

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Curso de Engenharia Elétrica

Paulo Fragomeni Bicca

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BICICLETA ELÉTRICA COM MOTOR
BLDC**

Santa Maria, RS

2018

Paulo Fragomeni Bicca

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BICICLETA ELÉTRICA COM MOTOR
BLDC**

**Trabalho de conclusão
apresentado ao curso de
graduação em Engenharia
Elétrica, da Universidade Federal
de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.**

Orientador: Prof. Dr. Jorge Rodrigo Massing

Santa Maria, RS

2018

Paulo Fragomeni Bicca

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BICICLETA ELÉTRICA COM MOTOR
BLDC**

**Trabalho de conclusão
apresentado ao curso de
graduação em Engenharia
Elétrica, da Universidade Federal
de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.**

Aprovado em 14 de dezembro de 2018:

Jorge Rodrigo Massing, Dr (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Bernardo Andres, Me (UFSM)

Filipe Pinarello Scalcon (UFSM)

Santa Maria, RS
2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

“Success is not final, failure is not fatal: it is the courage to continue that counts”

-Winston Churchill

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE UMA BICICLETA ELÉTRICA COM MOTOR BLDC

AUTOR: Paulo Fragomeni Bicca
ORIENTADOR: Jorge Rodrigo Massing

O impacto causado pela emissão de gás carbônico aliado a necessidade de melhoria de mobilidade urbana, tornou necessária a procura por meios alternativos de locomoção. Concomitantemente a isso, o uso de bicicletas tem crescido e se mostrado efetivo na solução dos principais problemas de transporte em grandes centros urbanos. O grande avanço da eletrônica de potência, aliado à procura por novos meios de locomoção, tornou possível o desenvolvimento de novas soluções, de modo a tornar bicicletas elétricas uma opção viável. O conceito de bicicleta elétrica se baseia basicamente na inserção de um motor elétrico ao corpo de uma bicicleta convencional, e já é notável a existência de normas a fim de definir e regulamentar este modelo de bicicleta em muitos países ao redor do globo. Verificar-se-á neste trabalho que as bicicletas podem ser construídas com tipos diferentes de motores, onde dentre eles se encontra o motor BLDC, objeto foco deste trabalho. Serão apresentadas as normas que regulamentam as bicicletas elétricas ao redor do mundo e realizados estudos dos motores BLDC, seus modos de construção, sua modelagem matemática, seu modo de funcionamento, com foco no controle *six-step* e por fim estudar-se-á um motor BLDC para utilizá-lo na construção de um protótipo de uma bicicleta elétrica.

Palavras-Chave: Bicicleta Elétrica. BLDC. Controle Six-Step.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF AN ELECTRIC BICYCLE WITH BLDC MOTOR

AUTHOR: Paulo Fragomeni Bicca

ADVISOR: Jorge Rodrigo Massing

The impact caused by the emission of carbon dioxide, coupled with the need to improve urban mobility, made it necessary to search for alternative means of locomotion. Concurrently with this, the use of bicycles has grown and proved effective in solving the major transportation problems in large urban centers. The great advance of power electronics, coupled with the search for new means of locomotion, has made possible the development of new solutions in order to make electric bicycles a viable option. Electric bikes can be basically defined as a bicycle driven by an electric motor, and it is already notable the existence of standards in order to define and regulate this bicycle model in many countries around the globe. It will be verified in this work that the bicycles can be built with different types of motors, where among them is the BLDC motor, object focus of this work. The rules governing electric bicycles around the world will be presented and studies of the BLDC engines, their construction methods, their mathematical modeling, their mode of operation, focusing on the six-step control and finally a BLDC engine will be studied for use in the construction of a prototype of an electric bicycle.

Keywords: BLDC. Electric Bicycle. Six-Step Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Emissões de CO2 por tipo de veículo	16
Figura 2 - Quantidade de carros e motos no Brasil em 2013	17
Figura 3 - Primeira bicicleta elétrica, inventada por Ogden Bolton, Jr.	18
Figura 4 - Principais topologias para motores de veículos elétricos. (a) DC. (b) Indução. (c) Relutância Variável (SR). (d) Imãs Permanentes sem Escovas(PM BL)	21
Figura 5 - Rotor externo	24
Figura 6 - Rotor interno	24
Figura 7 - Rotor axial	25
Figura 8 - Motor com dois pares de polos	26
Figura 9 - Forças contra eletromotrizes do BLDC	29
Figura 10 - BLDC com somente uma fase	30
Figura 11 - Curva de torque do BLDC com somente uma fase	30
Figura 12 - Curva de Torque do BLDC com somente uma fase	31
Figura 13 - Acionamento fase por fase do BLDC	32
Figura 14 - Análise inicial de torque e correntes	32
Figura 15 - Correntes de torque negativo rebatidas	33
Figura 16 - Torque e correntes finais	34
Figura 17 - Motor BLDC com a união das fases	35
Figura 18 - Topologia típica para acionamento do Motor BLDC	35
Figura 19 - Circuito Simulado	36
Figura 20 - Correntes simuladas	36
Figura 21 - Motor BLDC fixo na roda da bicicleta	38
Figura 22 - Placa X-Nucleo IHM08M1 no laboratório	39
Figura 23 - Placa Nucleo F401RE no laboratório	39
Figura 24 - Placa X-NUCLEO IHM08M1e placa F401RE montadas juntas	40
Figura 25 - Fonte de alimentação	40
Figura 26 - Disposição interna do motor	41
Figura 27 - Disposição dos sensores hall	42
Figura 28 - Fios de acionamento do sensor de efeito hall	43
Figura 29 - Fases montadas na placa de potência, pós identificação	44
Figura 30 - Protótipo montado no GEPOC	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Desempenho do motor BLDC x número de fases	26
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BLDC	Motor sem Escovas de Corrente Contínua
CC	Corrente Contínua
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
MI	Motor de Indução
PMBL	Imãs Permanentes sem Escovas
PMSM	Motor Síncronos de Imãs Permanentes
SR	Relutância Variável

LISTA DE SÍMBOLOS

λ_a	Indutância concatenada da fase a
λ_b	Indutância concatenada da fase b
λ_c	Indutância concatenada da fase c
L_a	Indutância própria da fase a
L_b	Indutância própria da fase b
L_c	Indutância própria da fase c
M	Indutância mútua do motor BLDC
i_a	Corrente de fase no enrolamento a
i_b	Corrente de fase no enrolamento b
i_c	Corrente de fase no enrolamento c
R_a	Resistência da fase a
R_b	Resistência da fase b
R_c	Resistência da fase c
V_a	Tensão de fase do enrolamento a
V_b	Tensão de fase do enrolamento b
V_c	Tensão de fase do enrolamento c
e_a	Força contra eletromotriz da fase a
e_b	Força contra eletromotriz da fase b

e_c	Força contra eletromotriz da fase c
T_e	Conjugado eletromagnético do motor BLDC
J	Constante de inércia do motor BLDC
ω_r	Velocidade angular de rotação
T_c	Conjugado de carga
B	Coefficiente de atrito viscoso do motor BLDC
θ_r	Ângulo mecânico do rotor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 MOTIVAÇÃO	15
1.2 OBJETIVOS	18
1.3 REVISÃO DA LITERATURA	18
1.3.1 BICICLETAS ELÉTRICAS	18
1.3.2 BICICLETAS ELÉTRICAS AO REDOR DO MUNDO	19
1.3.3 MÁQUINAS DE IMÃS PERMANENTES	19
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
2 O MOTOR BLDC	23
2.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS.....	23
2.1.1 TIPO DE ROTOR	23
2.1.1.1 ROTOR EXTERNO	23
2.1.1.2 ROTOR INTERNO	24
2.1.1.3 ROTOR AXIAL	25
2.1.2 ESTATOR	25
2.1.3 NÚMERO DE FASES	25
2.1.4 NÚMERO DE POLOS	26
2.1.5 DISPOSIÇÃO DAS FASES NAS RANHURAS.....	27
2.1.6 SENSORES DE EFEITO HALL	27
3 MODELAGEM MATEMÁTICA E PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO	28
3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DO BLDC.....	28
3.2 PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO	29
3.3 SIMULAÇÃO	36
4 O PROTÓTIPO	38
4.1 COMPONENTES DO PROTÓTIPO	38
4.1.1 MOTOR BLDC	38
4.1.2 PLACA DE POTÊNCIA	39
4.1.3 PLACA DE CONTROLE	39
4.1.4 ALIMENTAÇÃO DO MOTOR.....	40
4.2 ENGENHARIA REVERSA DO MOTOR.....	41
5 CONCLUSÃO.....	45

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A palavra bicicleta, deriva do grego "kyklos", que significa, círculo ou roda, através do latim tardio cyclos, e o prefixo latino "bi-"(dois), formando a correspondente inglesa bicycle, ou seja, duas rodas. Neste contexto, podemos observar que uma bicicleta convencional deve ser definida como veículo de duas rodas movido pelo esforço do usuário, que através do acionamento de pedais, com seu sistema mecânico de correias faz com que o veículo se movimente levando o usuário a seu destino.

O presente trabalho visa realizar análise do uso da eletrônica de potência, para que, aliado à procura por novos meios de locomoção, no frenesi de uma busca por um mundo mais sustentável e com menos poluição seja possível fazer o uso de bicicletas elétricas, que possibilitem o percurso de distâncias maiores não gerando poluição, e evitando grandes perdas de tempo em deslocamentos, algo impossível quando se escolhe um deslocamento comum como carros, ônibus, entre outros.

O método de pesquisa utilizado foi o bibliográfico e concomitantemente foram feitas simulações e estudos a fim de determinar o melhor tipo de motor para a bicicleta elétrica e qual o modo de acionamento e como funciona. De início estudaremos os tipos de construções de motores BLDC.

No segundo capítulo trataremos da modelagem matemática do motor BLDC e do seu modo de operação.

No terceiro capítulo apresentaremos o estudo do motor que será utilizado para o protótipo da bicicleta e os componentes do protótipo.

E na conclusão serão apresentados os resultados desta pesquisa.

1.1 MOTIVAÇÃO

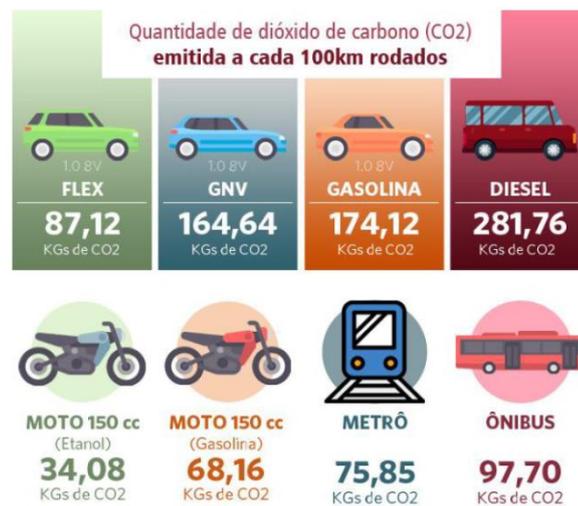
A evolução dos meios de locomoção está intrinsicamente ligada à necessidade de deslocamentos em maiores distâncias enfrentada pela sociedade moderna. Após a revolução industrial o homem está progredindo do uso de máquinas movidas a combustíveis fósseis, como carvão e petróleo, para máquinas movidas a energia elétrica, como veículos elétricos.

Com a crescente preocupação com o meio ambiente, criaram-se novas leis em alguns países com o objetivo de datar a extinção da produção de veículos movidos a combustíveis fósseis. Concomitantemente, o grande avanço da eletrônica de potência nos últimos anos fez com que veículos elétricos conquistem cada vez mais espaço como substitutos de veículos que

operam através de combustão interna. Na Figura 1, ilustra-se a quantidade de CO2 emitida por tipo de veículo a cada 100 km, expondo ainda mais a necessidade latente de encontrar um substituto para os combustíveis fósseis.

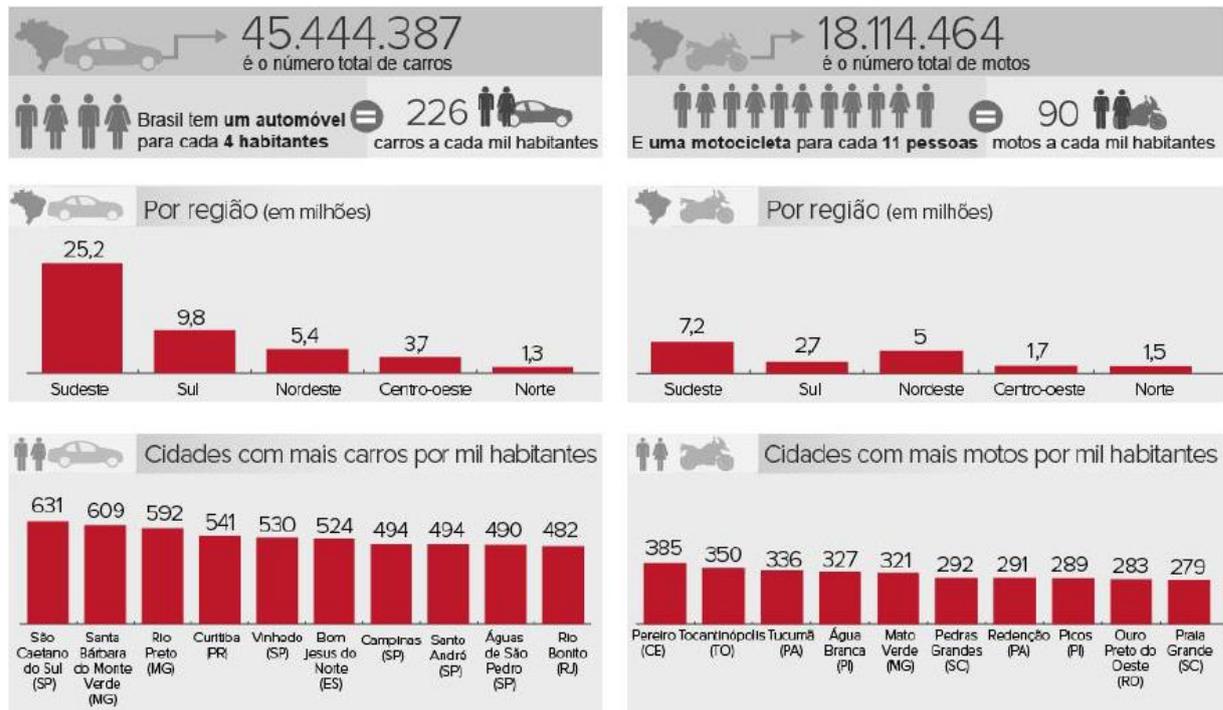
Outro ponto a ser considerado, na atualidade, se dá com a problemática da mobilidade urbana, como mostra a Figura 2, em que se ilustra o número de carros e motos por habitante no Brasil. É possível observar que a cada ano que passa existem mais veículos transitando nas cidades e em rodovias, o que faz com que seja necessário que se busquem novos meios de locomoção, mais eficientes, tanto em mobilidade quanto em emissões de gás carbônico e um dos mais cotados atualmente é a bicicleta.

Figura 1 - Emissões de CO2 por tipo de veículo



Fonte – Jornal do comércio.

Figura 2 - Quantidade de carros e motos no Brasil em 2013



Fonte – G1

Conforme o site G1, em 2015, a ONG Transporte Ativo e o laboratório de mobilidade da Universidade Federal do Rio de Janeiro realizaram um levantamento em dez grandes cidades brasileiras, entrevistando somente ciclistas, e constataram que 45% dos entrevistados eram novos ciclistas. Brasileiros cansados de longas horas presos em engarrafamentos e em busca de uma maneira melhor de se locomover durante o dia-a-dia.

Esta tendência também pode ser vista em países da Europa. Segundo o site The Green Post, a Noruega anunciou que irá investir mais de um bilhão de dólares em ciclovias, visando aumentar o tráfego destes veículos em 20% até 2030. Enquanto na capital da Inglaterra, desde 2000, o número de motoristas caiu pela metade e o de ciclistas aumentou em três vezes.

O avanço da eletrônica de potência, aliado com o aumento da procura de bicicletas como forma de locomoção, faz com que surja a ideia da bicicleta elétrica, um modo simples e eficaz para transporte dentro das cidades.

Através desse trabalho, que surge aproximadamente 155 anos depois do primeiro projeto de uma bicicleta elétrica, pretende-se estudar o modo de funcionamento das bicicletas, seus componentes e qual a legislação brasileira sobre o assunto. Ao fim, com uma análise completa, partir-se-á para o desenvolvimento da mesma.

1.2 OBJETIVOS

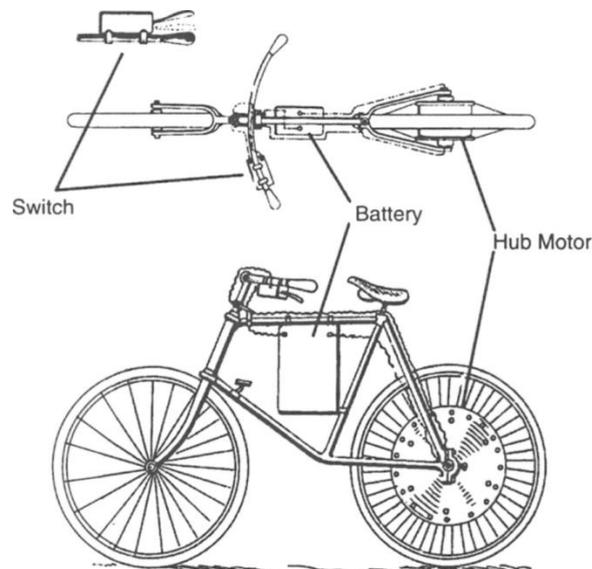
O trabalho busca analisar e detalhar o motor de corrente contínua sem escovas (BLDC), o qual será utilizado na construção de um protótipo de bicicleta elétrica, e também deixá-lo pronto para a implementação do controle. A análise do motor BLDC se dá a partir de modos de construção de motores e as justificativas para tais construções. Será feita também uma modelagem matemática do motor. Além disso, busca-se entender o modo de operação denominado *six-step*. Tendo analisado o método mais adequado de construção e entendido o modo de acionamento, partiremos para uma análise mais profunda do motor que será utilizado como base para o protótipo da bicicleta.

1.3 REVISÃO DA LITERATURA

1.3.1 BICICLETAS ELÉTRICAS

Quando se considera o conceito de bicicleta elétrica imagina-se uma história recente. Porém, segundo (MOROCHIN, 2006), as primeiras bicicletas elétricas começaram a surgir por volta de 1890. Em 1895 Ogden Bolton, Jr registrou a primeira patente de uma bicicleta elétrica, a qual pode ser vista na Figura 3. A bicicleta era alimentada por uma bateria de 10V/100A e com um motor corrente contínua (CC) de 6 polos com escovas e comutador.

Figura 3 - Primeira bicicleta elétrica, inventada por Ogden Bolton, Jr.



Fonte – (MOROCHIN, 2006)

Em seu livro, (MOROCHIN, 2006) conta a história das bicicletas elétricas, que vão evoluindo e alterando entre tipo de motor, bateria, locais que são acomodados e a quantidade de motores usados. Descreve-se ainda em (MOROCHIN, 2006) uma bicicleta feita em 1992, com bateria de níquel e cádmio e com um motor de ímãs permanentes, a Zike. A Zike lembra as bicicletas elétricas atuais, não só por usar um motor de ímãs permanentes, mas também por possuir duas opções de funcionamento. Uma delas com somente motor e a segunda função com o pedal do ciclista em conjunto com o motor, assim alterando a autonomia da bateria. Esse tipo de funcionamento e o motor da bicicleta são estudados nos próximos capítulos.

1.3.2 BICICLETAS ELÉTRICAS AO REDOR DO MUNDO

Com a evolução das bicicletas ao passar dos anos, começaram a ser regulamentadas leis e parâmetros que definem o que é uma bicicleta elétrica e o que não é. No Brasil, segundo a resolução 465 do CONTRAN, para que a bicicleta seja considerada elétrica deve-se atender alguns requisitos, como: velocidade máxima de 25 km/h, potência nominal de até 350 Watts, o motor só deve funcionar quando o ciclista pedalar, não dispor de acelerador ou dispositivo que varie a potência manualmente.

Em outros países, como nos EUA, as bicicletas são normalmente importadas e as leis diferem conforme o estado. Embora pouco populares, quando usadas são comumente utilizadas em viagens curtas.

Já no Japão, a maioria das bicicletas são fabricadas pela indústria automotiva e a bicicleta deve operar metade por motor e metade por esforço humano, tal modo é conhecido como *pedelec*, ou, pedal assistido. A velocidade deve ser de até aproximadamente 20 km/h. Para velocidades acima desta, o condutor deve fornecer mais da metade do esforço necessário.

A china é a maior fabricante de bicicletas elétricas do mundo. As bicicletas chinesas não podem exceder 20 km/h e também não podem pesar mais que 40 kg.

Na Europa, a maior parte das bicicletas é fabricada na Alemanha e na Holanda e o tipo mais utilizado de bicicleta é o pedal assistido (MUETZE; TAN, 2007).

1.3.3 MÁQUINAS DE IMÃS PERMANENTES

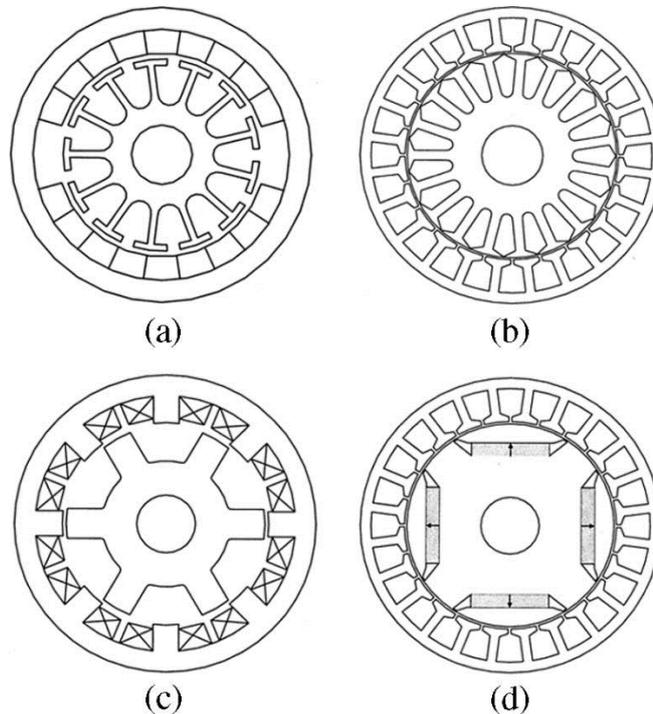
No artigo de (SAUNDERS;WEAKLEY, 1951a,b) percebe-se que em 1951 já se citava o uso de imãs permanentes, sendo estes em alternadores, usados para pequenas máquinas como geradores de tacômetros e fontes de frequência de reguladores. Porém, naquela época, máquinas de imãs permanentes ainda não eram usadas como fontes primárias de energia. O autor ainda cita que com o peso reduzido da máquina, ela estava assumindo um importante papel para uso em aeronaves.

Ainda (SAUNDERS; WEAKLEY, 1951a, b) cita que no início do projeto de uma máquina síncrona de imãs permanentes encontram-se muitos problemas, que são muito diferentes de problemas encontrados em máquinas denominadas pelo autor como “comuns”. Os problemas são voltados para desmagnetização de materiais de imãs permanentes e métodos de reduzir a regulação de tensão.

Já em 1960, (WILSON; TRICKEY, 1962) cita que existem muitos problemas associados com o comutador e os contatos das escovas, e o desejo dos projetistas de eliminar os dois de algum modo. Com isso surge o conceito de máquina *brushless*. Em seu trabalho (WILSON; TRICKEY, 1962) apresenta o conceito de um motor BLDC. O motor apresentado pelo autor possui sensores de posição para detecção da posição do rotor, característica muito comum nesse tipo de máquina. O autor também afirma que o motor é de grande valia para uso em altas altitudes e em velocidades elevadas, dada a ausência de comutadores e escovas, conferindo alta confiabilidade e uma grande vida útil.

Nos anos 2000, surgem trabalhos como o de (CHAN, 2002), que introduzem a ideia da aplicação de máquinas de imãs permanentes em veículos elétricos, devido a sua alta eficiência e densidade de potência. Alguns anos depois, (CHAU; CHAN; LIU, 2008) expõe que com o advento de materiais de imãs permanentes de alta energia, motores síncronos de imãs permanentes (PMSM) estão ficando mais atrativos, ganhando mais estratégias de controle e novas topologias. Neste trabalho (CHAU; CHAN; LIU, 2008) apresenta análises de tipos de máquinas elétricas com ênfase na topologia das máquinas. (CHAU; CHAN; LIU, 2008) também traz topologias de máquinas usadas em veículos elétricos, que pode ser visualizada na figura 4.

Figura 4 - Principais topologias para motores de veículos elétricos. (a) DC. (b) Indução. (c) Relutância Variável (SR). (d) Imãs Permanentes sem Escovas (PM BL)



Fonte – (CHAU; CHAN; LIU, 2008)

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho começa no capítulo um, onde após uma breve introdução sobre a evolução da eletrônica de potência, aliada ao aumento da procura de formas alternativas de meios de transporte dentro de centros urbanos, surge o conceito de bicicleta elétrica. Logo após a introdução temos a revisão bibliográfica, onde se procurou abordar tanto sobre bicicletas elétricas como também de motores de ímãs permanentes, o qual será o foco do trabalho.

No capítulo dois, temos o estudo de modos de construção de motores elétricos de corrente contínua, bem como os benefícios de cada tipo de construção.

Dando seguimento, o terceiro capítulo apresenta um modelo matemático do motor *brushless*, bem como a análise de um dos modos de acionamento de um motor elétrico de corrente contínua, o acionamento *six-step* em busca do entendimento do mesmo, e com isso finaliza-se o capítulo.

No quarto e último capítulo se parte para o motor que será utilizado para o protótipo da bicicleta elétrica e para os dispositivos que farão o controle do mesmo. O capítulo quatro tem como foco deixar o definido e pronto para a aplicação do controle.

2 O MOTOR BLDC

O motor BLDC é um motor síncrono de ímãs permanentes. Por possuir estes ímãs, quando comparado a motores de indução (MI), apresenta maior eficiência, (HENDERSHOT; MILLER, 1994).

O motor BLDC, não possui comutador, e por conta disto exige menor manutenção quando comparado a um motor de corrente contínua com escovas. Assim o motor BLDC se torna ideal para aplicações que exigem peso reduzido e pouco espaço para operação, pois possui elevada densidade de potência, quando comparado aos demais, (SCALCON,2016).

2.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

Nesta subseção tratar-se-á das variações do motor BLDC, quais sejam: o tipo de rotor, estator, o número de fases, número de polos, disposição das fases nas ranhuras do estator e quanto a presença de sensores de efeito hall. As definições serão aprofundadas a seguir.

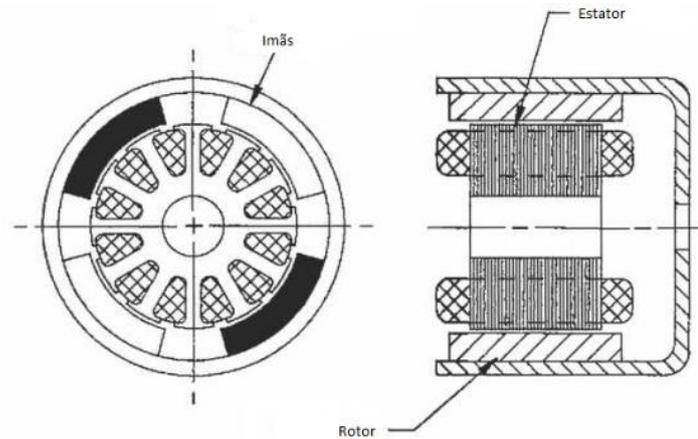
2.1.1 TIPO DE ROTOR

Como visto em (HENDERSHOT; MILLER, 1994) existem muitas configurações diferentes de motores BLDC que utilizam ímãs permanentes como rotor e bobinas como estator. Isto se deve as diferentes aplicações. Os tipos de rotores e suas aplicações serão vistas a seguir.

2.1.1.1 ROTOR EXTERNO

Em (HENDERSHOT; MILLER, 1994) vemos que o rotor externo é mais comum em aplicações que requerem velocidade constante. Por ser simples de produzir e ter um custo baixo, esse tipo de rotor é muito popular. O motor de rotor externo pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Rotor externo

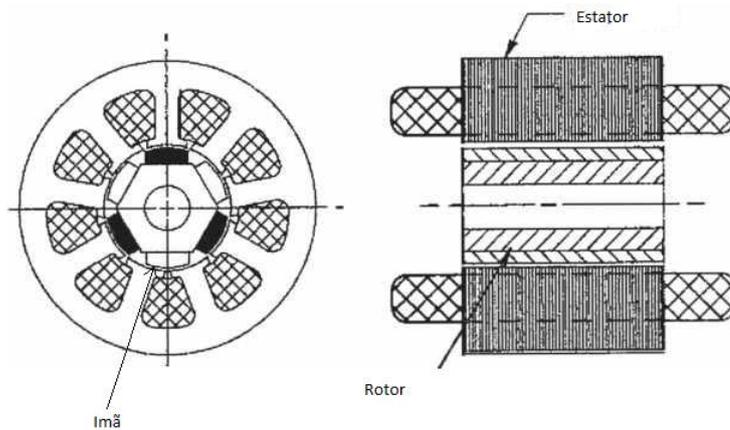


Fonte – (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

2.1.1.2 ROTOR INTERNO

O rotor interno é o mais próximo ao motor AC síncrono clássico ou a máquina de indução. O estator nessa configuração é similar ao de uma máquina de indução trifásica. Essa configuração é popular para aplicações que exigem alto torque e baixa rotação. (HENDERSHOT; MILLER, 1994). A Figura 6 mostra um exemplo de motor com rotor interno.

Figura 6 - Rotor interno

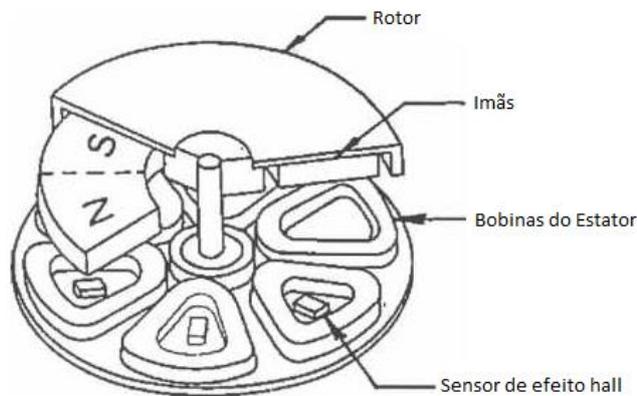


Fonte – (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

2.1.1.3 ROTOR AXIAL

O rotor axial normalmente consiste em um rotor de disco de aço com um ímã cimentado de um lado do disco. Esse tipo de rotor é utilizado em aplicações que exigem velocidade baixa e constante. A maior vantagem desse tipo de rotor é seu baixo custo, sua forma plana e sua rotação suave. Na figura 7 podemos ver o rotor axial.

Figura 7 - Rotor axial



Fonte – (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

2.1.2 ESTATOR

O tipo de estator da máquina deve variar conforme a configuração que será adotada para o rotor. Como visto no capítulo anterior, o tipo de rotor influencia diretamente no tipo de estator. O estator também pode variar quanto ao número de ranhuras contidas, possibilitando distintas formas de arranjo das fases.

2.1.3 NÚMERO DE FASES

Máquinas BLDC trifásicas são as mais comuns de serem encontradas, porém também existem máquinas que possuem mais de três fases, denominadas máquinas multifásicas. Como visto em (SCALCON,2016) máquinas multifásicas produzem menor pulsação de

torque e apresentam maior tolerância a faltas. Abaixo podemos ver uma tabela que relaciona o número de fases e o desempenho dos motores. (VIEIRO, 2014)

Tabela 1 - Desempenho do motor BLDC x número de fases

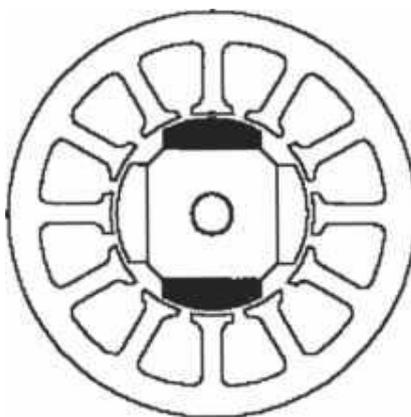
Número de Fases	Utilização de Condutores (%)	Número de Comutadores	Oscilação de Torque (%)
1	50	2	100
2	50	4 ou 8	30
3	67	6 ou 3	15
4	75	8	10
6	83	12	7
12	92	24	3

Fonte – (VIEIRO, 2014)

2.1.4 NÚMERO DE POLOS

O tipo de material do ímã e o tipo de rotor utilizado influência no número de polos da máquina. Por sua vez, o número de polos influencia diretamente na velocidade da máquina. Quanto maior o número de polos mais lento se tornará o motor. Sendo importante então considerar para a escolha do número de polos as características desejadas tais como velocidade, tipo do material do ímã e tipo de rotor. Um exemplo de motor com dois pares de polos pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 - Motor com dois pares de polos



Fonte – (HENDERSHOT; MILLER, 1994)

Conforme variamos o número de polos da máquina, também variamos o conceito chamado de passo elétrico. Um passo elétrico é dado quando o motor termina de passar por um polo norte e por um polo sul. Em máquinas com somente dois polos, ou um par de polos, o motor termina o passo elétrico junto com o passo mecânico, que é dado quando o motor termina de dar uma volta completa, porém, quando aumentamos o número de polos para mais de dois polos por fase, isso deixa de ser verdade.

No capítulo 4 veremos como o motor estudado se comportará quanto ao número de polos e quanto ao número de passos elétricos que dará em um passo mecânico.

2.1.5 DISPOSIÇÃO DAS FASES NAS RANHURAS

A disposição das fases nas ranhuras depende diretamente do número de polos e do número de enrolamentos que a máquina possui. A disposição deve ser feita de forma lógica, de modo que quando energizadas as fases, o motor deve girar.

Existem inúmeras configurações diferentes para a disposição das fases nas ranhuras da máquina. São produzidos motores nos quais não se utilizam todas as ranhuras que ele possui. Como visto em (ISHAK; ZHU; HOWE, 2006) a maior diferença em motores que utilizam todas as ranhuras e os que não utilizam é na indutância dos enrolamentos.

2.1.6 SENSORES DE EFEITO HALL

Os sensores de efeito hall servem para determinar a posição do rotor, de modo a auxiliar o acionamento da máquina. A máquina BLDC pode ou não conter dentro dela sensores de efeito hall. Uma máquina BLDC normalmente possui três sensores de efeito hall, os quais podem ser dispostos de maneiras diferentes, porém operando da mesma maneira em todos os casos.

O funcionamento do sensor de efeito hall em um motor BLDC é dado da seguinte maneira: quando o sensor detecta um polo magnético ele envia um sinal, então, por possuir três sensores, sempre serão gerados três sinais. Esses sinais, quando analisados juntos, fornecem a posição do rotor. Com a posição do rotor determinada o acionamento da máquina fica facilitado.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA E PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

Neste capítulo, após a modelagem matemática do motor BLDC, estudaremos o modo de operação *six-step* e faremos a validação da mesma através de uma simulação.

3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DO BLDC

Como visto em (VIEIRO, 2013) a modelagem matemática do motor tem como objetivo obter o comportamento das grandezas internas do motor. O modelo matemático que vai ser desenvolvido nesse capítulo emprega a densidade de fluxo magnético para determinar as equações diferenciais que regem o comportamento do motor. (BARATIERI, 2011)

Como visto em (BARATIERI, 2011), o modelo matemático do BLDC começa com o fluxo magnético que é dado por:

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & M & M \\ M & L_b & M \\ M & M & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ar}(\theta_r) \\ \lambda_{br}(\theta_r) \\ \lambda_{cr}(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Tendo as resistências dos enrolamentos do estator como R_a , R_b e R_c e as tensões de fase como V_a , V_b , V_c , o modelo elétrico do BLDC pode ser representado por:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Ou ainda, por:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & M & M \\ M & L_b & M \\ M & M & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a(\theta_r) \\ e_b(\theta_r) \\ e_c(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (3)$$

O conjugado eletromagnético fica expresso por:

$$T_e = \tau_{ra}(\theta_r, i_a) + \tau_{rb}(\theta_r, i_b) + \tau_{rc}(\theta_r, i_c) \quad (4)$$

ou,

$$T_e = \frac{1}{\omega_r} [e_a(\theta_r i_a) + e_b(\theta_r i_b) + e_c(\theta_r i_c)] \quad (5)$$

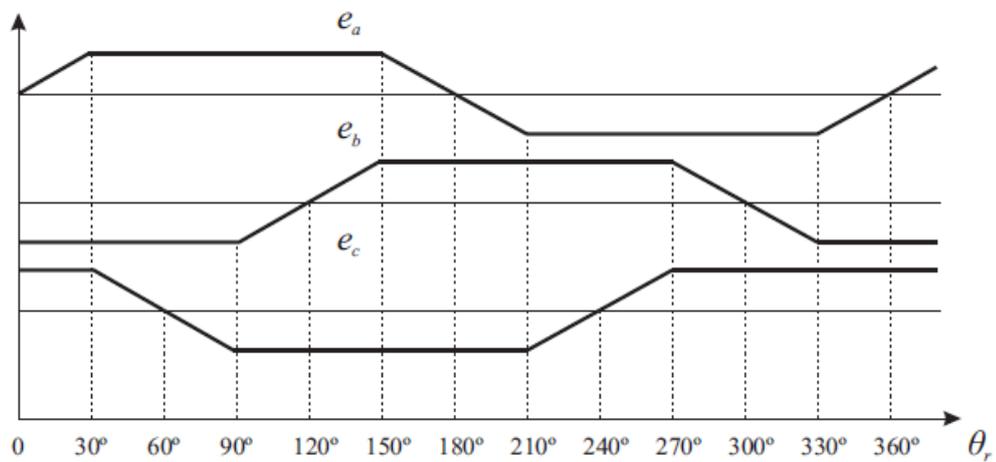
O modelo mecânico pode ser dado por:

$$J \frac{d}{dt} \omega_r = T_e - T_c - B \omega_r, \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \quad (7)$$

A Figura 9 mostra as forças contra eletromotrizes das fases do motor BLDC, dependendo da posição angular do rotor (BARATIERI, 2011).

Figura 9 - Forças contra eletromotrizes do BLDC

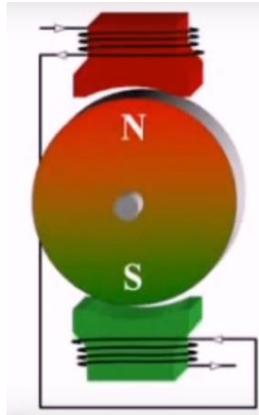


Fonte – (BARATIERI, 2011)

3.2 PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

O modo mais simples para entendimento do funcionamento do motor BLDC é dado por uma análise com somente uma fase, onde analisamos o torque gerado pelo motor. Na Figura 10 podemos ver como é dada a disposição do motor quando o mesmo é acionado por somente uma fase.

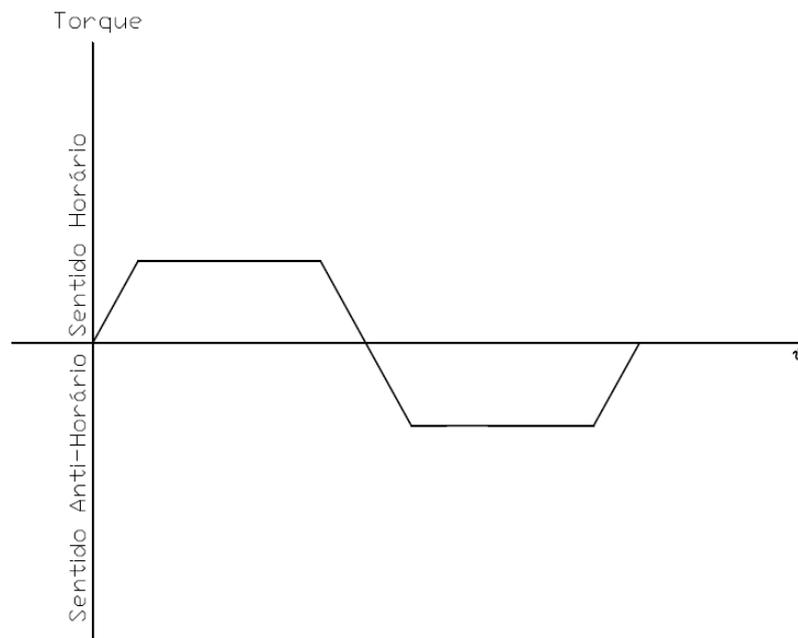
Figura 10 - BLDC com somente uma fase



Fonte – Digital Pimple

Nesse modo de acionamento, quando forçamos o motor a girar para um lado e finalizar a volta completamente, é possível traçar uma curva típica do torque do motor que é dada pela Figura 11, onde o eixo y representa o torque e o eixo x representa a posição do rotor.

Figura 11 - Curva de torque do BLDC com somente uma fase

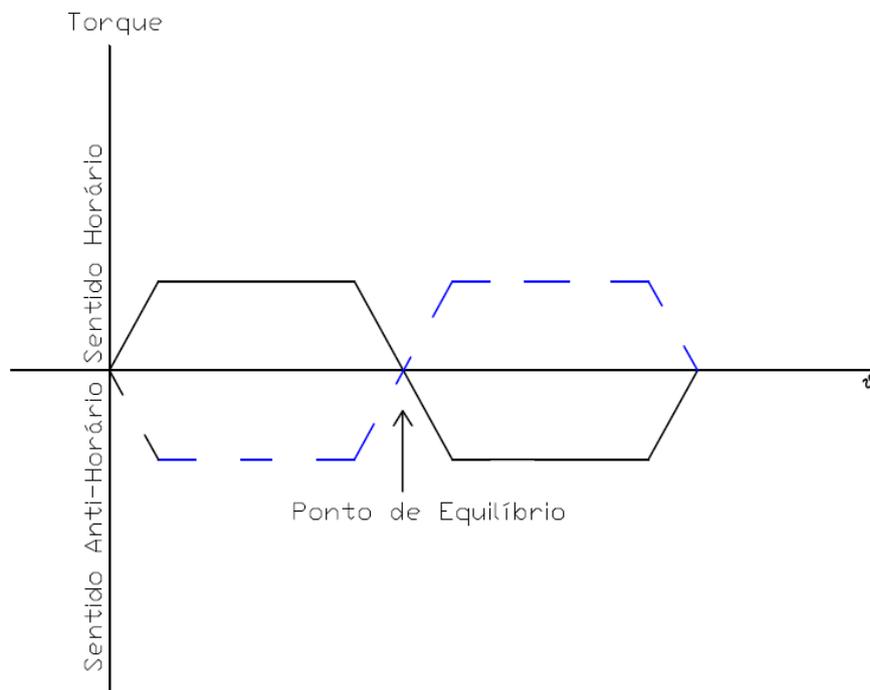


Fonte – Autoria Própria

O ponto de equilíbrio do motor é onde o torque é zero. Com o motor parado nesse ponto surge o questionamento de como fazer o motor se mover para voltar a produzir algum torque, e a resposta é: mudando a polaridade da corrente. Mudando a polaridade da corrente das bobinas mudaremos os polos magnéticos de lugar, fazendo assim com que o motor se mova.

Porém, com essa mudança na polaridade da corrente não conseguimos determinar em que sentido o motor vai girar, no sentido horário ou anti-horário. Este problema pode ser visualizado melhor na Figura 12.

Figura 12 - Curva de Torque do BLDC com somente uma fase

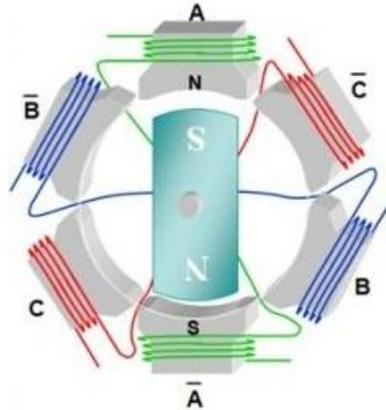


Fonte – Autoria Própria

Analisando a Figura 12 surge a dúvida de como se fazer para que o motor gere torque positivo, e assim se possibilite que continue girando no sentido desejado. A resposta é simples, adicionando mais fases ao motor.

De tal modo, adicionaremos mais duas fases ao motor, totalizando três fases. Operaremos o motor no modo mais básico de acionamento, onde cada fase é acionada uma vez, gerando assim um norte de um lado da fase e um sul do outro lado. Quando o motor tentar se alinhar com a fase acionada, esta será desligada e em seguida a próxima será energizada. Esse processo é chamado de comutação.

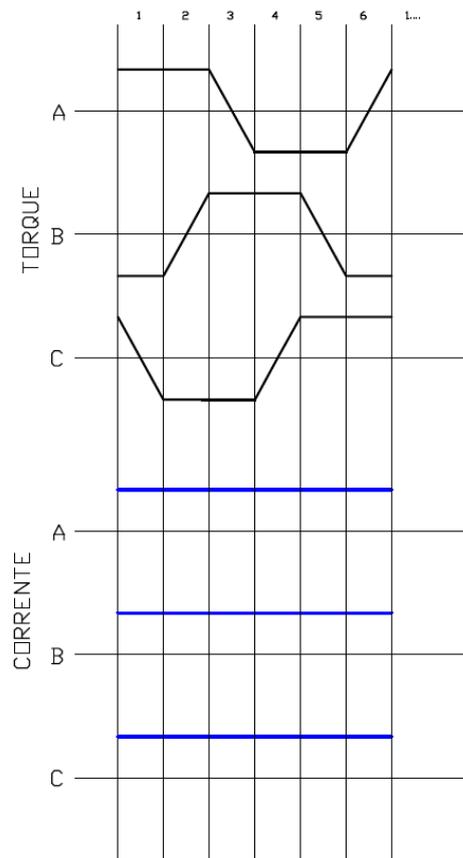
Figura 13 - Acionamento fase por fase do BLDC



Fonte – Electrical Technology

A Figura 13 mostra o motor com as duas fases já adicionadas, e na Figura 14 podemos ver o torque gerado pelo motor quando o forçamos a girar com todas as fases sendo alimentadas com corrente positiva.

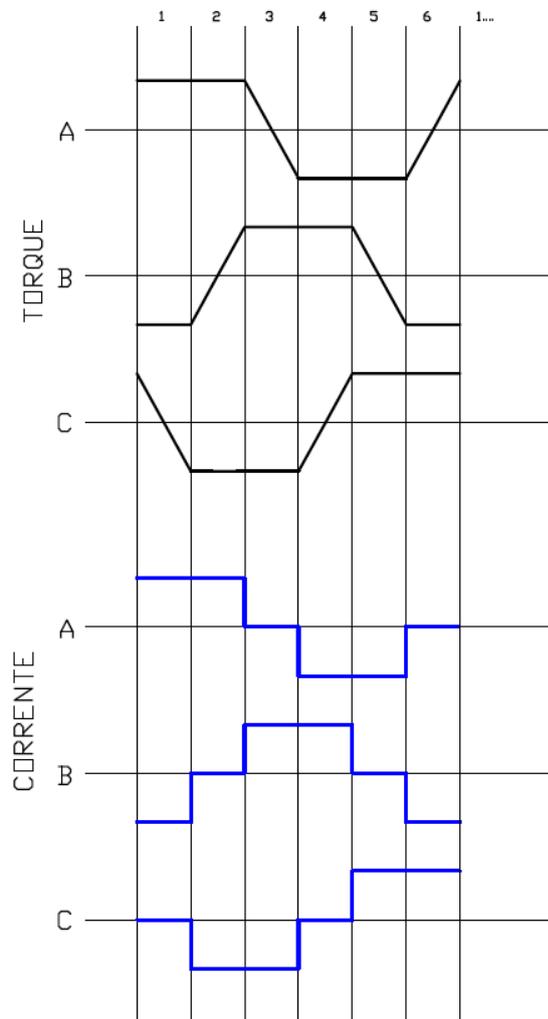
Figura 14 - Análise inicial de torque e correntes



Fonte – Autoria Própria

Analisando o acionamento fase a fase do motor BLDC, percebemos que existe um padrão na corrente de tal modo que podemos deixar o processo de comutação mais efetivo. Se analisarmos com atenção o comportamento do motor quando o forçamos a girar para um lado com todas as bobinas energizadas com corrente positiva, percebemos que podemos inverter a corrente onde o torque gerado é negativo, com o intuito de rebatê-lo para cima, tornando-o positivo. Esta inversão de correntes resulta na figura 15.

Figura 15 - Correntes de torque negativo rebatidas

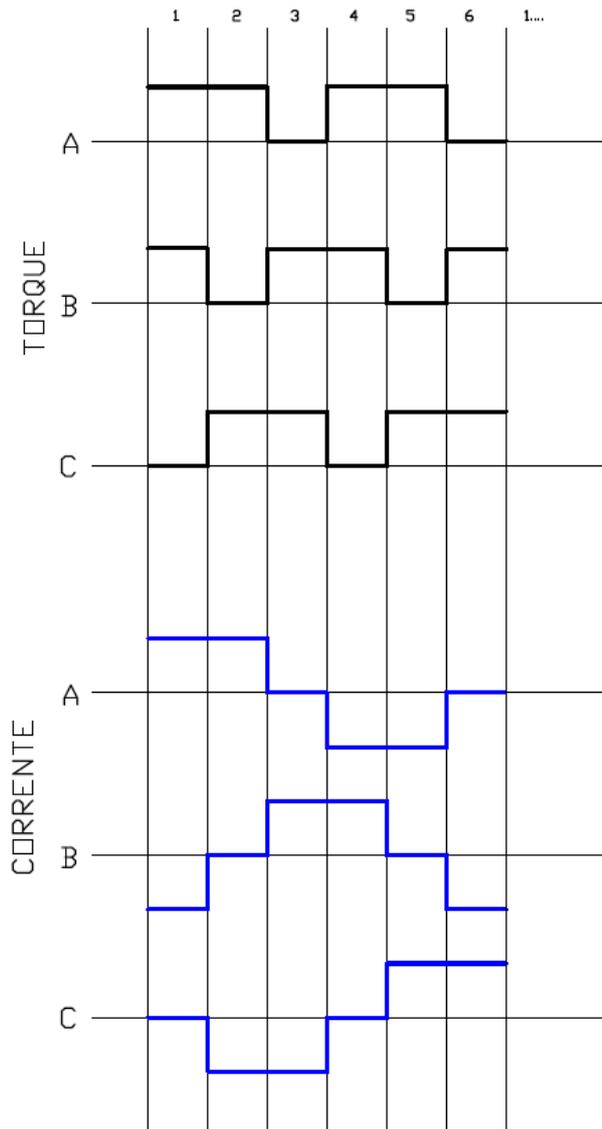


Fonte – Autoria Própria

A partir desta análise, cria-se uma regra de acionamento para o motor, quando a corrente gerar um torque positivo ela será mantida, quando a corrente gerar um torque negativo será invertida e quando o torque estiver em uma transição de negativo para positivo, ou de positivo para negativo, deixaremos de injetar corrente. Aumentando assim a

contribuição de torque que antes era somente dada por uma fase por comutação, para a soma do torque de duas fases por comutação. O comportamento final dos torques e das correntes pode ser visualizado na Figura 16.

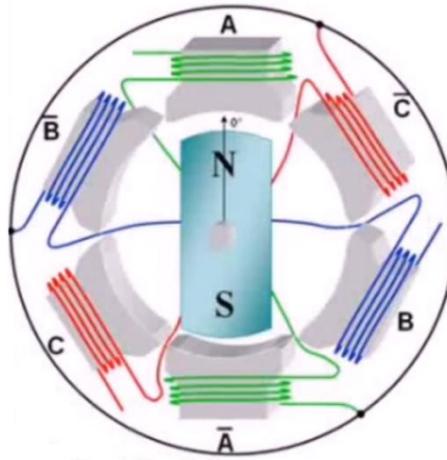
Figura 16 - Torque e correntes finais



Fonte – Autoria Própria

Essa análise ainda mostra que em toda comutação temos uma fase com corrente positiva, uma com corrente negativa e outra em aberto. Com essa informação, podemos unir as três fases criando assim um ponto neutro. A Figura 17 mostra a união das fases do motor.

Figura 17 - Motor BLDC com a união das fases

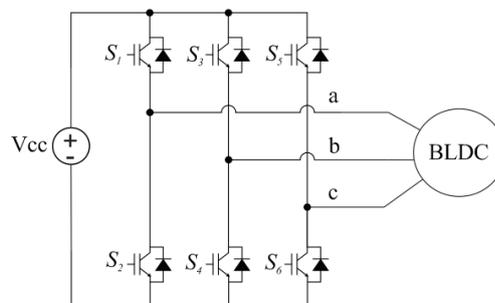


Fonte – Electrical Technology

Esse modo de acionamento é conhecido como *six-step* e é o modo mais simples para acionamento de motores BLDC. Tal acionamento pode ser feito tanto com ou sem o uso de sensores de efeito hall, porém, quando não utilizados, deve se obter outra forma de detectar a posição do rotor.

Após essa análise, percebemos que precisamos de um modo de fazer a comutação do motor BLDC com eficácia e velocidade. A topologia comumente utilizada para a comutação do motor BLDC é dada pelo acionamento das fases através de Transistores Bipolares de Porta Isolada (IGBTs). Essa topologia pode ser vista na Figura 18 e usualmente é acompanhada de controladores os quais são responsáveis pela comutação.

Figura 18 - Topologia típica para acionamento do Motor BLDC

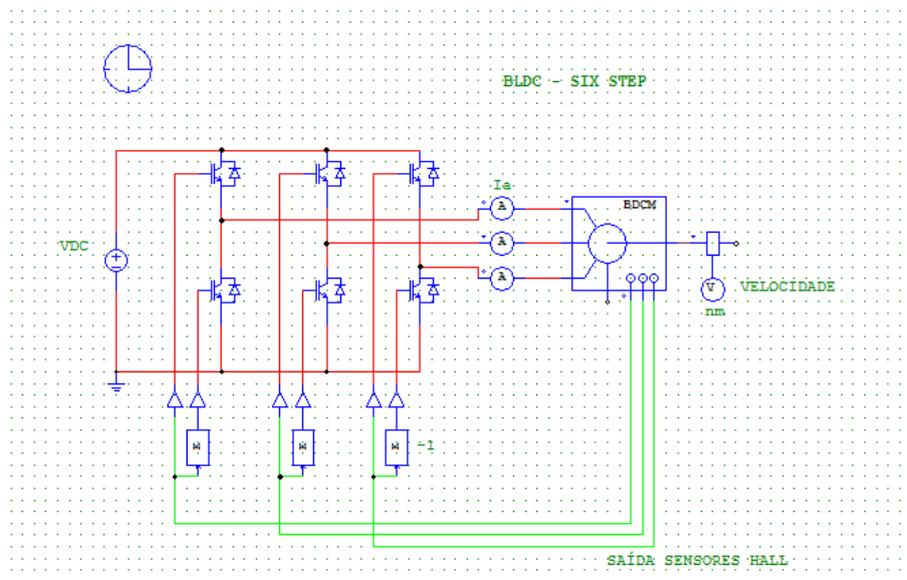


Fonte – Autoria Própria

3.3 SIMULAÇÃO

Com a topologia de acionamento definida, foi feita a simulação de um motor BLDC no software PSIM, a fim de validar os dados apresentados anteriormente. A Figura 19 apresenta o circuito simulado.

Figura 19 - Circuito Simulado

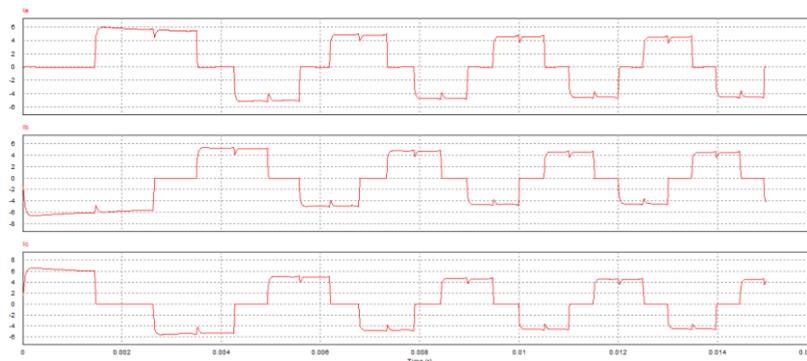


Fonte – Autoria Própria

Na parte inferior da Figura 19, encontra-se o circuito de acionamento do motor, onde as saídas dos sensores de efeito hall estão ligadas em um circuito lógico que realizará o acionamento *six-step*.

Na Figura 20 podemos visualizar as correntes adquiridas em cada fase na simulação:

Figura 20 - Correntes simuladas



Fonte – Autoria Própria

Na Figura 20, onde as fases estão dispostas na ordem de cima para baixo A,B,C, percebemos que as correntes I_a, I_b e I_c , batem perfeitamente com a imagem estudada anteriormente, validando assim o acionamento *six-step*, via análise e via simulação.

Com o acionamento poderemos partir para a definição do motor que será utilizado para o protótipo.

4 O PROTÓTIPO

Neste capítulo veremos os componentes utilizados para o protótipo da bicicleta e adentraremos com mais detalhes no motor que será utilizado para a montagem do protótipo.

Como visto no primeiro capítulo, o melhor tipo de motor para aplicações em velocidades constantes é o motor BLDC de rotor externo. Como o motor adquirido se trata de um motor vindo da China, que não apresenta *datasheet*, faremos nesse capítulo uma engenharia reversa do motor, a fim de definir o mesmo e realizar o controle posteriormente.

4.1 COMPONENTES DO PROTÓTIPO

Nesta seção, faremos uma breve demonstração de todos elementos que estão sendo usados no momento para a elaboração do protótipo.

4.1.1 MOTOR BLDC

O motor que será utilizado, é um motor BLDC 36V, 250W, que pode ser visualizado na Figura 21. Na subseção 4.2 ele será estudado mais detalhadamente.

Figura 21 - Motor BLDC fixo na roda da bicicleta



Fonte – Autoria Própria

4.1.2 PLACA DE POTÊNCIA

A placa de potência, a qual será ligada ao motor, é uma placa da ST Microelectronics, X-NUCLEO IHM08M1. A placa suporta os 36V para alimentação, conta com a saída das três fases e ainda conta com entrada para os sensores de efeito hall, caso sejam utilizados.

Figura 22 - Placa X-Nucleo IHM08M1 no laboratório



Fonte – Autoria Própria

4.1.3 PLACA DE CONTROLE

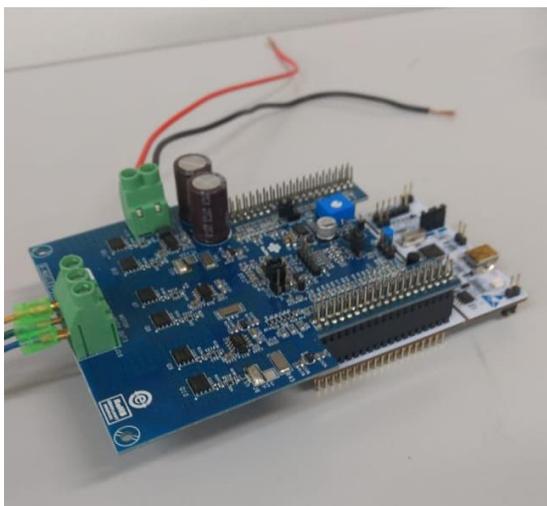
A placa de controle que será utilizada, assim como a placa de potência, é da ST Microelectronics e foi desenvolvida para o uso em conjunto com a placa de potência. Trata-se de uma tecnologia Arm, onde uma placa é acoplada em cima da outra e funcionam em conjunto.

Figura 23 - Placa Nucleo F401RE no laboratório



Fonte – Autoria Própria

Figura 24 - Placa X-NUCLEO IHM08M1e placa F401RE montadas juntas



Fonte – Autoria Própria

4.1.4 ALIMENTAÇÃO DO MOTOR

A alimentação do motor será feita primeiramente através do uso de uma fonte de alimentação controlada do Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), a PS4100. Um estudo já foi feito para a utilização de baterias e um carregador para as mesmas em outro trabalho, o qual será utilizado mais adiante no desenvolvimento do protótipo.

Figura 25 - Fonte de alimentação



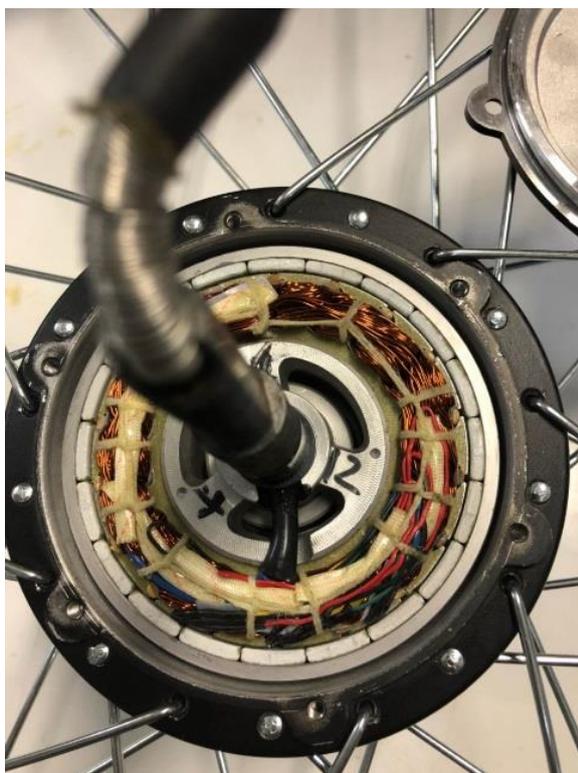
Fonte – Site GEPOC

4.2 ENGENHARIA REVERSA DO MOTOR

Como visto anteriormente, o motor adquirido para o protótipo consiste de um motor BLDC 36V,250W. Estas foram as únicas informações fornecidas pelo fabricante.

Com o intuito de buscar mais informações, realizou-se a abertura do motor. O motor aberto pode ser visualizado na Figura 26.

Figura 26 - Disposição interna do motor



Fonte – Autoria Própria.

A abertura do motor possibilitou a descoberta de alguns parâmetros, sendo eles: tipo de rotor, número de polos, número de espiras por fase e a presença de sensores de efeito hall.

O motor conta com seis bobinas por fase, totalizando 18 bobinas. Também conta com 20 polos, uma topologia um pouco diferente das tipicamente vistas, pois essa configuração faz com que a disposição das bobinas ao redor do motor seja dada de uma forma diferente das usuais.

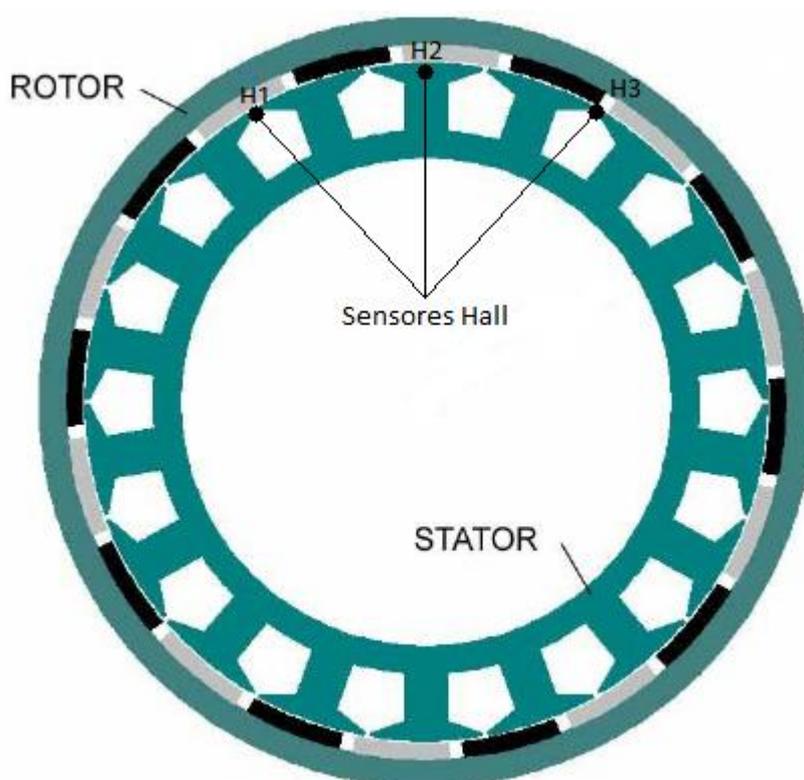
Como visto no capítulo 2, podemos usar todas as ranhuras que a máquina oferece ou deixar algumas em desuso. Para a aplicação em 20 polos e 18 bobinas temos duas disposições

diferentes que são comumente utilizadas, uma com ranhuras em desuso e outra utilizando todas as ranhuras.

Com a abertura do motor percebemos que todas as ranhuras são utilizadas, e com o auxílio do trabalho de (ISHAK; ZHU; HOWE, 2006), o qual mostra quais os arranjos de fases que podem ser utilizados conforme o número de espiras por fases e o número de polos, temos que a disposição de fases é dada por três bobinas de cada fase lado a lado, onde a central é dada sem inversão de corrente e as laterais são enroladas para receber corrente invertida, tal disposição pode ser dada como aAacCcbBbaAacCcbBb, .

O motor também conta com 3 sensores hall. Os sensores usualmente estão separados em 120 graus entre si, porém como podemos visualizar na Figura 27, no motor utilizado, a distância desses sensores é de uma ranhura e meia de distância entre si, ou seja, 30° de defasagem entre os sensores.

Figura 27 - Disposição dos sensores hall

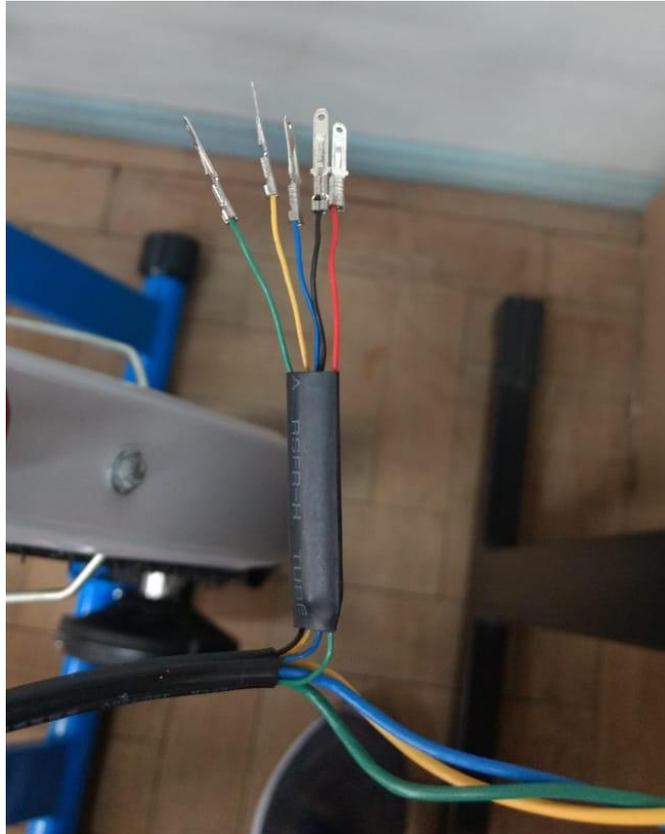


Fonte – Autoria Própria.

Por não ser o modo de espaçamento usual, esse modo de obriga o sensor do meio a ser posicionado invertido, ou seja, se o sensor estiver com um norte em cima, ele indicará na verdade um sul. De modo que o acionamento do motor funcione sem nenhuma falha.

Na figura abaixo podemos ver as saídas dos 3 sensores de efeito hall, que são os fios verde, amarelo e azul enquanto os fios preto e vermelho são a alimentação dos mesmos.

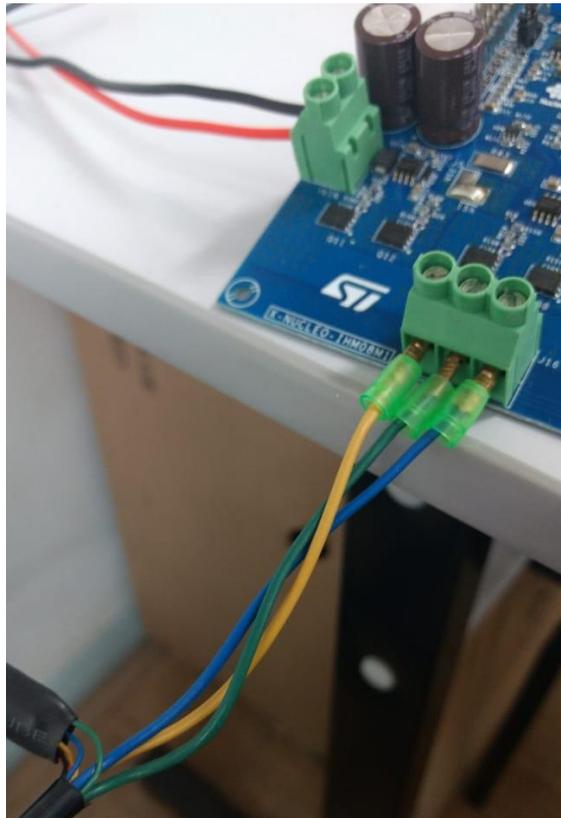
Figura 28 - Fios de acionamento do sensor de efeito hall



Fonte – Autoria Própria

Após coletarmos as informações com o motor aberto, executamos o fechamento e partimos para a definição das fases, pois as mesmas se encontravam sem identificação. Para a identificação delas, foi feito o acionamento de duas fases por vez a fim de rotacionar o motor no mesmo sentido.

Figura 29 - Fases montadas na placa de potência, pós identificação



Fonte – Autoria Própria

Com isso, o motor encontra-se pronto para realizar o acionamento *six-step*.

Figura 30 - Protótipo montado no GEPOC



Fonte – Autoria Própria

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta o estudo feito para a construção do protótipo de uma bicicleta elétrica através do uso de um motor BLDC.

Foram estudados os requisitos segundo as normas do CONTRAN para que uma bicicleta com motor fosse considerada bicicleta elétrica. Também foi visto como são as bicicletas elétricas ao redor do mundo

Ao passar dos capítulos podemos entender as características construtivas de motores BLDC, tais como tipos de rotor, estator, número de fases, número de polos, disposição das fases nas ranhuras, sensores de efeito hall e também o porquê do motor variar em tantos aspectos de projeto.

Foi demonstrado o equacionamento matemático do motor e a força contra eletromotriz gerada pelo mesmo, onde foi possível visualizar o comportamento interno do motor quando está girando.

Compreendemos também, o porquê de um motor BLDC não poder ser acionado apenas por uma fase. Logo após adicionamos mais duas fases ao sistema para dar início a análise do acionamento *six-step*. Durante a análise do acionamento foi apresentada a saída de torque do motor com o intuito de fornecer mais clareza ao modo de acionamento estudado. Em conjunto do estudo do *six-step* foi introduzido o conceito de comutação, a qual se dá quando realizamos o acionamento das fases de maneira lógica a fim de fazer o motor girar.

Para o motor estudado, 36V, 250W, foi definido, através da engenharia reversa, o tipo do rotor, o número de polos e o número de bobinas, a disposição dos sensores de efeito hall e também foi validado o acionamento *six-step*, através do uso das placas de controle e potência e da fonte de alimentação para as 18 bobinas e 20 polos em conjunto com o afastamento de 1 polo e meio dos sensores de efeito hall, a qual é a configuração do motor

Ao final do trabalho, com a engenharia reversa do motor efetuada, conseguimos definir parâmetros faltantes para poder realizar o acionamento do motor, o qual agora se encontra pronto para testes em bancada.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar o controle Six-Step junto as placas de comando e força do motor.
- Realizar o controle Sensorless do Motor BLDC
- Realizar uma análise de desempenho da bicicleta
- Realizar uma estimativa de custos quanto aos materiais utilizados e quanto a possíveis materiais

REFERÊNCIAS

BARATIERI, C. L. Controle de Velocidade Sensorless de Motores Brushless DC Submetidos a Variações Periódicas de Carga. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, 2011

CONTRAN. Resolução Nº 465, de 26 de novembro de 2013.

ELECTRICAL TECHNOLOGY, Brushless DC Motor: Construction, Working Principle & Applications, Acesso: 2018-07-15, <https://www.electricaltechnology.org/2016/05/bldc-brushless-dc-motor-construction-working-principle.html>

G1, Frota de carros e motos no país, Acesso: 2018-04-08, <http://g1.globo.com/carros/frota-carros-motos-201>

HENDERSHOT, R. J.; MILLER, T. J. E. Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. Oxford University Press, 582p, 1994.

ISHAK, D.; ZHU, Z. Q.; HOWE, D. Comparison of PM Brushless Motors, Having Either All Teeth or Alternate Teeth Wound. IEEE Transactions on Energy Conversion, [S.1], v.21, n.1, p.95-103, Mar, 2006.

JORNAL DO COMMERCCIO, Caronas despertam projetos e negócios em universidades pernambucanas, Acesso: 2018-04-08, <http://jconline.ne10.uol.com.br/canal/cidades/jc-transito/noticia/2016/12/30/caronas-despertam-projetos-e-negocios-em-universidades-pernambucanas-265275.php>

MOROCHIN, C. W.; OMAN, H. Electric Bicycles A Guide to Design and Use. IEEE Press, 190p, 2006.

MUETZE, A; TAN, Y. Electric Bicycles a performance evaluation. IEEE Industry Applications Magazine, [S.1], n.1, p.12-21, Aug, 2007.

The Green Post, Noruega construirá US\$ 1 bilhão em ciclovias – e pretende cortar emissões pela metade, Acesso: 2018-04-18, <http://thegreenestpost.com/noruega-construira-u-1-bilhao-de-ciclovias-e-pretende-cortar-emissoes-pela-metade/>

SCALCON, P. F. Estudo e Desenvolvimento de Estratégias de Controle de Velocidade Aplicados à Máquina BLDC Hexafásica. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Maria, 2016

SAUNDERS, R. M.; WEAKLEY, R. H. Design of permanent-magnet alternators. Electrical Engineering, [S.1], v.70, n.11, p.991-991, Nov 1951.

VIEIRO, J. S. Modelagem Matemática e Controle do Motor Brushless DC. Trabalho de Conclusão de Curso – Unipampa, 2013

WILSON, T. G.; TRICKEY, P. H. D-C machine with solid-state commutation. Electrical Engineering, [S.1], v.81, n11, p.879-884, Nov 1962.