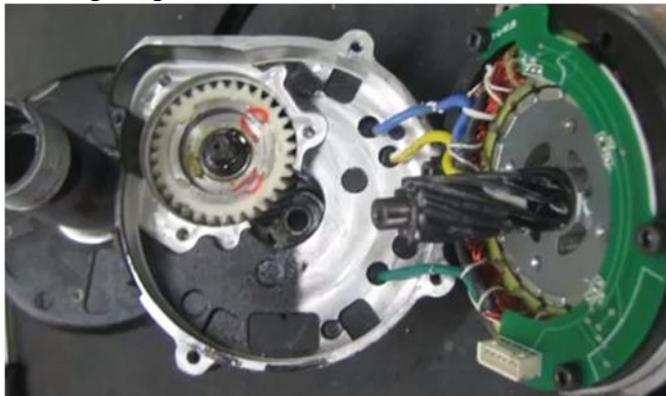
2.2.1 Desmontagem de um sistema central

Nesta seção, são apresentadas imagens da desmontagem de dois sistemas centrais.

A desmontagem de um *kit* central Bafang 8Fun é mostrada na Figura 10 e na Figura 11. É constituído por um motor BLDC de rotor interno com ímãs de superfície, conectado a uma engrenagem de nylon que possui um dispositivo mecânico de roda livre, o que significa que não oferece resistência enquanto desligado, mas também não possui frenagem regenerativa.

As engrenagens de nylon e metal produzem uma redução de velocidade de duas etapas de uma relação entre 20: 1 e 30: 1.

Figura 10 - Drive central com rotor interno, ímãs de superfície de neodímio e engrenagem com roda livre.



Fonte: **DIY Tutorial Repairing BAFANG 8fun BBS02 750w 48v (Part 1 of 7) *intro/bottom-bracket/external gears - YouTube**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=2eKV-yetjhg>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

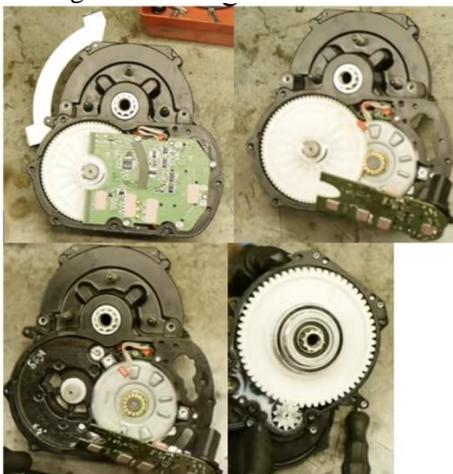
Figura 11 - Caixa de redução de dois estágios.



Fonte: **DIY Tutorial Repairing BAFANG 8fun BBS02 750w 48v (Part 1 of 7) *intro/bottom-bracket/external gears - YouTube**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=2eKV-yetjhg>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

Figura 12 mostra a desmontagem de um sistema central Bosch, com engrenagem de dois estágios e eletrônica de potência dentro da unidade.

Figura 12 - Desmontagem do sistema Bosch.



Fonte: **Bosch E-Bike inside - Bosch Pedelec Motor wird zerlegt - YouTube**. Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=Q_tFgwRdUfw>. Acesso em: 14 fev. 2018.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução

Para este trabalho, topologias motoras retiradas de artigos científicos foram estudadas. Os papéis referem-se a motores para *e-bikes*, mas também foram estudados motores para *e-scooters*, carros elétricos, cadeiras de rodas elétricas e para aplicações fotovoltaicas.

Topologias pesquisadas para *E-bike*:

PMTFM (*Claw Pole*)

- Máquina de fluxo transversal com ímãs permanentes
Rotor Externo

IPMSM

- Motor síncrono com ímãs inseridos
Rotor Externo
Dissipação de calor através do eixo

SRM

- Motor de relutância chaveado
Rotor Externo

IPMSM

- Motor síncrono com ímãs inseridos
Rotor Externo

SPMSM

- Máquina síncrona com ímãs de superfície
Fluxo axial, podendo ser com rotor externo ou interno

PMFSM

- Máquina de fluxo chaveado com ímãs permanentes
Rotor interno

A Tabela 2 mostra dados motores de artigos mais relevantes encontrados em artigos acadêmicos.

Tabela 2 - Dados sobre as topologias estudadas.

Nome	Design e otimização de uma máquina de fluxo transversal de ímã permanentes	Um novo motor síncrono de ímãs permanentes para uma cadeia de vendas de <i>e-bikes</i>	Motor de relutância comutado com rotor externo para bicicleta elétrica	Análise de uma máquina síncrona permanente de ímã permanente de seis e três fases com concentração de fluxo para uma bicicleta elétrica	Projeto orientado por cenário de condução de um motor síncrono de ímãs permanente de fluxo axial para uma bicicleta elétrica	Projeto e análise de desempenho de motor de fluxo chaveado para aplicação de bicicleta elétrica
Tipo	PMTFM	IPMSM	SRM	BLDC (IPMSM)	(SPMSM) Fluxo axial	PMFSM
Aplicação	<i>E-Bike hub drive</i>	<i>E-Bike hub drive</i>	<i>E-bike hub drive</i>	<i>E-bike mid-drive</i>	<i>E-bike hub drive</i>	<i>E-bike mid-drive</i>
Rotor	Externo	Externo	Externo	Externo	Axial (ambos)	Interno
Tensão (V)	24		48		36	94
Potência (W)	523	300	500	1200 (pico)	400	600
RPM	250	250	500 (600 pico)	240 - 400 (máx.)	200	6182
Torque Op (Nm)(Motor)	20	30	7		21	
Torque Max (Nm)(Motor)			9,5	45	40	1,04
Eficiência (%)	87 (total)	>80 (86 max)	77	~87 (83 medido)	81 (max) 161,5 rpm 400 W	
Diâmetro externo		125	220		89,8	70
Redução	sem	sem	03:01	sem	sem	
Considerações	Otimizado com Algoritmo Genético e simulação por				Design orientado por cenário	

	elementos finitos (FE).					
Fases	3		3	03 ou 06	3	1
Polos (estator:rotor)			06:10	34	46	08:12
Ranhuras				36	48	
Peso (Kg)		5,1			3,35	0,921
Comprimento (mm)			25	65		203
Corrente de entrada (A)	23,4				14,69	
Corrente de entrada máx. (A)			35 (pico)		30	
Grupo	Höganäs	Lucerne University of Applied Sciences		Lucerne University	National Taiwan University	UTHM
País	Suécia	Suíça	Canadá	Suíça	Taiwan	Malásia

3.2 Artigos mais relevantes pesquisados

Os artigos 3.2.1 (POMPERMAIER; SJOBERG; NORD, 2012) e 3.2.2 (HAERRI; LINDEGGER; NEUMAIER, 2015) são mais relevantes porque foram desenvolvidos para a indústria e usam tecnologias inovadoras. O artigo 3.2.5 (YANG; DING, 2015) também é interessante, uma vez que leva em consideração a dinâmica de condução. Os motores foram desenvolvidos para baixa e média potência de *e-bike*: de 300 W a 600 W de potência média.

3.2.1 Design e otimização de uma máquina de fluxo transversal de ímã permanentes

Este artigo, “*Design and optimization of a Permanent Magnet Transverse Flux Machine.*”(POMPERMAIER; SJOBERG; NORD, 2012), é sobre o projeto mais a otimização de um motor de fluxo

transversal (PMTFM) de rotor externo (motor do cubo). O motor de fluxo transversal é uma topologia que promete alta densidade de potência quando comparada com o motor BLDC com ímãs de superfície. Essa topologia utiliza polos em forma de garras no estator ou no rotor, gerando um fluxo magnético em 3D. Atualmente, um equipamento que utiliza vastamente essa tecnologia é o alternador automotivo, que utiliza polos em forma de garras no rotor como mostrado na Figura 13. No motor desenvolvido nesse artigo, as garras se localizam no estator.

Figura 13 - Gerador de alternador automotivo



Fonte: **EnDuraLast II - 400 Watt Charging System for BMW Airhead and Moto Guzzi**. Disponível em:

<<https://www.euromotoelectrics.com/EnDuraLast-II-400-Watt-Charging-System-p/edl400-altkit105-2y.htm>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

Foi usada simulação numérica 3D e um algoritmo genético multi-objetivo (GA) chamado NSGA-II. Foram simuladas cerca de 1300 máquinas em 65 horas em um computador convencional. Este tipo de algoritmo funciona através de cruzamento e mutação de parâmetros, seguido de seleção de máquinas, imitando a natureza.

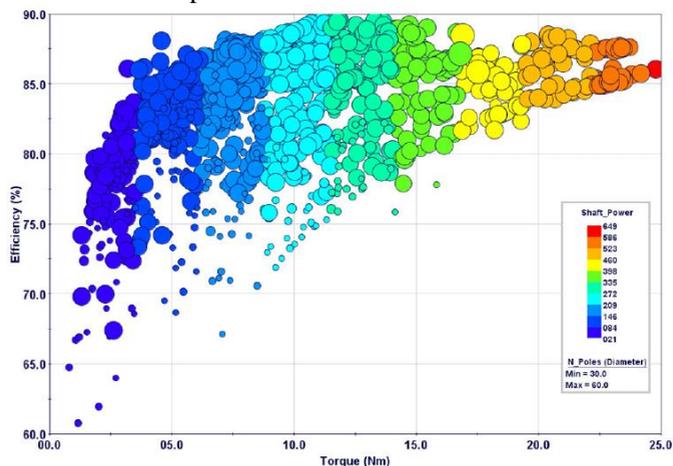
É importante dizer que a velocidade, neste artigo, é sempre fixada em 250 rpm. A Tabela 3 mostra características desse motor.

Tabela 3 - Características do motor de fluxo transversal.

Tipo	PMTFM	Redução	Não
Aplicação	<i>E-Bikes</i>	Considerações	Otimizado com algoritmo genético e elementos finitos
Rotor	Externo	Fases	3
Tensão (V)	24	Peso (Kg)	2,871
Potência (W)	523	Densidade de torque (N.m/Kg)	6,9
RPM	250	Corrente (A)	23,4
N.m	20	Grupo	Höganäs
Eficiência (%)	87 (motor+inversor)	País	Suécia

A Figura 14 mostra “um gráfico conhecido como "4D" porque permite, em um único gráfico 2D, mostrar quatro variáveis diferentes: a eficiência (eixo vertical), o torque (eixo horizontal) a potência do eixo (representado nas cores) e o número de polos (diâmetro das circunferências).” (POMPERMAIER; SJOBERG; NORD, 2012)

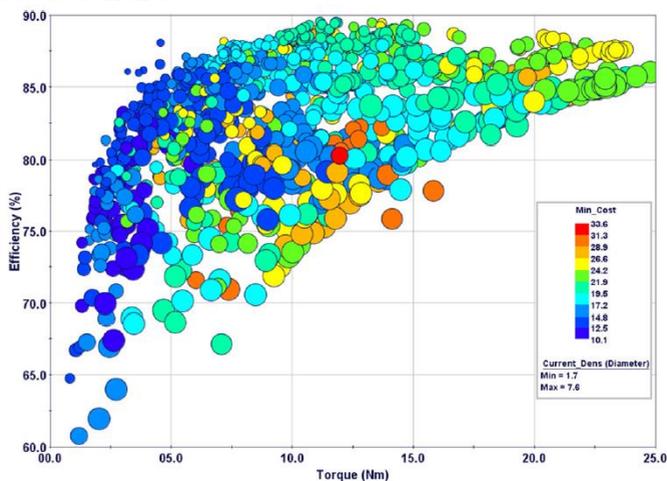
Figura 14 - Resultados de otimização: eficiência, torque, potência mecânica e número de polos.



Fonte: (POMPERMAIER; SJOBERG; NORD, 2012)

A Figura 15 mostra um gráfico com Eficiência (%), Torque (N.m), Custo e densidade de corrente. Na parte superior dos gráficos, fica a fronteira de Pareto, onde se situam os mores otimizados.

Figura 15 - Resultados de otimização: eficiência, torque, custo e densidade de corrente.

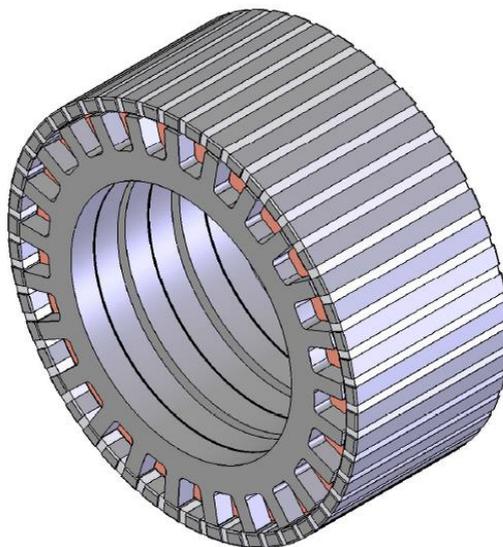


Fonte: (POMPERMAIER; SJOBERG; NORD, 2012)

As peças deste motor são feitas de compósitos magnéticos moles (SMC), em vez de aço laminado; isso torna o motor mais fácil de construir. A máquina desenvolvida, comparada com uma máquina real que já estava em uso, é 4,1 % mais eficiente, 4,1 % mais leve, tem densidade de torque 4,5 % maior, mas é 15 % mais caro porque usa mais material magnético.

Figura 16 e Figura 17 mostram partes do motor.

Figura 16 - Motor de fluxo transversal.



Fonte: (POMPERMAIER; SJOBERG; NORD, 2012)

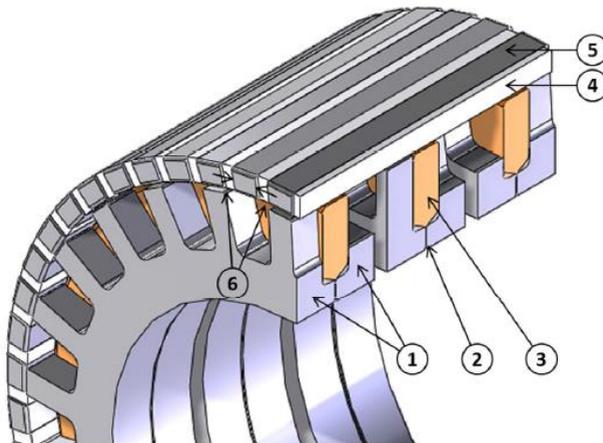
Figura 17 - Motor de fluxo transversal.



Fonte: (POMPERMAIER; SJOBERG; NORD, 2012)

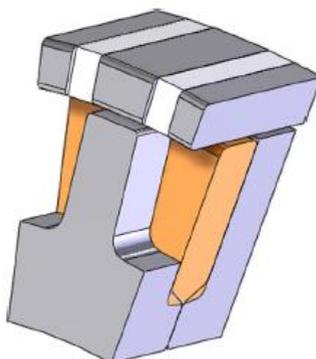
A Figura 18 mostra uma seção do motor de fluxo transversal. Figura 19 mostra a mínima periodicidade utilizada para simular o motor. Na Figura 18, o número 1 representa o núcleo do estator, 2 é um pequeno entreferro, 3 é uma das bobinas, 4 o núcleo do rotor, 5 são os ímãs e 6 mostra a direção do fluxo magnético dos ímãs.

Figura 18 - Seção transversal do motor de fluxo transversal.



Fonte: (POMPERMAIER; SJOBERG; NORD, 2012)

Figura 19 – Periodicidade mínima do motor, utilizada em simulações.

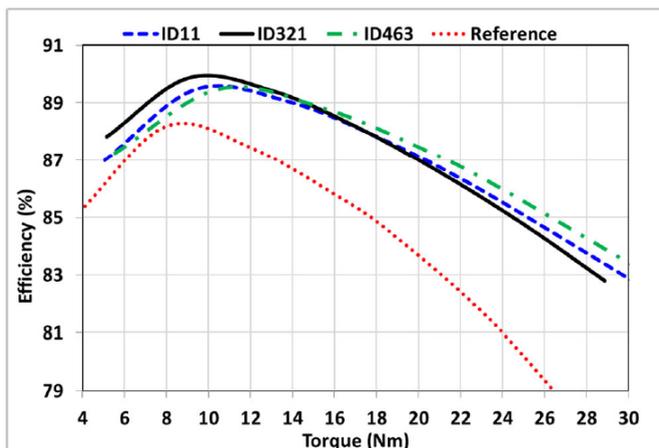


Fonte: (POMPERMAIER; SJOBERG; NORD, 2012)

Entre todas as máquinas testadas, as três melhores foram escolhidas e comparadas com uma máquina de referência real. Essas máquinas foram chamadas ID11, ID321 e ID463.

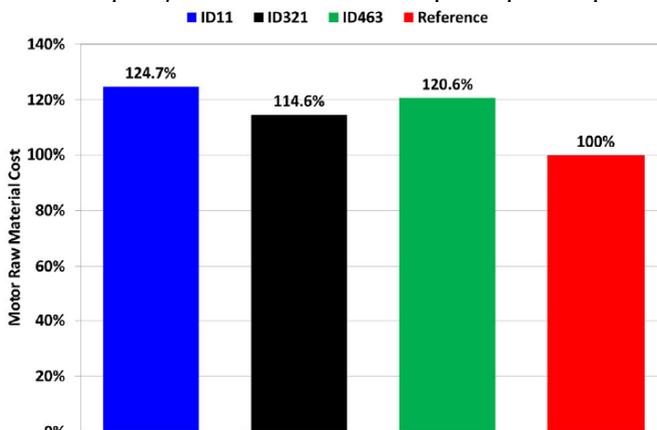
O gráfico de eficiência versus torque das melhores máquinas é mostrado na Figura 20 e a comparação do custo da matéria-prima está na Figura 21. Essas máquinas são comparadas com um motor utilizado anteriormente, tido como referência. A máquina chamada de ID321 foi escolhida como a melhor devido ao menor custo de matéria-prima.

Figura 20 - Eficiência versus torque: comparação entre as melhores máquinas a 250 rpm.



Fonte: (POMPERMAIER; SJOBERG; NORD, 2012)

Figura 21 - Comparação do custo da matéria-prima por máquina.

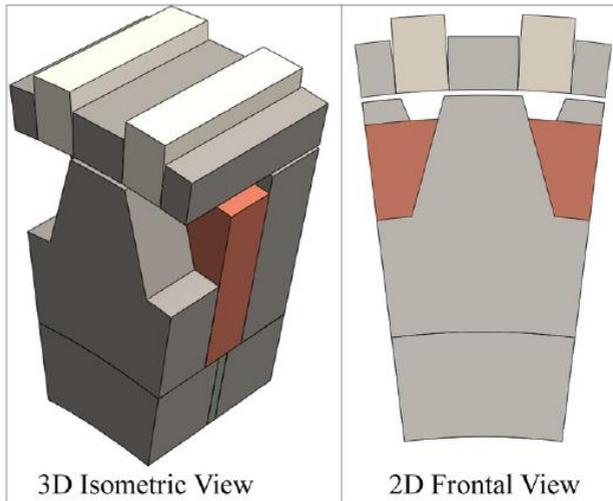


Fonte: (POMPERMAIER; SJOBERG; NORD, 2012)

Essas máquinas foram analisadas em simulação de elementos finitos com três fases para ter certeza de que os resultados de simulação em uma fase procedem. A visão isométrica e frontal da máquina ID 321 e a Simulação FEA 3D são mostradas, respectivamente, na Figura 22 e na

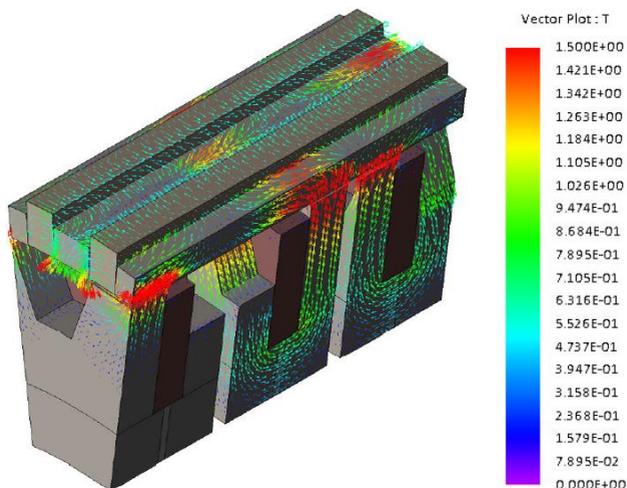
Figura 23. A Figura 24 mostra o motor de referência na roda traseira de uma bicicleta.

Figura 22 - Vista isométrica e frontal da máquina ID 321 proposta.



Fonte: (POMPERMAIER; SJOBERG; NORD, 2012)

Figura 23 - Simulação trifásica 3D de elementos finitos da máquina ID 321.



Fonte: (POMPERMAIER; SJOBERG; NORD, 2012)

Figura 24 - Motor de referência na roda traseira de uma bicicleta.



Fonte: (POMPERMAIER; SJOBERG; NORD, 2012)

Conclusões:

O tempo para obter resultados usando algoritmos genéticos é razoável e pode ser usado em computadores convencionais pois, de acordo com POMPERMAIER, SJOBERG e NORD (2012, tradução nossa)

Para se obter cerca de 1300 máquinas diferentes, foi necessário menos de três dias de um computador trabalhando sem supervisão. Esse tempo é negligenciável, já que a solução final está quase pronta para se tornar um protótipo.

O procedimento proposto no documento afirma que é possível otimizar o motor de forma automatizada e ainda ter resultados confiáveis, mesmo quando apenas a mínima periodicidade de um modelo monofásico é simulada.

3.2.2 Um novo motor síncrono de ímãs permanentes para uma cadeia de vendas de *e-bikes*

Este artigo, “*A novel interior synchronous motor for a high end ebike drive chain*” (HAERRI; LINDEGGER; NEUMAIER, 2015), apresenta melhorias de um motor síncrono de ímã permanente inserido (IPMSM) que utiliza rotor externo, desenvolvido para uma cadeia de *e-bikes*. Esse motor é comparado com um motor de tração atualmente usado.

O motor trabalha com transmissão direta, sem caixa de redução, e torque nominal de 30 N.m por 21 min. O motor de referência consegue atingir o mesmo torque por 10,5 minutos, devido ao aumento de temperatura.

O motor desenvolvido tem dissipação de calor do interior para a estrutura do quadro da bicicleta, o que significa grandes aletas de refrigeração. Consequentemente, o problema do superaquecimento do motor, tradicionalmente resolvido pela redução de torque, foi resolvido. A Tabela 4 traz detalhes sobre este motor.

Tabela 4 - Características do motor síncrono a ímãs permanentes inseridos.

Tipo	IPMSM	Redução	Sem redução
Potência (W)	300	Peso (kg)	5,1
		Diâmetro externo do rotor	125
RPM	250		
Rotor	Externo		Feito para cadeia de <i>e-bike</i>
Eficiência (%)	>80 (86 máx.)	Considerações	Suíça
		País	Lucerne University of Applied Sciences and Arts
Torque (N.m)	30	Grupo	

O artigo fornece as tabelas de eficiência de uma máquina já em produção e do novo IPMSM na Tabela 5 e na Tabela 6 respectivamente. A Tabela 5 e a Tabela 6 mostram dados de temperatura para os dois equipamentos, respectivamente.

Tabela 5- Dados do motor utilizado atualmente

EFFICIENCY PLOT IN MOTOR MODE FOR THE CURRENT MOTOR

Efficiency area	50 rpm	100 rpm	150 rpm	200 rpm	250 rpm	300 rpm	350 rpm	400 rpm	450 rpm	500 rpm
η tot	6 km/h	12 km/h	18 km/h	25 km/h	31 km/h	37 km/h	43 km/h	49 km/h	55 km/h	62 km/h
5 Nm	0.62	0.72	0.75	0.78	0.77	0.77	0.78	0.75		
10 Nm	0.58	0.70	0.76	0.78	0.80	0.82	0.82			
15 Nm	0.51	0.65	0.73	0.76	0.79	0.81	0.82			
20 Nm	0.47	0.62	0.70	0.75	0.78	0.81	0.82			
25 Nm	0.41	0.57	0.65	0.71	0.74	0.77				
30 Nm	0.36	0.51	0.61	0.67	0.71	0.76				
35 Nm	0.32	0.48	0.57	0.64						
40 Nm	0.30	0.44	0.54							
45 Nm										
50 Nm										

Fonte: (HAERRI; LINDEGGER; NEUMAIER, 2015)

Tabela 6 - Dados do motor proposto

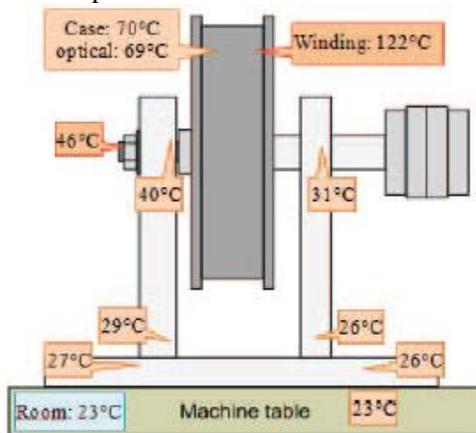
EFFICIENCY PLOT IN MOTOR MODE FOR THE NEW IPMSM

Efficiency area	50 rpm	100 rpm	150 rpm	200 rpm	250 rpm	300 rpm	350 rpm	400 rpm	450 rpm	500 rpm
η tot	6 km/h	12 km/h	18 km/h	25 km/h	31 km/h	37 km/h	43 km/h	49 km/h	55 km/h	62 km/h
5 Nm	0.67	0.75	0.78	0.79	0.80	0.80	0.80	0.80		
10 Nm	0.65	0.75	0.80	0.82	0.83	0.85	0.85	0.83		
15 Nm	0.58	0.71	0.77	0.81	0.82	0.84	0.84	0.83		
20 Nm	0.51	0.66	0.73	0.78	0.80	0.82	0.84			
25 Nm	0.46	0.61	0.69	0.74	0.78	0.80	0.80			
30 Nm	0.41	0.56	0.65	0.71	0.74	0.78				
35 Nm	0.37	0.52	0.61	0.68	0.72	0.75				
40 Nm	0.32	0.49	0.58	0.64	0.69					
45 Nm	0.27	0.43	0.53	0.61						
50 Nm										

Fonte: (HAERRI; LINDEGGER; NEUMAIER, 2015)

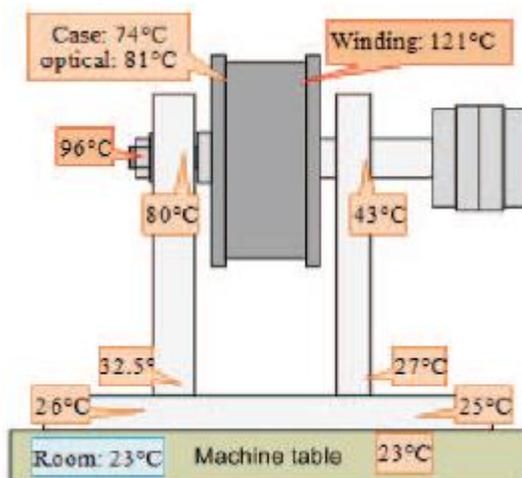
Conforme mostrado na Figura 25 e na Figura 26, o motor transfere calor para o quadro, usando o quadro como um dissipador de calor.

Figura 25 - Temperaturas para o motor atualmente utilizado.



Fonte: (HAERRI; LINDEGGER; NEUMAIER, 2015)

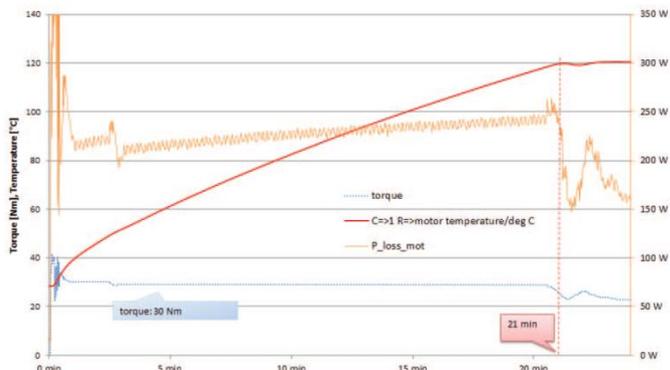
Figura 26- Temperaturas para o novo IPMSM.



Fonte: (HAERRI; LINDEGGER; NEUMAIER, 2015)

De acordo com esse artigo, a melhor dissipação de calor possibilita ao motor trabalhar com torque nominal de 30Nm durante 21 minutos, em vez de 10,5 minutos como antes. Isso é mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Temperatura do motor novo a 30Nm.



Fonte: (HAERRI; LINDEGGER; NEUMAIER, 2015)

A produção do novo motor é automatizada, o que faz o fator de enchimento das espiras aumentar até 50 %. Neste caso, o número de enrolamentos situa-se entre 10 e 20 enrolamentos por bobina e a seção transversal é de apenas 1,5 a 2 mm².

Conclusões do artigo:

De acordo com HAERRI, LINDEGGER e NEUMAIER (2015, tradução nossa)

Um novo IPMSM com um diâmetro de apenas 125 mm foi desenvolvido com otimização térmica e de eficiência. Graças à oportunidade de variar o número de polos e um melhor uso do espaço de enrolamento, a eficiência pode ser aprimorada em todos os pontos de operação considerados - modo motor e modo gerador. Do ponto de vista térmico, o interior do motor agora pode dissipar o calor muito melhor. Uma simulação de calor com uma limitação de potência a 250 rpm revelou que o eixo do motor novo pode atingir uma temperatura de até 96 ° C, enquanto o motor anterior atinge apenas 46 ° C. Graças a esta invenção, o torque nominal de 30Nm pode ser usado por cerca de 21 minutos, em vez de 10,5 minutos como antes. O ciclista não só se

beneficia de um torque alto por mais tempo, mas também da maior eficiência.

Além de todas as melhorias técnicas, o novo motor é visualmente muito melhor devido ao seu diâmetro reduzido. A enorme quantidade de vantagens, como a alta eficiência, o maior torque, a resistência térmica do motor, bem como a perfeita integração visual e as oportunidades de produção baratas promovem o objetivo de industrializar este motor o mais rápido possível.

3.2.3 Motor de relutância comutado 6-10 com rotor externo para bicicleta elétrica

Este artigo, chamado “*External-Rotor 6–10 Switched Reluctance Motor for an Electric Bicycle*” (LIN; SCHOFIELD; EMADI, 2015), apresenta uma máquina de relutância comutada com rotor externo. Motores de relutância aparecem constantemente em artigos sobre tração elétrica, desde carros elétricos a *e-bikes*. Trata-se de uma topologia simples e robusta, funciona baseado no torque de relutância, que depende da variação de relutância enxergada pela fase à medida que o rotor gira. Essa variação de relutância é causada pelos ou polos salientes, ou por barreiras de fluxo dentro do rotor. No caso do motor desse artigo, são utilizados polos salientes no rotor externo.

A estrutura simples, a alta potência e a densidade do torque e o potencial baixo custo tornam esta máquina uma forte candidata para a tração de *e-bike*. Um protótipo com caixa de redução foi desenvolvido e alcançou a eficiência máxima de 77 % a 500 rpm e 364 W. Com uma caixa de engrenagens de redução de 3: 1, a velocidade da bicicleta é restringida em 32 Km / h. A ondulação do torque não foi estudada neste artigo.

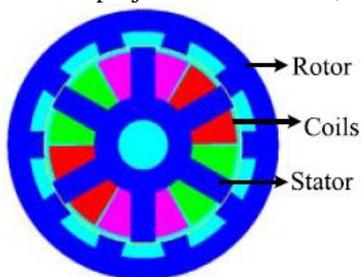
No artigo, o inversor do motor também foi discutido, enfocando o ângulo de ativação e sua importância para as máquinas SRM. A Figura 7 mostra algumas de suas características

Tabela 7 - Características do motor com relutância comutada

Tipo	SRM	Redução	03:01
Rotor	Externo	Fases	3
Tensão (V)	48	Polos (estator:rotor)	06:10
Potência (W)	364	Diâmetro externo do rotor (mm)	220
RPM	500 (600 pico)	Comprimento (mm)	25
Torque Op (N.m) (Motor)	7	Corrente Max (A)	35 (pico)
Torque Max (N.m) (Motor)	9,5	País	Canadá
Eficiência (%)	77.3 (máx.)		

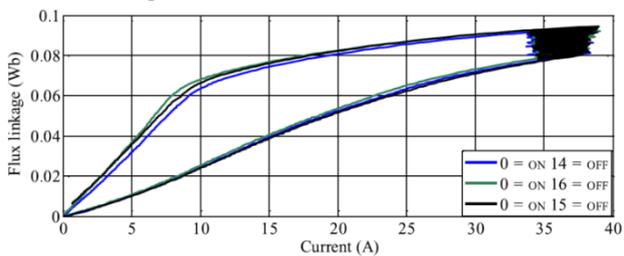
O motor projetado é mostrado na Figura 28. Foi testado com um ângulo de desligamento de 16° . Tem uma potência máxima de 364 W a 500 rpm, embora tenha sido projetado para oferecer 500 W. Figura 29 mostra características de fluxo magnético e corrente elétrica.

Figura 28 - Motor de relutância projetado: 6 ranhuras, 10 polos.



Fonte: (LIN; SCHOFIELD; EMADI, 2015)

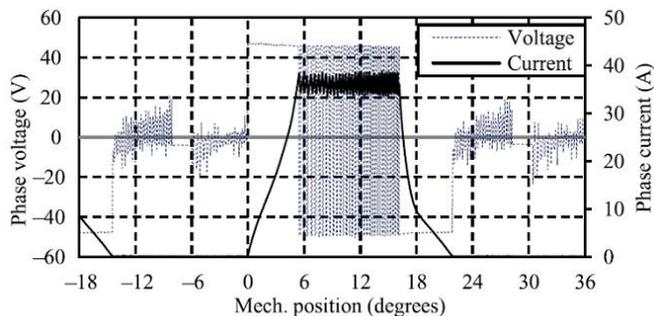
Figura 29 - Fluxo magnético e corrente.



Fonte: (LIN; SCHOFIELD; EMADI, 2015)

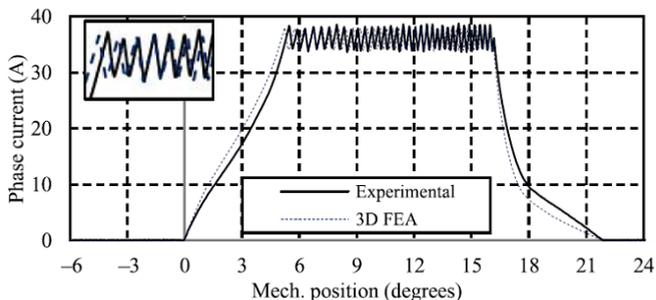
A tensão e a corrente do motor testado, a 364 W e 500 rpm, são mostradas na Figura 30 e na Figura 31, respectivamente.

Figura 30 - Tensão do Motor Testado.



Fonte: (LIN; SCHOFIELD; EMADI, 2015)

Figura 31 - Corrente do Motor Testado.



Fonte: (LIN; SCHOFIELD; EMADI, 2015)

Os resultados dos testes dinâmicos mostram que a potência mecânica de saída máxima a 500 rpm é de cerca de 364 W, com uma eficiência de 77 %. Ele atinge potência razoável, mas o motor possui um diâmetro grande, de 200 mm.

Conclusões:

As máquinas síncrona e de relutância aparecem constantemente em artigos relacionados a unidades de veículos elétricos.

O SRM é robusto, tem uma densidade de torque respeitável e pode ser auxiliado por PM.

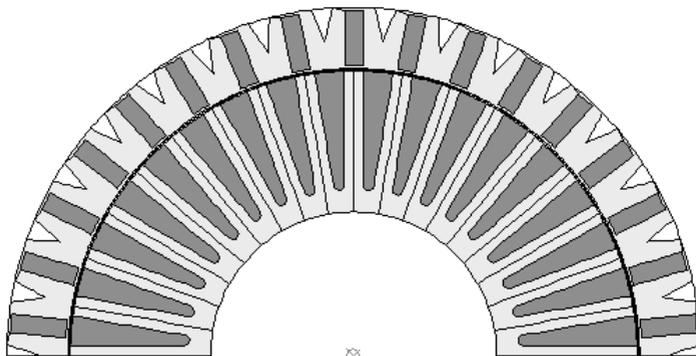
3.2.4 Análise de uma máquina síncrona permanente de ímã permanente de seis e três fases com concentração de fluxo para uma bicicleta elétrica

Este artigo, chamado “*Analysis of a six- and three-phase interior permanent magnet synchronous machine with flux concentration for an electrical bike.*” (CHRISTEN; HAERRI, 2014), apresenta uma comparação entre dois motores síncronos com bobinagens diferentes, um de 3 fases, e outro com 6 fases com rotor externo. Os motores também são simulados com correntes quadradas e sinusoidais. Os resultados da simulação mostraram que motor de 6 fases possui um desempenho de torque 2 % melhor e uma eficiência 0.4 % maior. A Tabela 8 mostra os dados do motor. A Figura 32 apresenta um modelo deste motor e a Tabela 9, a eficiência das unidades propostas.

Tabela 8 - Dados do Motor IPMSM

Tipo	BLDC (IPMSM)	Redução	Não
Aplicação	<i>Mid-drive</i>	Fases	3 e 6
Potência (W)	1200 (pico)	Polos	34
RPM	240 - 400 (máx.)	Slots	36
Torque Max (N.m)	45	Grupo	Lucerne University
Eficiência (%)	~87 (83 experimental)	País	Suíça
Rotor	Externo		

Figura 32 - Modelo do motor em FEMAG.



Fonte: (CHRISTEN; HAERRI, 2014)

Tabela 9 - Eficiência das unidades propostas.

Phase number	Wave form	Efficiency
6	BLDC	88.97%
6	Sinusoidal	87.86%
3	BLDC	88.67%
3	Sinusoidal	87.63%

Fonte: (CHRISTEN; HAERRI, 2014)

O artigo recomenda que "para o uso em uma *E-bike*, seja esperada a implementação de um sistema de controle BLDC (onda quadrada) de seis fases. Um sistema de controle BLDC reduz a complexidade do sistema, que deve ser o mais barato possível".

Conclusões:

Este é um artigo interessante, uma vez que sugere uma nova topologia: um motor BLDC 36 ranhuras - 34 polos com rotor externo e ímãs permanentes inseridos. Além disso, as simulações indicam alta eficiência utilizando um drive BLDC.

3.2.5 Projeto orientado por cenário de condução de um motor síncrono de ímãs permanentes de fluxo axial para uma bicicleta elétrica

Este artigo, chamado “*Driving-scenario oriented design of an axial- flux permanent-magnet synchronous motor for a pedal electric cycle.*” (YANG; DING, 2015), traz um design de motor de fluxo axial. Motores de fluxo axial são uma tecnologia interessante para tração elétrica, uma vez que possuem alta densidade de potência, muitas vezes possuem comprimento pequeno e são chamados de motor “panqueca”. No motor de fluxo axial, o fluxo magnético flui das bobinas para os ímãs paralelamente ao eixo, pois o rotor e o estator se encontram em planos paralelos. Figura 33 mostra um motor de fluxo axial com dois rotores.

Figura 33 - Um motor de fluxo axial



Fonte: **Axial Flux Motor - Impremedia.net**. Disponível em: <<https://impremedia.net/axial-flux-motor/>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

Nesse artigo, o motor projetado foi otimizado orientado por cenário de condução, ou seja, levam-se em conta três cenários que vão da partida até a velocidade máxima.

A Tabela 10 mostra os dados desta máquina.

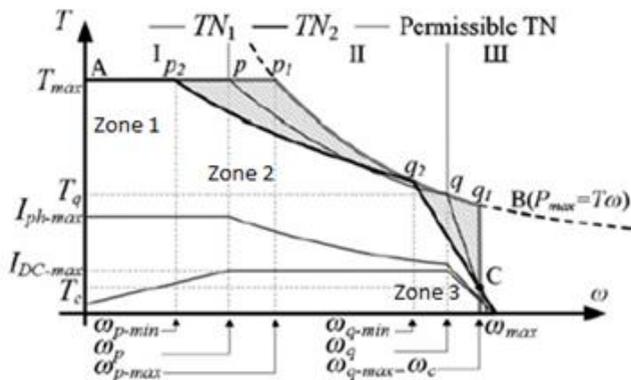
Tabela 10 - Dados do motor de fluxo axial

Tipo	SPMSM	Fases	3
Rotor	Fluxo axial	Polos (stator:rotor)	46
Slots	48	Peso (kg)	3,35
(V)	36	Rotor dia. Externo	89,8
(W)	400	Densidade de torque (N.m/Kg)	12
Op Torque (N.m)	21	Comprimento (mm)	40,6
Max Torque (N.m)	40	Densidade de potência (W/kg)	120
Eficiência (%)	81 (máx.), 161,5 rpm	Corrente (A)	14,69
Redução	Sem	Corrente de máxima (A)	30
RPM	200		

O motor foi projetado a partir dos cenários de condução mostrados na Figura 34. Neste artigo, um PMSM de 400 W, 36 V, 200 rpm é desenvolvido de acordo com três zonas de operação. O motor parte na zona 1, que é a zona de corrente máxima. Em seguida, entra-se na zona 2, que é a zona da potência máxima fornecida pelo inversor. Depois, chega-se à zona 3; zona de tensão máxima.

Segundo o autor do artigo, o motor pode ser projetado para funcionar em qualquer das curvas TN. A curva TN₂ apresenta resistência de fase maior e mais realizável e velocidade máxima do que TN₁. Assim, o motor foi projetado de acordo com TN₂.

Figura 34 - Zonas de operação do motor.



Fonte: (YANG; DING, 2015)

Conclusões:

O projeto de motor orientado por cenários pode ser usado para o desenvolvimento de motores de tração similares. Devido à resistência da bobina do motor, é mais plausível que o motor seja projetado de acordo com a curva TN_2 .

3.2.6 Projeto e análise de desempenho de motor de fluxo chaveado para aplicação de bicicleta elétrica

Neste artigo, chamado “*Design and performance of 8slot-12pole permanent magnet flux switching machines for electric bicycle application.*” (IWANI JUSOH et al., 2017), é apresentado um motor de fluxo chaveado de ímãs permanentes com 8 ranhuras e 12 polos que é monofásico, rápido, pequeno, leve e robusto. Não tem ímãs no rotor, possui apenas no estator, e atingiu a densidade de potência máxima de $0,133 \text{ W/mm}^3$ a uma corrente de 30 A-rms / mm^3 . Essa alta densidade de corrente é uma questão importante. O motor é compacto e, para um motor de *e-bike*, possui uma velocidade muito alta, de 6182 rpm. A Tabela 11 mostra os dados desta máquina.

Tabela 11 - Dados do motor de fluxo chaveado

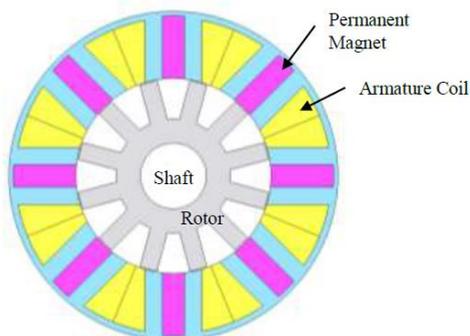
Tipo	PMFSM	Fases	1
Aplicação	<i>E-Bikes</i>	Peso (kg)	0,921
Rotor	Interno	Diâmetro externo (mm)	70
Tensão (V)	9,4	Comprimento (mm)	20,3
Potência (W)	600	Densidade de potência (W/mm^3)	0.113
RPM	6182	Grupo	UTHM
Motor Max Torque (N.m)	1,04	País	Malásia
Obs	Baixo torque, alta velocidade, pouco peso e tamanho. Densidade de corrente muito alta		

Foram fornecidas informações de construção desse motor. Isso é mostrado na Tabela 12. Figura 35 mostra um esquema desse motor.

Tabela 12 - Informações de construção do motor de fluxo chaveado

Parâmetro	8S-12P PMFSM
Número de polos do estator	8
Número de polos do rotor	12
Raio interno do estator (mm)	22,25
Raio externo do estator (mm)	37,5
Raio interno do rotor (mm)	7,5
Raio externo do rotor (mm)	22
Espessura do dente do rotor (mm)	4
Espessura do dente do estator (mm)	4
Comprimento do dente do estator (mm)	15,25
Comprimento do polo do rotor (mm)	9
Comprimento do motor (mm)	20,3
Entreferro (mm)	0,25
Peso de ímãs (g)	80

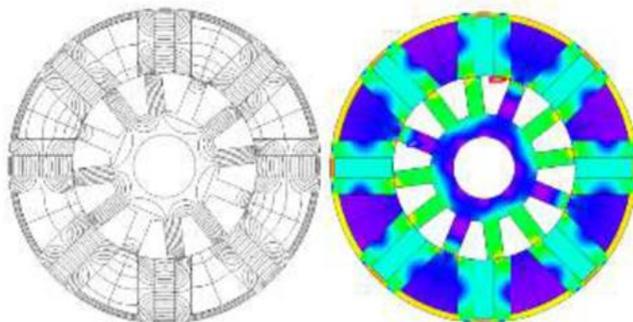
Figura 35 - O motor de fluxo chaveado.



Fonte: (IWANI JUSOH et al., 2017)

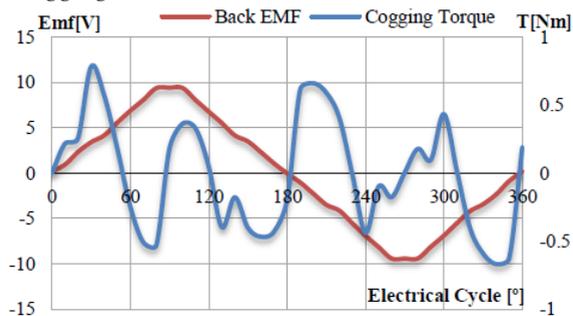
A seguir, na Figura 36 são mostradas as linhas de fluxo, e o *cogging* é apresentado na Figura 37. Na Figura 38, a alta densidade de corrente pode ser observada. A Figura 39 mostra as curvas de torque e potência vs. velocidade.

Figura 36 - Linhas de fluxo do PMFSM.



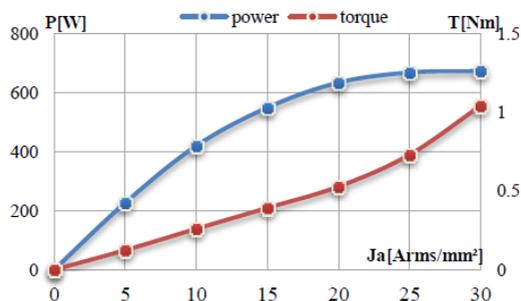
Fonte: (IWANI JUSOH et al., 2017)

Figura 37 - *Cogging* do motor.



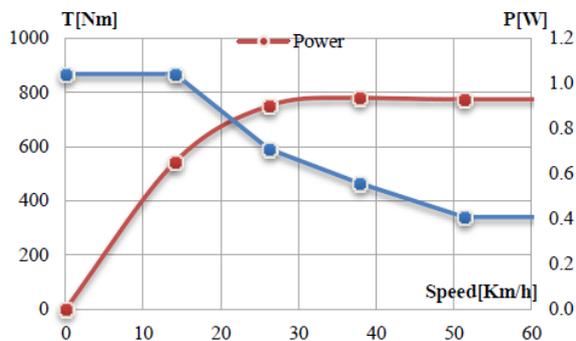
Fonte: (IWANI JUSOH et al., 2017)

Figura 38 - Potência vs. corrente de armadura.



Fonte: (IWANI JUSOH et al., 2017)

Figura 39 - Torque e potência versus velocidade.



Fonte: (IWANI JUSOH et al., 2017)

Tabela 13 - Comparação de performance.

Output Performance	Unit	IPMSM	SRM	PMFSM
Maximum Torque	Nm	1.6	7.05	1.04
Maximum speed	rpm	N/A	500	6812
Power Density	W/mm ³	0.009	N/A	0.113
Motor weight	Kg	6.804	6.7	921g

Fonte: (IWANI JUSOH et al., 2017)

Conclusões:

Admitindo a alta densidade de corrente, este motor teria uma alta densidade de potência e um baixo peso. Este é um design inicial, e ainda estão em curso trabalhos para melhorar o desempenho do torque.

Apesar de o motor precisar de 30 A/mm^2 para atingir 800 W , o que seria uma densidade de corrente alta demais, o motor atinge 200 W com 5 A/mm^2 . Isso é uma potência já útil ao ciclista e a densidade de corrente fica aceitável.

Este motor é pequeno e leve, mas tem baixo torque e funciona a 6182 rpm . Essa máquina poderia, na melhor das hipóteses, ser usada em uma unidade central, pois, como foi discutido na parte 1, os sistemas centrais têm redução de engrenagem de 20: 1 a 30: 1, enquanto os motores do cubo usam uma média de 5: 1.

3.2.7 Conclusões dos artigos apresentados

Analisando os artigos disponíveis, vê-se que existem topologias promissoras, como o motor de fluxo transversal, motores de relutância, motores com ímãs inseridos em um rotor externo e motores com dissipação de calor no garfo da bicicleta.

Pode-se dizer que, ao lado do ímã de superfície do rotor externo "tradicional" BLDC para unidades de *e-bike*, topologias inovadoras são interessantes. Por exemplo, a tecnologia de motor de fluxo transverso é atraente devido à sua alta densidade de torque / potência, e o rotor externo IPMSM é interessante pois usa ambos torques de alinhamento e de relutância.

As considerações sobre os artigos são:

- Artigo 3.2.1 (YANG; DING, 2015), motor de fluxo transversal, usou um método de algoritmo genético para otimização. Este artigo não tem apenas propósitos acadêmicos. O motor foi desenvolvido por uma empresa (Höganäs).

- O IPMSM do artigo 3.2.2 (HAERRI; LINDEGGER; NEUMAIER, 2015) apresentou uma proposta de dissipação de calor muito interessante, dissipando o calor no quadro. Este artigo foi desenvolvido para uma cadeia de *e-bike*.

- Os artigos 3.2.3 (LIN; SCHOFIELD; EMADI, 2015) e 3.2.4 (CHRISTEN; HAERRI, 2014) são sobre máquinas de relutância, tais máquinas geralmente aparecem em documentos relacionados a veículos elétricos.

- O artigo 3.2.5 (YANG; DING, 2015) apresenta um design orientado para o cenário de condução. O design orientado a cenários podem ser usados em qualquer outra topologia de motor.

- O artigo 3.2.6 (JUSOH et al., 2017) apresenta uma máquina de comutação de fluxo. Esta máquina é eficiente e pequena, mas precisaria de uma engrenagem de alta relação, apenas aplicável em unidades centrais ou em sistemas de fricção. Além disso, utiliza densidades de corrente altas demais.

Há, também, artigos que abordam questões sobre aplicações de baterias, que não foram incluídos neste trabalho. Por exemplo, há considerações sobre o uso de capacitores em paralelo com a bateria, o que aumenta sua vida útil, evitando correntes de pico. O objetivo deste estudo é focado no motor *e-bike*, e não em unidades mecanicamente complexas. Devido ao preço, disponibilidade e complexidade do projeto, foi decidido trabalhar com a solução do motor de cubo com redutor de velocidade.

Esse motor é mecanicamente mais simples do que os motores centrais e também são muito mais baratos no Brasil.

4 ESTUDO DE MOTOR DE CUBO COMO BENCHMARKING

Um kit de motor de cubo foi adquirido para *benchmarking*. Verificou-se que o motor é um motor BLAC trifásico, controlado por tensão, com rotor externo, engrenagens reductoras planetárias, potência de 350 W e tensão das baterias de 36 V. O motor foi testado, desmontado para estudo e simulado em SPEED, que é um software comercial desenvolvido para a Siemens Co.

A metodologia utilizada para o *benchmarking* é: primeiro, testes a vazio e de bEMF do motor são feitos. Em seguida, a definição de dois pontos de operação é feita, sendo um o ponto de operação de pico, e o outro, o ponto de operação de regime permanente. Depois disso, é realizada a desmontagem do motor e suas dimensões mecânicas são apresentadas. Então, a bobinagem do motor é estudada. Em seguida, é realizada a calibração do software de simulação SPEED, essa calibração é feita utilizando o ensaio de bEMF feito. Ao final do *benchmarking* do motor, curvas de potência obtidas a partir das simulações são apresentadas.

Por último, um motor com ímãs de ferrite com as mesmas dimensões mecânicas do motor estudado como *benchmarking* é projetado. Suas curvas de potência são comparadas com as do motor estudado.

4.1 Testes do motor

4.1.1 Teste sem carga

O motor estudado foi fixado em uma morsa e alimentado sem carga através de um banco de baterias de 36 V, um inversor e um acelerador que acompanham o kit do motor. Uma ponteira de tensão foi ligada medindo a tensão de linha e o motor foi acionado a vazio. A tensão de linha é mostrada em verde na Figura 40, e a corrente de linha é a curva roxa. Vê-se que a tensão de alimentação se aproxima uma senoide através de chaveamentos. A Tabela 14 mostra dados do motor.

Figura 40 - Excitação do motor de eixo.

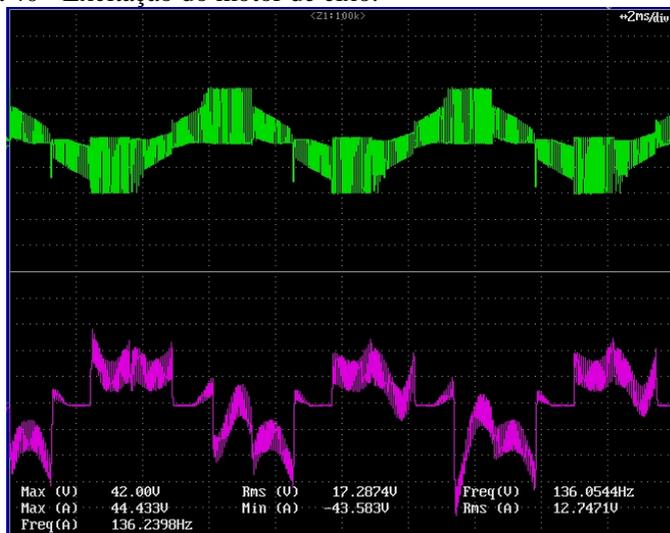
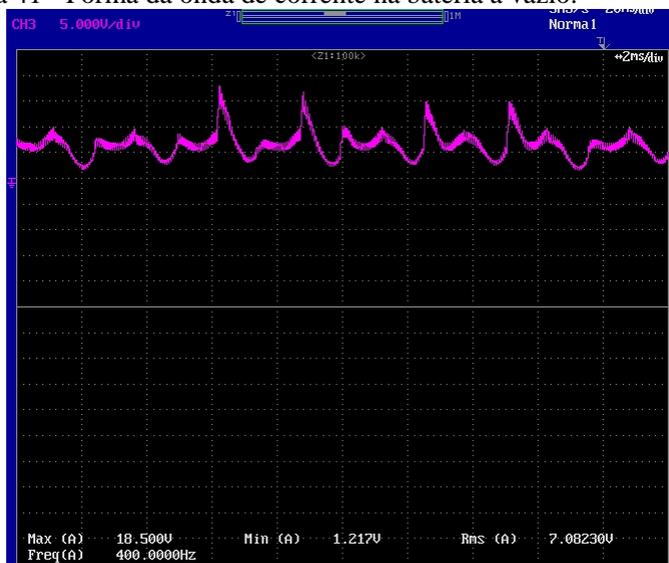


Tabela 14 - Dados do teste de excitação.

Tensão Max (V)	42,00	Tensão RMS (V)	27,28
Corrente Max (A)	4,44	Corrente RMS (A)	1,27
Frequência (Hz)	136,05		

A forma de onda da corrente da bateria a vazio é mostrada na Figura 41.

Figura 41 - Forma da onda de corrente na bateria a vazio.



4.1.2 Teste de back EMF

Uma ponteira de tensão foi ligada entre duas linhas do motor. O motor então foi acionado a vazio e, em seguida, foi tirado o dedo do acelerador, a *bEMF* foi então extraída com o motor girando por inércia. A Figura 42 mostra uma foto do ensaio de *bEMF*. A Figura 43 mostra a curva de tensão induzida reversa, é dado *zoom* no momento em que o motor roda por inércia. A Tabela 15 mostra dados do teste.

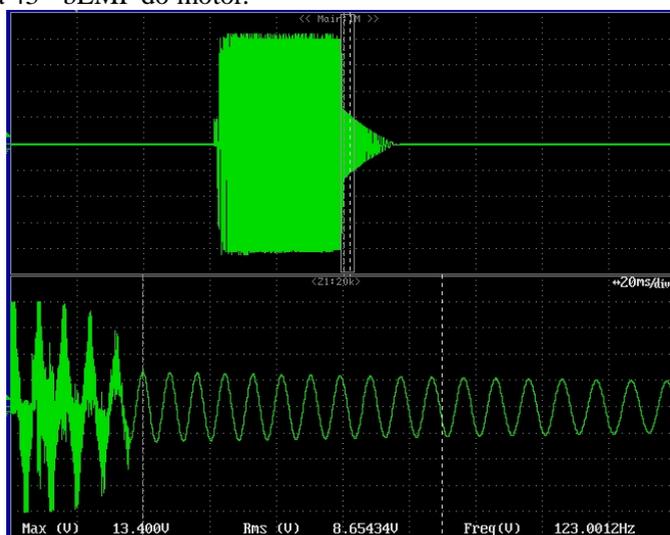
Figura 42 - Foto do teste de *bEMF*Figura 43 - *bEMF* do motor.

Tabela 15 - Dados do teste.

Tensão Max (V)	13,4	Tensão RMS (V)	8,65
Frequência (Hz)	123,0		

É mostrado, na desmontagem do motor, seção 3.3, que o motor possui 20 polos e 18 ranhuras. Assim, a velocidade máxima do motor é:

$$P = 20 \quad (1)$$

$$f_{medida} = 123\text{Hz} \quad (2)$$

A velocidade do motor, em rpm, é calculada da seguinte maneira:

$$n_{medida} = \frac{120 * f_{medida}}{P} = 738 \text{ rpm} \quad (3)$$

4.2 Especificações do motor

Para estimar as especificações de tensão e corrente do motor, foi encontrado um motor com redutor de 350 W no site da CNEBikes. As especificações são mostradas na Tabela 16:

Tabela 16 - Motor 350 W da CNEBikes.

Potência (W)	350	Torque máx. (N.m)	15
Tensão (V)	36	Eficiência (%)	80
RPM	180-235		

Será mostrado na desmontagem do motor estudado, que a relação da engrenagem de redução é 4,43: 1. Se a roda gira a 200 rpm, as especificações do motor CNEBikes são aquelas mostradas na Tabela 17.

Tabela 17 - Especificação de motor da CNEBikes.

Potência (W)	350	Torque máximo (N.m)	3,386
Tensão (V)	36	Eficiência (%)	80
RPM	797,4-1041,5		

Uma roda de 26 polegadas a uma velocidade máxima de 25 km/h é tracionada por uma unidade a 200,8 rpm. Pode-se assumir a velocidade do motor com redutor de velocidade de relação 4,43 como sendo:

$$200,8 \cdot 4,43 = 889,5 \text{ rpm} \quad (4)$$

Os 350 W e 3,386 N.m são um ponto de potência de pico. Foi estabelecido um ponto de controle para o motor a uma velocidade de cerca de 17 km/h e potência de 210 W. Isto leva à Tabela 18.

A velocidade do motor, em rpm, é:

$$rpm_2 = 889.5rpm \cdot \frac{17 \text{ km/h}}{25 \text{ km/h}} \cong 600rpm$$

Tabela 18 – Ponto de operação em regime permanente

Potência (W)	210	Eficiência (%)	80
Tensão (V)	36		
RPM	600		

4.3 Desmonte do motor com dimensões mecânicas

O motor estudado foi desmontado e suas dimensões são mostradas a seguir:

Tabela 19 - Dimensões do motor estudado.

Dimensões	
Número de ranhuras	18
Número de polos	20
Comprimento (mm)	20
Diâmetro externo do rotor (mm)	105
Diâmetro interno do rotor (mm)	91,1
Raio do estator (mm)	43,2
Raio do eixo (mm)	8,63
Entreferro (mm)	0,44
Comprimento do ímã (mm)	3
Espessura do ímã (mm)	14,3
Profundidade da ranhura (mm)	14,9
Espessura do dente (mm)	5
Buraco da ranhura (mm)	1,6
Comprimento da concha rotor (mm)	31
Espessura da concha rotor (mm)	2,4
Parâmetros elétricos	
Fios paralelos	8
Espiras por bobina (estimado por simulação)	8
Passo de ranhura	6
Ímã	Neodímio Sinterizado
Sensores hall	3
Resistência de linha (Ohm) a 25°C	0,11
Resistência de linha (Ohm) a 90°C	0,23

Agora, a desmontagem do motor é apresentada com imagens. As Figura 44, Figura 45 e Figura 46 mostram o motor com dimensões.

Figura 44 - Motor com redutor e suas cotas.

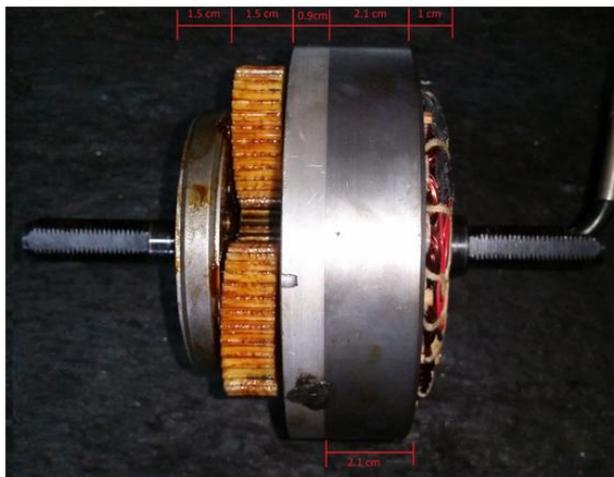


Figura 45 – Vista frontal do motor.

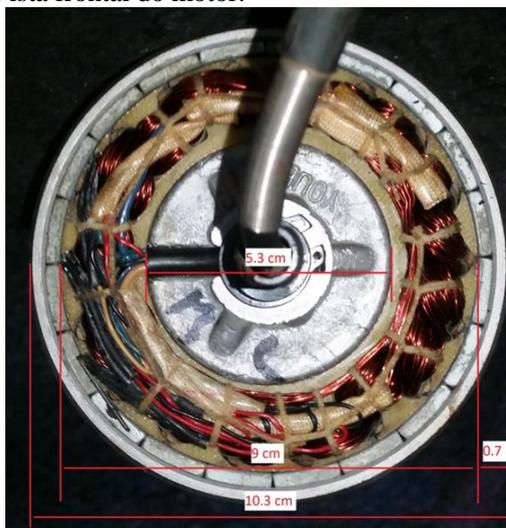


Figura 46 - Estator interno.

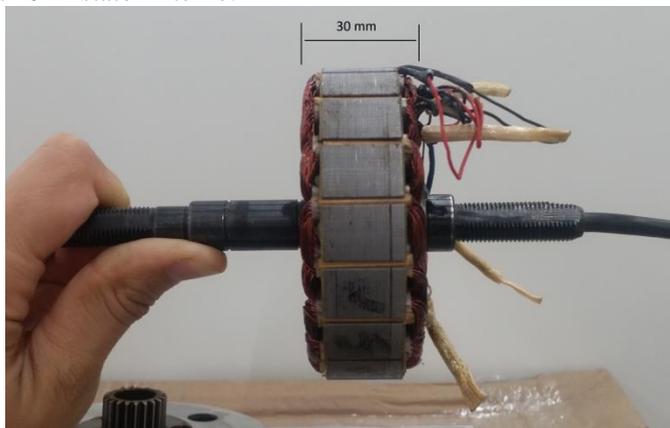


Figura 47 e Figura 48 mostram o estator e o rotor, respectivamente. A Figura 49 mostra o rotor com os planetas da engrenagem planetária.

Figura 47 – Estator.



Figura 48 - Rotor externo.



Figura 49 – Concha rotor com engrenagens planetas da redução planetária.



4.4 Esquema de bobinagem

O motor está conectado em Y. Cada fase tem 6 bobinas, a direção do enrolamento muda em cada bobina. Cada bobina tem oito espiras com oito fios paralelos. A Figura 50 mostra um esquema de bobinagem do motor estudado.

Figura 51 mostra o estator do motor estudado. Pode-se visualizar os três sensores hall (CIs pretos inseridos nas lâminas), utilizados para definir a posição do rotor.

Figura 50 - Esquema de bobinagem do motor.

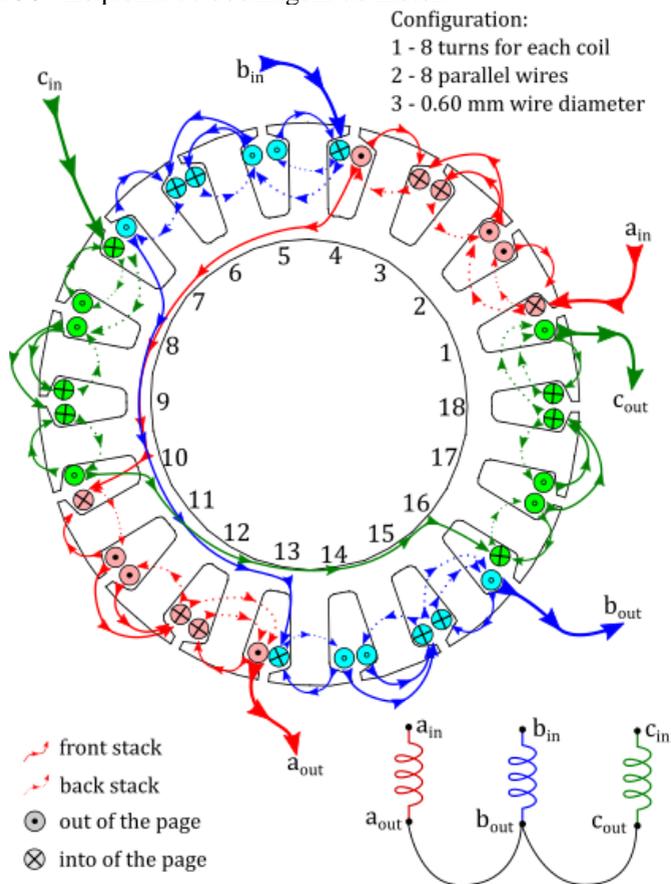
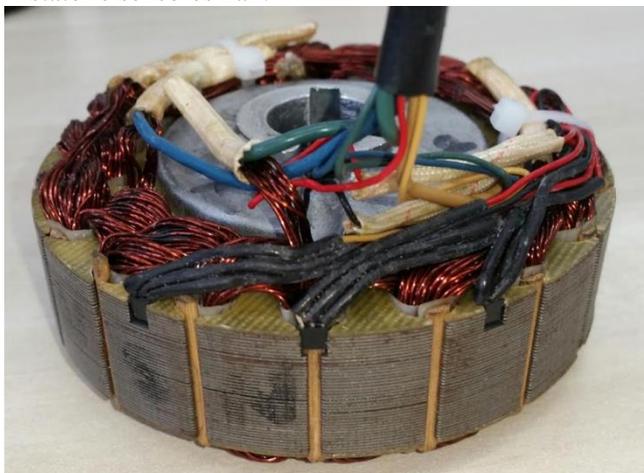


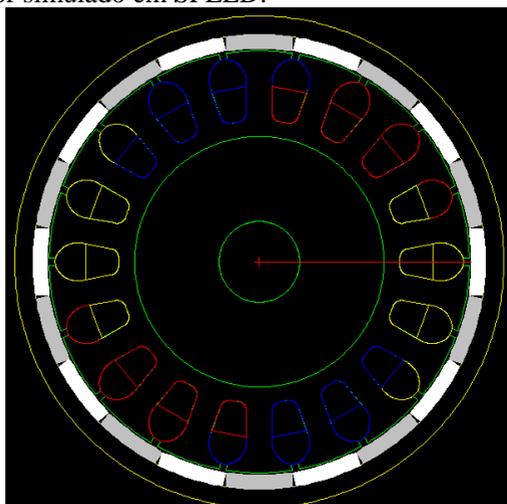
Figura 51 - Estator e sensores hall.



4.5 Calibração do software SPEED

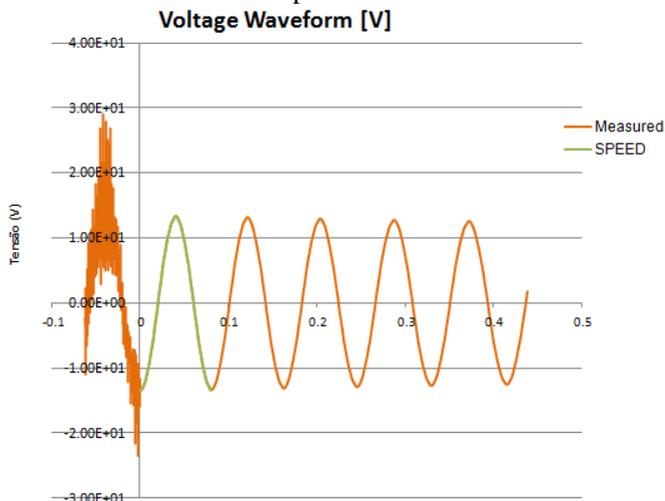
O motor simulado em software é mostrado na Figura 52 e tem as dimensões mostradas na Tabela 19.

Figura 52 - Motor simulado em SPEED.



Com a resistência de fase medida e a simulação do SPEED, pode-se estimar o número de espiras por bobina, que não é possível de obter sem desmontar o motor. O número de bobinas foi ajustado até obter a mesma resistência de fase medida. Parâmetros de correção do software SPEED foram ajustados até que a diferença entre o bEMF do modelo SPEED e o bEMF medido fosse satisfatoriamente pequena. Com isso, se obteve um modelo virtual confiável. Na Figura 53, a diferença entre os valores de pico das bEMFs plotadas difere em 0,62 %. Além disso, a calibração do software é necessária para obter por simulação curvas de torque e potência fiéis à realidade.

Figura 53 - bEMF simulada comparada com a medida.



4.6 Curvas de torque e potência do motor

Com o software calibrado, foram obtidas as curvas de operação do motor. As curvas Torque x Velocidade e Eficiência x Torque são mostradas na Figura 54 e Figura 55, respectivamente. Na simulação SPEED, o motor precisa de alta densidade de corrente para atingir tais torques, de cerca de 9 A/mm².

Figura 54 – Curva torque vs. velocidade por simulação.

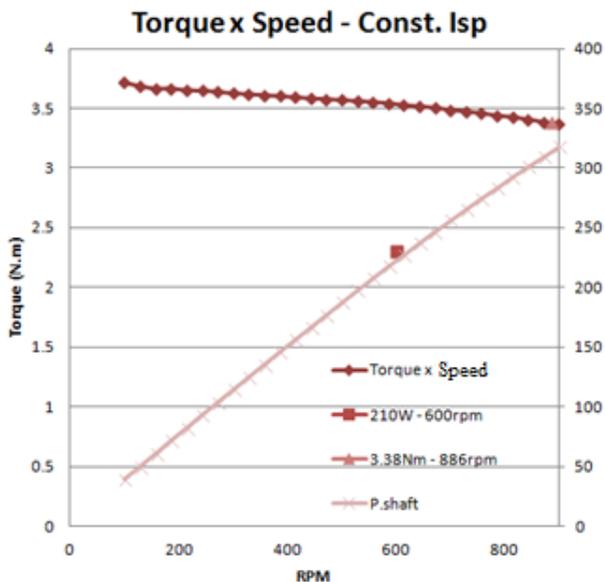
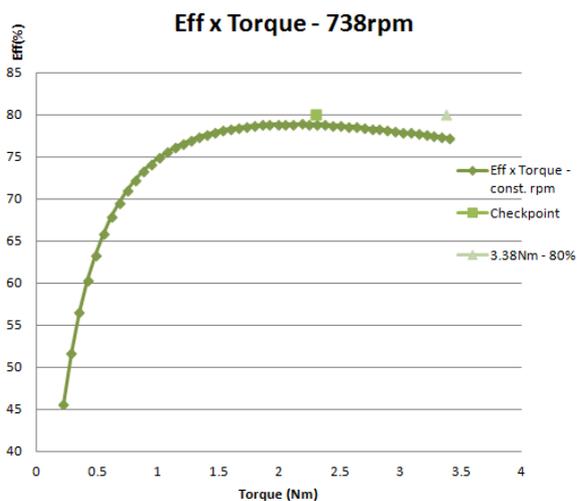


Figura 55 - Eficiência vs. Torque a 738 rpm.



Com isso, percebe-se uma característica do motor de tração: possui relativamente eficiência plana, ou seja, não concentra a eficiência em

apenas um ponto. Isso é necessário para se ter uma boa eficiência em um amplo intervalo de pontos de trabalho.

4.7 Design de um motor com ímãs de ferrite para a mesma tensão.

Um motor PM ferrite do mesmo tamanho que o motor estudado previamente foi projetado.

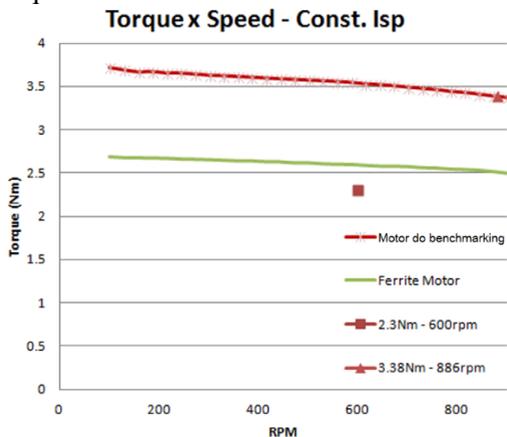
O processo de projeto de motor foi iterativo, os parâmetros variados foram número de espiras, espessura do dente, comprimento do dente, comprimento dos ímãs, número de espiras por bobina, espessura do fio e quantidade de fios paralelos.

Aumentou-se o número de espiras por bobina, o comprimento dos dentes, e afinou-se os dentes para obter-se o maior torque possível. Os dentes foram afinados de forma a manter o dente operando na região magneticamente linear. Aumentou-se a espessura do fio e o número de fios paralelos de forma que o fator de enchimento bruto fique próximo de 36 % e de forma a manter a densidade de corrente em torno de 10 A/mm². Também se aumentou o comprimento dos ímãs de ferrite de forma a manter o coeficiente de permeância em torno 10, como medida de evitar a desmagnetização do ferrite. Também se mudou o entreferro de 0,44 mm para 0,6 mm, supondo um método de produção não automatizado.

Repetindo o processo acima iterativamente, analisando a curva de torque e velocidade e a curva de eficiência a diferentes velocidades, chegou-se em um novo motor. O novo motor possui mais espiras por bobina, dentes mais finos e mais longos, e *entreferro* de 0,6 mm, em vez de 0,44 mm do motor de referência.

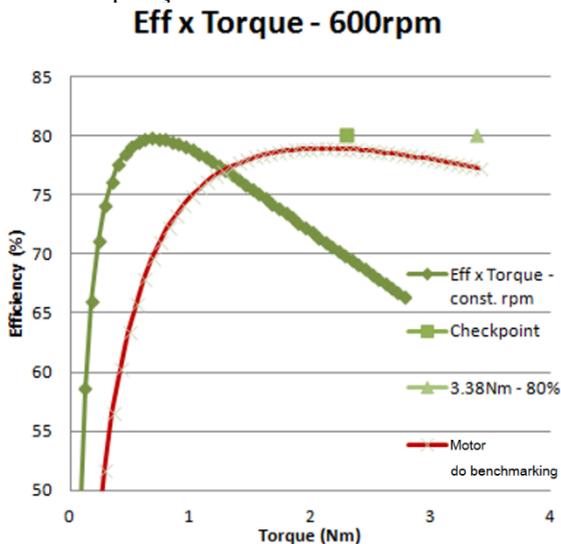
Como esperado, e mostrado na Figura 56, o motor atinge menos torque usando ferrite. A 728 rpm, por exemplo, o motor do estudo de caso atinge 3,475 N.m usando uma densidade de corrente de 9,22 A/mm². O motor de ferrite alcança 2,567 N.m, 73,87 % do torque do motor estudado, usando 9,21 A/mm², a mesma densidade de corrente.

Figura 56 - Torque versus velocidade - motor de ferrite.



O motor de ferrite também é menos eficiente, pois precisa de mais corrente para o mesmo torque do que o motor estudado, resultando em maiores perdas no cobre. Uma comparação da eficiência dos motores pode ser vista na Figura 57. Por exemplo, para um torque de 2.5N.m a 600 rpm, tem eficiência de 70 %, e essa eficiência diminuirá para cerca de 60 % em 3,3 N.m.

Figura 57 - Comparação de eficiência.



5 CONCLUSÕES

Entre as soluções encontradas no mercado e em artigos, os motores de eixo foram escolhidos para serem estudados. Essas unidades usam o motor de rotor externo de alto número de polos com ímã permanente NdFeB sinterizado.

A potência de tais sistemas geralmente vai de 250 W a 1000 W e são alimentados por um banco de baterias de 36 V ou 48 V.

Motores de cubo de bicicletas requerem alto número de polos. Um motor de cubo de 350 W, com caixa de redução de relação 5:1, tem em torno de 20 polos para atender às exigências de torque e velocidade.

Um motor de 18 ranhuras, 20 polos de *e-bike* foi adquirido. A EMF foi extraída para obtenção de parâmetros e calibração de software para posterior simulação e análise. Com a calibração dos parâmetros, as curvas de torque do motor estudado foram extraídas. Então, um motor com ímãs de ferrite foi projetado variando suas dimensões, mas mantendo o mesmo volume. O motor de ferrite precisa de correntes mais altas para o mesmo torque, o que resulta em menor eficiência. Além disso, mesmo usando mais espiras por bobina, o motor de ferrite não atinge a mesma potência que o motor NdFeB sinterizado, como pode ser inferido pela análise da Figura 56.

Um trabalho futuro relevante é desenvolver e otimizar um motor de ferrite de maior volume, maior tensão e em torno da mesma potência que o motor NdFeB PM estudado. O NdFeB é caro e produzido principalmente na China, resultando em dependência industrial da fabricação chinesa. Desenvolver um eficiente motor de ímãs de ferrite pode reduzir o custo de produção e permitir a produção nacional de sistemas de *e-bike*.

O objetivo do trabalho era estudar motores de bicicleta, tecnologias utilizadas atualmente no mercado, tecnologias promissoras, e testar um motor elétrico de bicicleta para aprendizado sobre requisitos do projeto, sua topologia, e adquirir curvas de eficiência e de potência. Com a desmontagem de um motor estudado e criação de um modelo virtual que foi simulado, pôde-se compreender sua topologia de alto número de polos e também adquirir as curvas desejadas. Considera-se que os objetivos do trabalho foram atingidos.

REFERÊNCIAS

CHRISTEN, A.; HAERRI, V. V. **Analysis of a six- and three-phase interior permanent magnet synchronous machine with flux concentration for an electrical bike**. 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2014. **Anais...**2014

HAERRI, V. V.; LINDEGGER, M.; NEUMAIER, M. **A novel interior permanent synchronous motor for a high end ebike drive chain**. 2015 5th International Conference on Electric Drives Production, EDPC 2015 - Proceedings. **Anais...**2015

IWANI JUSOH, L. et al. Design and Performance of 8Slot-12Pole Permanent Magnet Flux Switching Machines for Electric Bicycle Application. **International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)**, v. 8, n. 1, p. 248–254, 2017.

JUSOH, L. I. B. et al. Design and performance of 8slot-12pole permanent magnet flux switching machines for electric bicycle application. **International Journal of Power Electronics and Drive Systems**, 2017.

LIN, J.; SCHOFIELD, N.; EMADI, A. External-Rotor 6–10 Switched Reluctance Motor for an Electric Bicycle. **IEEE TRANSACTIONS ON TRANSPORTATION ELECTRIFICATION**, v. 1, n. 4, 2015.

POMPERMAIER, C.; SJOBERG, L.; NORD, G. **Design and optimization of a Permanent Magnet Transverse Flux Machine**. Proceedings - 2012 20th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2012. **Anais...**2012

YANG, Y.-P.; DING, F.-X. Driving-scenario oriented design of an axial- flux permanent-magnet synchronous motor for a pedal electric cycle. **The Institution of Engineering and Technology**, 2015.