



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
TELECOMUNICAÇÕES

**RAFHAEL DE SOUZA LIMA**

**Projeto de um Motor de Relutância Variável de  
Fluxo Axial para a Tração de uma Cadeira de  
Rodas**

NITERÓI

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
TELECOMUNICAÇÕES

**RAFHAEL DE SOUZA LIMA**

**Projeto de um Motor de Relutância Variável de Fluxo Axial  
para a Tração de uma Cadeira de Rodas**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Máquinas, Equipamentos e Aplicação de Novos Materiais.

Orientador:

José Andrés Santisteban Larrea

NITERÓI

2021

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

L732p Lima, Rafael de Souza  
Projeto de um Motor de Relutância Variável de Fluxo Axial  
para a Tração de uma Cadeira de Rodas / Rafael de Souza  
Lima ; José Andres Santisteban Larrea, orientador. Niterói,  
2021.  
86 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Niterói, 2021.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2021.m.15344691769>

1. Máquina elétrica. 2. Produção intelectual. I. Larrea,  
José Andres Santisteban, orientador. II. Universidade Federal  
Fluminense. Escola de Engenharia. III. Título.

CDD -

RAFHAEL DE SOUZA LIMA

PROJETO DE UM MOTOR DE RELUTÂNCIA DE FLUXO AXIAL PARA A  
TRAÇÃO DE UMA CADEIRA DE RODAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.  
Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.


Aprovado em 26 de agosto de 2021.

BANCA EXAMINADORA



---

Prof. Dr. José Andrés Santisteban Larrea - Orientador  
Universidade Federal Fluminense - UFF



---

Prof. Dr. Felipe Sass  
Universidade Federal Fluminense - UFF



---

Prof. Dr. Andrés Ortiz Salazar  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Niterói  
2021

*Dedico este trabalho ao meu pai, Roberto de Lima, que é o “não engenheiro” mais engenhoso que conheço.*

# Agradecimentos

Agradeço aos meus pais por todo o suporte dado. À minha mãe, Rita de Cássia, por me proporcionar todo o afeto e carinho de qual sempre precisei e por confiar em meu potencial. Ao meu pai, Roberto de Lima, por ter me auxiliado quando já não mais acreditava ser possível. Provamos que era possível e fizemos. Obrigado por tudo.

Agradeço ao meu orientador, José Santisteban, por estar sempre disponível e solícito, mesmo nas situações mais adversas. Suas ideias e ensinamentos foram essenciais para a construção dessa dissertação e tenho a certeza de que esse trabalho me engrandeceu como engenheiro eletricitista e como cientista.

Agradeço também aos meus amigos, pois todos vocês contribuíram de alguma forma para me manter alegre e leve nessa caminhada. Principalmente, agradeço às minhas amigas, Tâmara Isaac e Lisiane Sousa, que ouviram demasiadas reclamações e celebrações referentes ao progresso dessa dissertação.

Agradeço ao meu namorado, Matheus Barbosa, por ter sido compreensivo e entender quando precisei ficar ausente para finalizar este trabalho. Além de celebrar comigo todas as vitórias e superar todas as derrotas.

Por fim, agradeço ao divino, por me proporcionar situações favoráveis e privilégios, que me permitiram completar essa fase com êxito.

# Resumo

Diversos produtos, equipamentos e soluções têm sido desenvolvidos com o objetivo de melhorar o bem-estar e a qualidade de vida das pessoas com deficiência. Nesse sentido, a cadeira de rodas motorizada é um produto que facilita a locomoção e a autonomia de certas pessoas com deficiência motora. Estes veículos se caracterizam pela baixa velocidade. Entretanto, apenas uma pequena parcela da população que a necessita é alcançada, principalmente pelo alto custo. Desta forma, nesta dissertação, buscou-se uma alternativa de tração para uma cadeira de rodas que permita maior acessibilidade econômica. Assim, através da análise computacional por elementos finitos, foi avaliada a possibilidade do uso de um motor de relutância variável com fluxo magnético axial (AFSRM), montado na própria roda do veículo, estratégia conhecida como in-wheel. Diferentes estruturas eletromagnéticas foram simuladas a fim de verificar as capacidades de torque. Como resultado, foi projetado um modelo particular de AFSRM localizado na roda, onde o estator é composto por 24 polos e o rotor por 16 polos. É previsto que o estator seja acionado por uma corrente trifásica pulsante para obter o melhor torque médio possível dentro das condições impostas. Os resultados das simulações confirmaram a potencialidade desta abordagem. Por fim, algumas peças eletromecânicas foram construídas nos laboratórios da universidade, mostrando a factibilidade de construir um protótipo.

**Palavras-chaves:** Motor de Relutância Variável, Simulação pelo Método dos Elementos Finitos, Tecnologia Assistida.

# Abstract

Several products, equipment and solutions have been developed in order to improve the well-being and quality of life of impaired people. Dealing with low speed vehicles, the motorized wheelchair is a product that facilitates the locomotion and autonomy of certain people with motor disability. However, only a small portion of the population that needs it is reached, mainly because of its high cost. In this work, it was looked at for a more affordable alternative of traction for a wheelchair. The possibility to use the axial flux switched reluctance motor (AFSRM) as an in-wheel type has been evaluated through finite element analysis, where different different electromagnetic structures were simulated in order to verify the torque capabilities. As result, a particular model of AFSRM located in the wheel has been projected, where the stator has 24 poles and the rotor has 16 poles. The stator is suitably activated by a 3-phase current in order to obtain the best average torque possible within imposed conditions. Finally, some mechanical parts were manufactured at the university laboratories, confirming the feasibility to construct a real prototype.

**Keywords:** Switched Reluctance Motor, Finite Element Method Simulation, Assistive Technology.



# Lista de Figuras

FIGURA 1 – FUNCIONAMENTO DE UM MRV (KRISHNAN, 2001).	6
FIGURA 2 – MRV REGULAR QUANTO À SIMETRIA DOS POLO (ADAPTADO DE SAKURAI, 2001).	9
FIGURA 3 – MRV IRREGULAR QUANTO À SIMETRIA DOS POLOS (SAKURAI, 2001).	9
FIGURA 4 – MRV COM ROTOR DE POLOS SALIENTES (FITZGERALD, 2006).	10
FIGURA 5 – MRV DE POLOS DUPLAMENTE-SALIENTE (FITZGERALD, 2006).	11
FIGURA 6 – MRV LINEAR DE FLUXO MAGNÉTICO LONGITUDINAL (ADAPTADO DE SALO, 1999).	12
FIGURA 7 – MRV LINEAR DE FLUXO MAGNÉTICO TRANSVERSAL (ADAPTADO DE SALO, 1999).	12
FIGURA 8 – MRV DE FLUXO RADIAL DE CAMINHO LONGO DE FLUXO (VIJAYRAGHAVAN, 2001).	14
FIGURA 9 – MRV DE FLUXO RADIAL DE CAMINHO CURTO DE FLUXO (ADAPTADO DE KRISHNAN, 2001).	15
FIGURA 10 – MRV DE FLUXO AXIAL COM DOIS ESTADORES (ADAPTADO DE SON, 2017).	16
FIGURA 11 – SEÇÃO LONGITUDINAL DE UM MRV COM 2 ESTADORES COM POLOS EM FORMATO DE “C” (ADAPTADO DE KRISHNAN, 2001).	17
FIGURA 12 – MRV DE FLUXO AXIAL COM APENAS UM ESTATOR (SANCHES, 2015).	18
FIGURA 13 – MRV <i>IN-WHEEL</i> DE FLUXO RADIAL (ADAPTADO DE GOTO ET AL, 2005).	19
FIGURA 14 – MRV <i>IN-WHEEL</i> DE FLUXO AXIAL USADO NA PROPULSÃO VEICULAR (GOTO, 2015).	19
FIGURA 15 – OPERAÇÃO DE UM MRV COM PULSO ÚNICO (ADAPTADO DE HENRIQUES, 2004).	21
FIGURA 16 – OPERAÇÃO BIPOLAR DE UM PWM EM UM MRV (ADAPTADO DE HENRIQUES, 2004).	22
FIGURA 17 – ACIONAMENTO POR CONTROLE DE CORRENTE DE UM MRV, OPERAÇÃO BIPOLAR (ADAPTADO DE HENRIQUES, 2004).	23
FIGURA 18 – PONTE CONVERSORA ASSIMÉTRICA (ADAPTADO DE HENRIQUES, 2004).	25
FIGURA 19 – FORMAS DE ONDA ESPERADAS PARA A PONTE CONVERSORA ASSIMÉTRICA (KRISHNAN, 2001).	26
FIGURA 20 – CONVERSOR DE MILLER (ADAPTADO DE HENRIQUES, 2004).	27
FIGURA 21 – CONVERSOR C-DUMP (ADAPTADO DE KRISHNAN, 2001).	28
FIGURA 22 – FORÇA E TORQUE SOBRE A RODA DA CADEIRA DE RODAS (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	30
FIGURA 23 – FORÇAS ATUANTES NO SISTEMA AO LONGO DO PLANO INCLINADO (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	32
FIGURA 24 – NÚCLEO DO ESTATOR EM FORMATO DE U (LIMA, 2018).	36
FIGURA 25 – NÚCLEO DO ESTATOR EM FORMATO DE U ALONGADO (LIMA, 2018).	37
FIGURA 26 – NÚCLEO DO ESTATOR EM FORMATO DE C (LIMA, 2018).	37
FIGURA 27 – VISTA EM PERSPECTIVA DO NÚCLEO DO ESTATOR NA SIMULAÇÃO FEM (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	38
FIGURA 28 – VISTA FRONTAL DO NÚCLEO DO ESTATOR NA SIMULAÇÃO FEM (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	38
FIGURA 29 – VISTA EM PERSPECTIVA DO NÚCLEO DO ROTOR NA SIMULAÇÃO FEM (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	39
FIGURA 30 – VISTA FRONTAL DO NÚCLEO DO ROTOR NA SIMULAÇÃO FEM (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	39
FIGURA 31 – NÚCLEO DO ESTATOR, NÚCLEO DO ROTOR E BOBINA NA SIMULAÇÃO FEM (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	39
FIGURA 32 – ESTRUTURA COMPLETA DO MRV DESENHADA NO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	41
FIGURA 33 - INDUTÂNCIA PRÓPRIA DE UMA BOBINA DA FASE A (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	42
FIGURA 34 - INDUTÂNCIA PRÓPRIA DE UMA BOBINA DA FASE B (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	42
FIGURA 35 - INDUTÂNCIA PRÓPRIA DE UMA BOBINA DA FASE C (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	42
FIGURA 36 - INDUTÂNCIA PRÓPRIA DO CONJUNTO DE 8 BOBINAS QUE COMPÕEM CADA FASE DURANTE SEU ACIONAMENTO (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	43
FIGURA 37 - CURVA DE TORQUE EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO ANGULAR PARA O MRV SIMULADO (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	44
FIGURA 38 – CURVA DE INDUTÂNCIA OBTIDA A PARTIR DA PARAMETRIZAÇÃO DA FERRAMENTA CURVEFITTING (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	46
FIGURA 39 – CURVA DA DERIVADA DA INDUTÂNCIA OBTIDA A PARTIR DA DERIVADA DA FUNÇÃO PARAMETRIZADA DA FERRAMENTA CURVE FITTING (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	46
FIGURA 40 – ESQUEMA DE CONTROLE SIMULADO (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	47
FIGURA 41 – BLOCO SELEÇÃO DE FASE PARA CORRENTE (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	47
FIGURA 42 – CONFIGURAÇÕES DO PID UTILIZADAS NO SIMULINK (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	48
FIGURA 43 – CONVERSOR COMPOSTO DE PONTES CONVERSoras ASSIMÉTRICAS (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	49
FIGURA 44 – PONTE CONVERSORA ASSIMÉTRICA DA FASE A (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	50
FIGURA 45 – ESQUEMA DO MODELO ELÉTRICO DO MRV (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	50
FIGURA 46 – ESQUEMA DO MODELO MECÂNICO DO MRV (ELABORAÇÃO PRÓPRIA).	52

FIGURA 47 – SINAL DE REFERÊNCIA PARA A VELOCIDADE ANGULAR NA MOVIMENTAÇÃO PARTINDO DO REPOUSO. ESCALAS: VER:0,5 RAD/S/DIV; HOR:5 S/DIV (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	54
FIGURA 48 – VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO MOTOR NA MOVIMENTAÇÃO PARTINDO DO REPOUSO. ESCALAS: VER:0,5 RAD/S/DIV; HOR: 5 S/DIV (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	54
FIGURA 49 – SINAL DE ERRO DA VELOCIDADE ANGULAR ENTREGUE AO PID NA MOVIMENTAÇÃO PARTINDO DO REPOUSO. ESCALAS: VER: 0,01 RAD/S; HOR: 5 S/DIV (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	55
FIGURA 50 – TORQUE ELETROMAGNÉTICO GERADO NA MOVIMENTAÇÃO PARTINDO DO REPOUSO. ESCALAS: VER: 5 NM/DIV; HOR: 5 S/DIV (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	56
FIGURA 51 – CORRENTES DE FASE NA MOVIMENTAÇÃO PARTINDO DO REPOUSO. ESCALAS: VER: 0,5 A/DIV; HOR: 5 S/DIV (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	56
FIGURA 52 – SINAL DE REFERÊNCIA PARA A VELOCIDADE ANGULAR NA MOVIMENTAÇÃO ACELERADA EM PLANO RETO. ESCALAS: VER:0,5 RAD/S/DIV; HOR:5 S/DIV (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	57
FIGURA 53 – VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO MOTOR NA MOVIMENTAÇÃO ACELERADA EM PLANO RETO. ESCALAS: VER: 0,5 RAD/S/DIV; HOR:5 S/DIV (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	58
FIGURA 54 – SINAL DE ERRO DA VELOCIDADE ANGULAR ENTREGUE AO PID NA MOVIMENTAÇÃO ACELERADA EM PLANO RETO. ESCALAS: VER:0,02 RAD/S/DIV; HOR: 5 S/DIV (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	58
FIGURA 55 – TORQUE ELETROMAGNÉTICO GERADO NA MOVIMENTAÇÃO ACELERADA EM PLANO RETO. ESCALAS: VER: 5 NM/DIV; HOR: 5 S/DIV (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	59
FIGURA 56 – TORQUE ELETROMAGNÉTICO GERADO, ONDE EM A TÊM-SE O TORQUE ENTRE 4,0 S E 4,5 S E EM B TÊM-SE O TORQUE ENTRE 12,0 S E 12,5 S. A LINHA AZUL ESCURA INDICA O VALOR ZERO PARA O TORQUE. ESCALAS: VER:5 NM/DIV; HOR: 0,05 S/DIV (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	59
FIGURA 57 – CORRENTES DE FASE NA MOVIMENTAÇÃO ACELERADA EM PLANO RETO. ESCALAS: VER:0,5 A/DIV; HOR: 5 S/DIV (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	60
FIGURA 58 – CORRENTES DE FASE, ONDE EM A TÊM-SE OS VALORES PARA O TEMPO ENTRE 4,0 S E 4,5 S E EM B TÊM-SE OS VALORES ENTRE 12,0 S E 12,5 S. ESCALAS: VER:0,5 A/DIV; HOR: 0,05 S/DIV (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	60
FIGURA 59 – TORQUE DE CARGA REFERENTE À INCLINAÇÃO DA RAMP. ESCALAS: VER: 2 NM/DIV; HOR: 10 S/DIV (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	61
FIGURA 60 - VELOCIDADE DO MOTOR, EM RAD/S, NA MOVIMENTAÇÃO EM PLANO INCLINADO. ESCALAS: VER: 0,2 RAD/S/DIV; HOR: 10 S/DIV (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	62
FIGURA 61 - TORQUE ELETROMAGNÉTICO GERADO NA MOVIMENTAÇÃO EM PLANO INCLINADO. ESCALAS: VER: 5 NM/DIV; HOR: 10 S/DIV(ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	63
FIGURA 62 - CORRENTES DE FASE NA MOVIMENTAÇÃO EM PLANO INCLINADO. ESCALAS: VER: 0,5 A/DIV; HOR: 10 S/DIV (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	63
FIGURA 63 – ROTOR CONSTRUÍDO EM ARO 16 (ARO COMERCIAL) DESCARTADO (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	64
FIGURA 64 – PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA CAVIDADE DO ROTOR (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	65
FIGURA 65 – ROTOR CONSTRUÍDO PARA O PROTÓTIPO (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	65
FIGURA 66 – NÚCLEO DE ESTATOR CONSTRUÍDO E BOBINADO (ELABORAÇÃO PRÓPRIA). .....	66

# Lista de Tabelas

TABELA 1 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO FEM PARA O TORQUE GERADO E INDUTÂNCIA.....	44
---	----

# Lista de Abreviaturas e Siglas

Ae	Ampere-espira
FEM	<i>Finite Element Method</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MRC	Motor de Relutância Chaveada
MRV	Motor de Relutância Variável
PCD	Pessoa com Deficiência
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
TA	Tecnologia Assistida

# Sumário

<b>Capítulo 1 - Introdução</b> .....	1
1.1 Motivação .....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura do Trabalho .....	4
<b>Capítulo 2 - Motor de Relutância Variável</b> .....	5
2.1 Histórico.....	5
2.2 Características e Funcionamento .....	6
2.3 Classificações.....	8
2.3.1 Simetria dos Polos do Estator e Rotor.....	8
2.3.2 Saliência dos Polos.....	10
2.3.3 Tipo de Movimento.....	11
2.3.3.1 MRV Rotativo de Fluxo Radial .....	13
2.3.3.2 MRV Rotativo de Fluxo Axial.....	16
2.4 MRV do Tipo <i>In-Wheel</i> .....	18
2.5 Acionamento .....	20
2.6 Conversores de Potência .....	23
2.6.1 Ponte Conversora Assimétrica .....	25
2.6.2 Conversor de Miller .....	27
2.6.3 Conversor C-Dump .....	27
<b>Capítulo 3 - Projeto do MRV</b> .....	29
3.1 Especificações do Projeto .....	29
3.2 Modelagem Matemática .....	33
3.3 Análise por Elementos Finitos.....	35
3.3.1 Modelagem e Desenho .....	36
3.3.2 Indutância e Torque Simulados.....	41
3.4 Proposta de Controle.....	45
<b>Capítulo 4 - Resultados Simulados</b> .....	53
4.1 Movimento Partindo do Repouso .....	53
4.2 Movimento Acelerado em Plano Reto.....	57
4.3 Movimentação em Plano Inclinado .....	61
<b>Capítulo 5 - Fabricação do Protótipo</b> .....	64
<b>Capítulo 6 - Conclusões</b> .....	67

6.1	Trabalhos Futuros .....	68
<b>Bibliografia</b>		<b>69</b>
<b>Anexo A</b>	<b>– Artigo Produzido pelo Autor .....</b>	<b>74</b>
<b>Anexo B</b>	<b>– Diagrama Montado para a Simulação do Projeto de Controle .....</b>	<b>79</b>
<b>Anexo C</b>	<b>– Código utilizado na função SelectFase.....</b>	<b>81</b>
<b>Anexo D</b>	<b>– Código utilizado na função “Inverte_Corrente” .....</b>	<b>82</b>
<b>Anexo E</b>	<b>– Diagrama Utilizado para Simular o Modelo Elétrico e Mecânico do MRV83</b>	
<b>Anexo F</b>	<b>– Código utilizado para cálculo da corrente .....</b>	<b>85</b>
<b>Anexo G</b>	<b>– Código utilizado para cálculo do torque .....</b>	<b>86</b>

# Capítulo 1 - Introdução

Neste capítulo introdutório será inicialmente apresentada a motivação para a realização do trabalho, onde serão apresentados dados e informações a respeito das pessoas com deficiência e como este projeto visa auxiliar aquelas que necessitam de cadeiras de rodas motorizadas.

Também serão trazidos os objetivos, principais e secundários, e por fim, será apresentada a estrutura da mesma.

## 1.1 Motivação

De acordo com um estudo mundial da WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2011, as pessoas com deficiência (PCD) não têm acesso igualitário à assistência médica, educação e oportunidades de emprego. Além disso, não recebem os serviços de que necessitam relacionados à deficiência, e são excluídos de atividades cotidianas.

Uma forma de aumentar a autonomia e a participação social dessa parcela da população é através do desenvolvimento e disponibilização de produtos e recursos no âmbito da tecnologia assistida (TA), que é uma área do conhecimento, englobando diversos itens que objetivam promover a funcionalidade relacionada à atividade e participação social de PCDs (COMITÊ DE AJUDAS TÉCNICAS, 2009).

De acordo com o Censo Demográfico de 2010, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), cerca de 7% da população brasileira possui alguma dificuldade de locomoção, sendo 2,3% com deficiência motora severa (SECRETARIA DOS DIREITOS HUMANOS, 2012).

Uma parcela desse grupo de pessoas com dificuldade de locomoção necessita da utilização de cadeira de rodas para sua mobilidade. Para facilitar o uso e criar autonomia para os usuários das cadeiras de rodas, em especial àqueles com pouca mobilidade dos membros superiores, a solução proposta na área da TA é a utilização de cadeiras de rodas motorizadas.

Em uma pesquisa *online* de preços para cadeiras de rodas motorizadas, realizada pelo site *Google Shopping* no dia 08 de Abril de 2020, verificou-se o elevado preço desse equipamento, que pode variar entre R\$3.779,10 para um modelo mais simples do tipo *Scooter* até valores de R\$11.900,00 para modelos mais sofisticados.

Diversas soluções foram propostas na literatura para a diminuição do seu custo de fabricação, em especial com relação ao motor e ao seu acionamento e controle (AVUTU, 2016).

Avaliando uma solução alternativa dentre as apresentadas, percebe-se que o custo de fabricação de motores está altamente relacionado com o material utilizado na fabricação das suas peças. Nesse sentido, propostas que consideram o motor de relutância variável (MRV) são geralmente mais baratas, pois o custo de fabricação costuma ser menor do que o de outros tipos de motores (KUCUK, 2018).

Além disso, a fabricação dos ímãs permanentes depende da extração e mineração das terras-raras, que são os 15 lantanídeos da tabela periódica e outros dois elementos associados, o escândio e o ítrio. Cerca de 80% da produção destes materiais é feita por apenas uma nação, e esse quase monopólio ameaça os custos de fabricação de diversos equipamentos, entre eles máquinas à ímãs permanentes. Ademais, o processo de mineração e separação das terras-raras traz riscos para o meio ambiente e para a saúde dos seres humanos, uma vez que eles podem estar misturados com elementos radioativos, como o tório (LIY, 2019).

O MRV tem ganhado popularidade nos últimos anos por conta de sua simplicidade de construção, baixo custo e uso de conversores unipolares, além de produzir altos torques em baixas velocidades (ALRIFAI et al., 2008). No entanto, possui algumas desvantagens, tais como: necessidade de um sensor de posição para certas estratégias de controle; oscilação no conjugado magnético gerado pela máquina; alto nível de ruído sonoro quando comparado a outras máquinas de mesma classe de potência; e, além disto, sua modelagem matemática é complexa devido a não linearidade espacial e magnética (HENRIQUES, 2004). Como consequência, as equações dinâmicas do MRV são não-lineares e variantes no tempo (ALRIFAI et al., 2008).

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura acerca do MRV são referentes ao MRV de fluxo radial, onde a direção do fluxo magnético no entreferro da máquina ocorre na direção radial. Sendo assim, o estudo do MRV de fluxo axial, onde o fluxo ocorre na direção do eixo da máquina, ainda é escasso. Considerando sua estrutura, o MRV de fluxo axial possui um menor comprimento de eixo, sendo assim uma possível solução para aplicações onde essa dimensão é levada em consideração, tais como no caso de veículos elétricos.



Alguns estudos sobre a utilização do MRV de fluxo axial na tração veicular já foram realizados (MADHAVAN, 2010; MADHAVAN, 2012; KERMANIPOUR, 2015; GOTO, 2018).

Os estudos realizados por Madhavan, 2012, demonstram que o uso do MRV de fluxo axial na tração veicular possui uma atratividade competitiva com relação aos demais motores usados para essa aplicação. Também podem-se destacar os estudos de Kermanipour, 2015, onde uma modificação na geometria do motor de fluxo axial reduziu o *ripple* de torque, uma das principais desvantagens do MRV.

Ainda sobre a tração veicular, uma opção para o uso do MRV de fluxo axial está no seu acoplamento à roda do veículo, montando as partes móveis do motor (rotor) na própria roda. Essa forma de acoplamento é conhecida como *In-Wheel* (do inglês, “na roda”). Outros estudos foram realizados acerca dessa aplicação (MAKWANA, 2011; GOTO, 2015).

Sobre o estudo realizado por Goto, 2015, percebe-se um aumento significativo na densidade de torque gerado pela máquina após uma modificação na sua estrutura.

Nessa dissertação é proposto e estudado, a partir de simulações baseadas no método dos elementos finitos (*Finite Element Method* – FEM), um modelo de MRV de fluxo axial projetado para ser acoplado à roda (*In-Wheel*) de uma cadeira de rodas, contendo 24 polos de estator cujos enrolamentos são divididos em 3 fases acionadas por corrente e 16 polos de rotor, sendo, portanto um MRV de 24-16 polos. Algumas peças foram fabricadas para verificar a capacidade de construção no laboratório de usinagem da UFF. Também será mostrada a proposta de uma técnica de controle convencional a partir da sua modelagem matemática obtida com um software de simulação baseado no FEM.

## 1.2 Objetivos

Os principais objetivos dessa dissertação são:

- Projetar e analisar, a partir de simulações baseadas no FEM, um MRV de fluxo axial, acionado por 3 fases de corrente, do tipo *In-Wheel*, capaz de locomover uma cadeira de rodas e seu usuário.
- Propor uma técnica de controle para o MRV.

Outros objetivos são:

- Contribuir com os estudos acerca do MRV de fluxo axial ainda hoje considerados escassos.
- Contribuir com o estudo de uma possível solução para a diminuição de custos de fabricação de cadeiras de rodas motorizadas.
- Desenvolver e analisar um modelo matemático para o MRV de fluxo axial estudado, a partir da sua análise de indutâncias obtida por software de simulação baseado no FEM.

### 1.3 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está dividida em seis capítulos.

O Capítulo 1 apresenta a motivação para essa dissertação e os objetivos propostos. O Capítulo 2 apresenta os principais tipos de MRV, descrevendo-os e apresentando os equipamentos necessários para seu acionamento e controle. O Capítulo 3 apresenta o projeto do MRV, suas especificações para a locomoção de uma cadeira de rodas e os dados obtidos a partir de simulações para o modelo proposto. Também é realizada nesse capítulo, uma modelagem matemática e o projeto de um sistema de controle convencional. O Capítulo 4 mostra os resultados obtidos em simulação a partir do controle de velocidade do MRV. O Capítulo 5 apresenta os detalhes das peças construídas para verificar a factibilidade de construção de um protótipo real. Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões obtidas com esse trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2 - Motor de Relutância Variável

O motor de relutância variável (MRV) é um tipo de máquina elétrica reconhecida por sua robustez, facilidade no processo de fabricação e, principalmente, ausência de ímãs permanentes. Um breve histórico do MRV, suas principais características, formas de classificação e principais métodos de acionamento serão apresentados nesse capítulo.

### 2.1 Histórico

Os Motores de relutância variável ou também conhecidos como motores de relutância chaveada (MRC), se encontram entre as primeiras máquinas elétricas desenvolvidas, a partir dos anos 1830-1850, como motores eletromagnéticos. No entanto, essas máquinas apresentavam muitos problemas, como, por exemplo, a baixa eficiência na conversão de energia eletromecânica (MILLER, 2001).

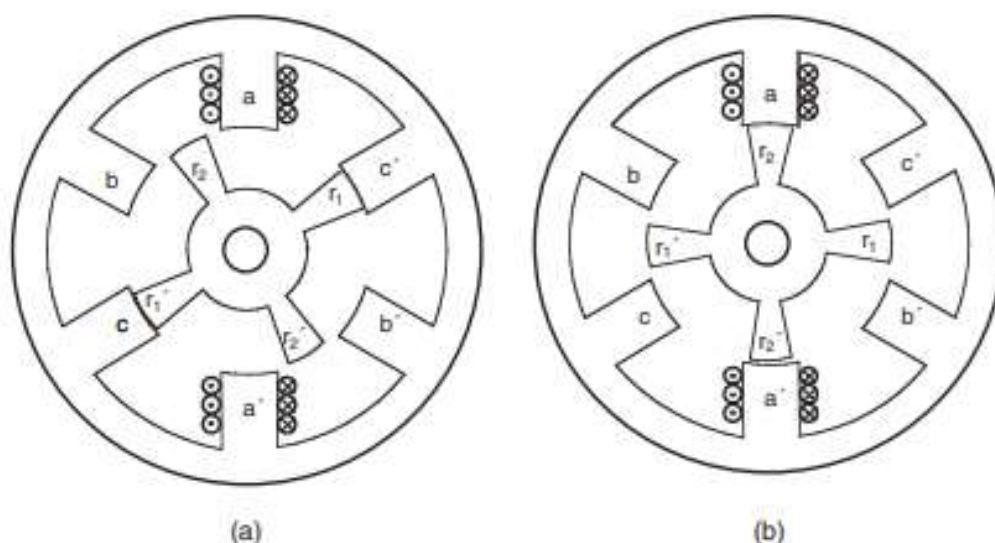
De fato, a reinvenção do MRV se deu com o advento e barateamento de equipamentos de eletrônica de potência que, desde 1969, permitiu que o motor de relutância variável tenha sido proposto para aplicações de velocidade variável (KRISHNAN, 2001).

Auxiliado pelo desenvolvimento de dispositivos de chaveamento de alta potência mais rápidos, de ferramentas matemáticas computacionais e uma melhor compreensão da eficiência da conversão de energia utilizando a saturação magnética, o desenvolvimento dos conceitos do MRV foram aprimorados, especialmente na década de 70. Algumas publicações podem ser mencionadas: tais como as patentes de Bedford e Hoft, datadas de 1971 e 1972, que descrevem uma verdadeira comutação eletrônica, sincronizada positivamente com a posição do rotor; o motor de entreferro axial controlado por tiristores desenvolvido por Unnewehr e Koch; os trabalhos de Bausch; e a patente de Byrne (MILLER, 2001).

Desde então tem havido um crescente desenvolvimento tanto para o projeto quanto para o controle do MRV, possibilitando com que ele possua uma pequena parcela do mercado de acionamentos de velocidade variável de baixa e média potência, devido à sua simplicidade e robustez (HENRIQUES, 2004).

## 2.2 Características e Funcionamento

O princípio de funcionamento de um motor de relutância está relacionado ao fato de que um rotor magneticamente saliente é livre para se mover para a posição de mínima relutância em relação ao caminho do fluxo em um circuito magnético (ALJAISM, 2007). Esse funcionamento é apresentado na Figura 1, para um motor de quatro polos no rotor:  $r_1$ ,  $r_1'$ ,  $r_2$  e  $r_2'$ , e seis polos no estator:  $a$ ,  $a'$ ,  $b$ ,  $b'$ ,  $c$  e  $c'$ .



**Figura 1 – Funcionamento de um MRV (KRISHNAN, 2001).**

Quando o rotor da máquina encontra-se com os polos salientes  $r_2$  e  $r_2'$  desalinhados com os polos  $a$  e  $a'$  do estator, o que ocorre na Figura 1 (a), as bobinas referentes aos polos  $a$  e  $a'$  são então acionadas, atraindo o rotor para a posição onde  $r_2$  e  $r_2'$  estarão alinhados com  $a$  e  $a'$ , na posição de mínima relutância para o circuito magnético equivalente da máquina, o que é mostrado na Figura 1 (b). Após isso, repara-se que os polos  $r_1$  e  $r_1'$  estarão desalinhados com os polos  $b$  e  $b'$  e assim, esses deverão ser acionados, mantendo o movimento rotativo da máquina, no sentido horário.

O acionamento da bobina em um MRV pode ocorrer em qualquer polaridade da corrente. Por conta disso, só é requerida uma corrente unipolar a ser aplicada às fases das bobinas. Essa simplicidade resulta em um simples e confiável circuito conversor de potência (ALJAISM, 2007).

Com relação ao número de polos, costuma-se usar uma grande quantidade de polos para que o motor possa ser acionado em qualquer posição inicial. Além disso, quanto mais polos o MRV possuir, mais suave será a curva do conjugado magnético resultante. Algumas combinações usuais são: 6-4, 8-6 e 12-10 polos, onde o primeiro número representa o número de polos do estator e o segundo os polos do rotor (KRISHNAN, 2001).

Admitindo condições simplificadoras, o conjugado mecânico (torque) produzido por um MRV quando duas bobinas são alimentadas pode ser descrito pela Equação 1 (FITZGERALD, 2006).

$$T_{mec} = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_{11}(\theta_m)}{d\theta_m} + i_1 i_2 \frac{dL_{12}(\theta_m)}{d\theta_m} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_{22}(\theta_m)}{d\theta_m} \quad (1)$$

Onde  $L_{11}$  e  $L_{22}$  são as indutâncias próprias relacionadas às bobinas por onde passam as correntes  $i_1$  e  $i_2$ , respectivamente.  $L_{12}$  é a indutância mútua entre essas mesmas bobinas. Na Equação 1, as indutâncias dependem da posição angular  $\theta_m$  do motor e, por conta disso, o torque produzido por esse tipo de máquina ocorre em função da variação da indutância de fase e da variação da indutância mútua com a posição angular da máquina.

No entanto, considerando que o MRV opera comumente na região de saturação magnética, a indutância depende tanto da posição angular quanto da corrente de excitação, pois nessa região não há uma linearidade entre a densidade de fluxo magnético gerado pelas bobinas e o campo magnético circulando no núcleo, tornando assim a indutância dependente da densidade de fluxo magnético gerado, que por sua vez é uma função da corrente de excitação da bobina.

A Equação 2, apresentada em Krishnan (2001), modela o torque eletromagnético para diversos MRVs, considerando a relação entre a indutância tanto com a posição angular do motor quanto com a corrente de excitação.

$$T_e = [i] \cdot \frac{d[L(\theta, i)]}{d\theta} \cdot [i^T] \quad (2)$$

Onde  $L(\theta, i)$  é uma matriz, cuja diagonal principal é preenchida pelas indutâncias próprias por fase e os demais elementos são as indutâncias mútuas entre as fases, e  $i$  é um vetor linha, com os valores de corrente de fase para cada fase.

De acordo com Krishnan (2001), as indutâncias mútuas de um motor com fluxo magnético radial podem ser desconsideradas, pois possuem um valor muito baixo neste

tipo de máquina. No entanto, um trabalho recente apontou que para o caso do MRV de fluxo axial, as indutâncias mútuas não podem ser desconsideradas, uma vez que possuem uma significativa contribuição para a amplitude do conjugado eletromagnético médio (SANCHES, 2015). O trabalho realizado por Sanches considerou um MRV de fluxo axial possuindo apenas um estator.

Esse trabalho considerou um MRV de fluxo axial com núcleos de estatores que não são acoplados magneticamente entre si, ou seja, não há circulação de fluxo magnético entre bobinas de fases diferentes e, portanto, podem ser desconsideradas.

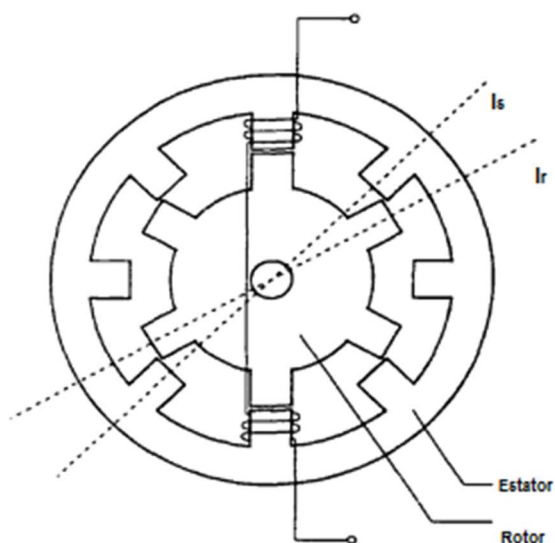
## 2.3 Classificações

Os MRVs podem ser classificados a partir de algumas características, sendo as mais usuais as apresentadas nas próximas subseções:

### 2.3.1 Simetria dos Polos do Estator e Rotor

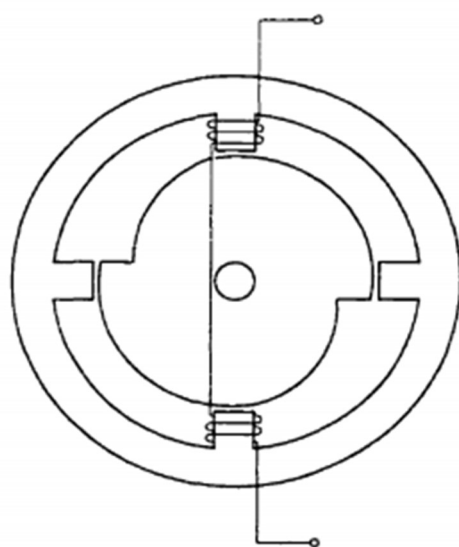
Nessa classificação, os MRVs podem ser intitulados como **MRV regular** e **MRV irregular**.

O MRV regular possui tanto os polos do rotor quanto os polos do estator simétricos com relação às linhas de centro da seção reta da máquina. Estes também são igualmente espaçados ao longo do estator e do rotor (SAKURAI, 2001). Um MRV regular é apresentado na Figura 2, onde  $lr$  é a linha de centro do rotor e  $ls$  é a linha de centro do estator.



**Figura 2 – MRV regular quanto à simetria dos polo (Adaptado de SAKURAI, 2001).**

Na Figura 3 é ilustrando um MRV irregular, considerado assim por não possuir os polos igualmente espaçados e/ou não ter simetria ao longo da linha de centro do estator ou do rotor. Em geral, uma máquina irregular é desenvolvida para atender algumas necessidades especiais, como, por exemplo, a capacidade de iniciar a rotação da máquina de qualquer posição inicial (SAKURAI, 2001).



**Figura 3 – MRV irregular quanto à simetria dos polos (SAKURAI, 2001).**

### 2.3.2 Saliência dos Polos

O MRV pode ser classificado a partir das saliências dos seus polos, podendo ser considerado **MRV de polos salientes** (apenas o rotor possui polos salientes) e **MRV de polos duplamente-salientes** (tanto o rotor quanto o estator possuem polos salientes) (FITZGERALD, 2006).

A título de exemplos, para um MRV de 4-2 polos, a Figura 4 apresenta a geometria de uma máquina de polos salientes e a Figura 5 de uma máquina de polos duplamente-salientes.

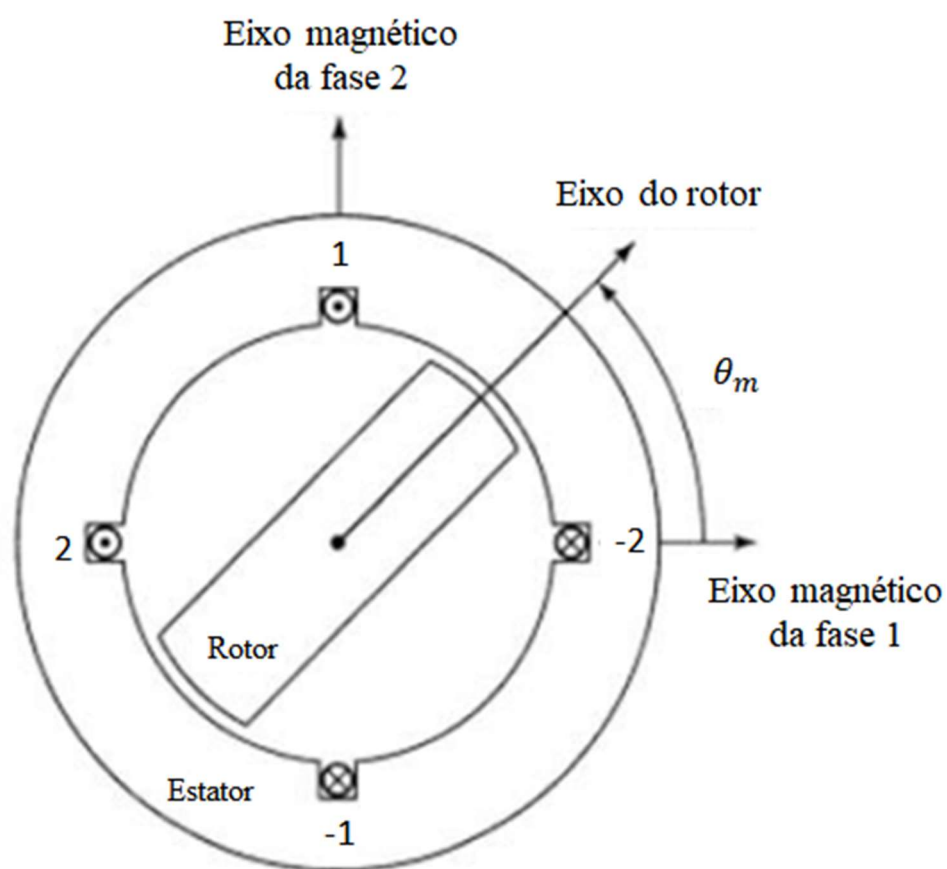
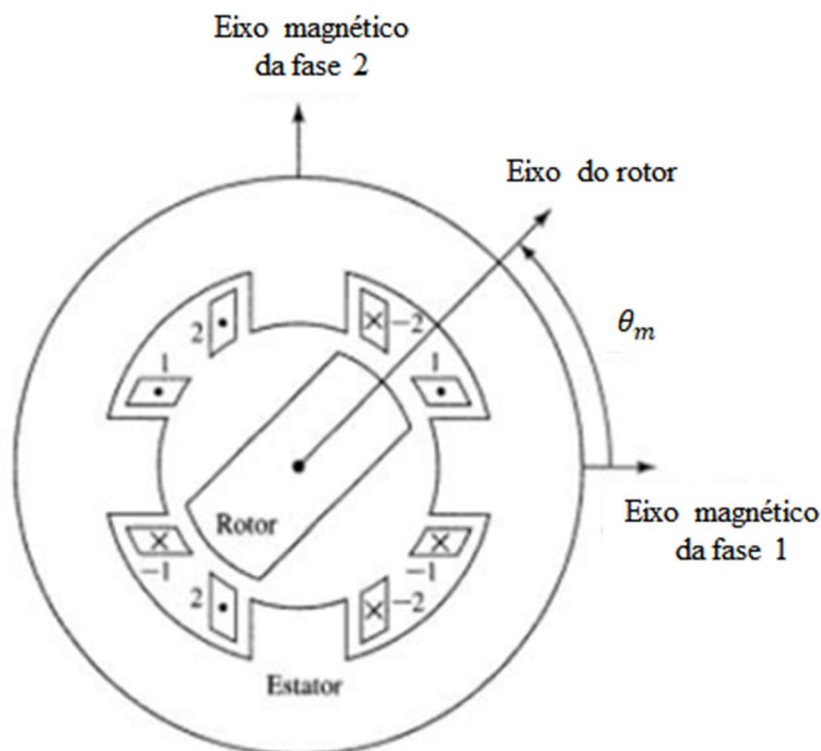


Figura 4 – MRV com rotor de polos salientes (FITZGERALD, 2006).





**Figura 5 – MRV de pólos duplamente-saliente (FITZGERALD, 2006).**

### 2.3.3 Tipo de Movimento

O MRV pode ser classificado como **MRV rotativo** e **MRV linear** (KRISHNAN, 2001).

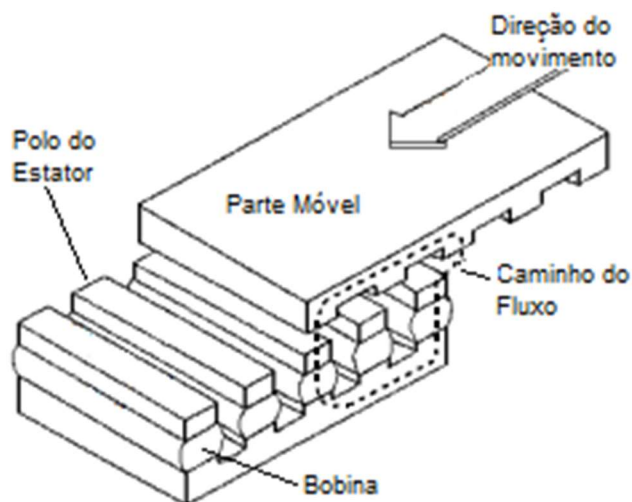
O MRV linear pode ter bobinas no estator ou na parte móvel, diferente do MRV rotativo, onde as bobinas estão sempre no estator (KRISHNAN, 2001).

No caso onde o estator é ativo e a parte móvel passiva, isso é, o estator possui bobinas e a parte móvel não, há a vantagem da alimentação elétrica e do conversor de potência serem estacionários, o que resulta na redução do peso da parte móvel. No entanto, este caso necessita de um grande número de seções do conversor de potência, aumentando o seu custo. Já a configuração onde a parte móvel é ativa e o estator passivo, há a necessidade apenas de uma seção do conversor de potência, mas a potência precisa ser transferida por contatos do tipo escovas, o que não é desejável para aplicações em alta velocidade, ou por transferência indutiva com circuitos de conversão de potência adicionais (KRISHNAN, 2001).

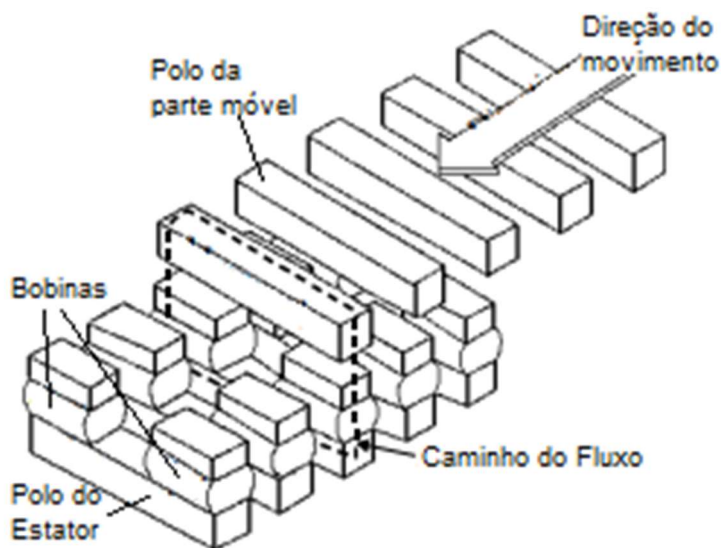
De acordo com Salo (1999), as bobinas são comumente alocadas nos pólos do estator, no entanto, quando a distância percorrida é longa e o veículo móvel é curto, a parte

móvel pode possuir bobinas. Os termos pista ativa, transporte passivo e pista passiva, transporte ativo são comumente usados na tecnologia de ferrovia MAGLEV (SALO, 1999).

Há duas alternativas para o caminho do fluxo magnético: o **MRV de fluxo longitudinal**, apresentada na Figura 6; e o **MRV de fluxo transversal**, presente na Figura 7.



**Figura 6 – MRV linear de fluxo magnético longitudinal (adaptado de SALO, 1999).**



**Figura 7 – MRV linear de fluxo magnético transversal (adaptado de SALO, 1999).**

Na Figura 6, percebe-se que, para o MRV linear de fluxo magnético longitudinal, o caminho do fluxo magnético na parte móvel se dá na direção longitudinal da máquina, isso é, na direção do movimento da máquina. Enquanto que na Figura 7, para o MRV linear de

fluxo magnético transversal, o caminho do fluxo magnético na parte móvel segue em uma direção perpendicular a direção longitudinal, isso é, na direção da largura da máquina.

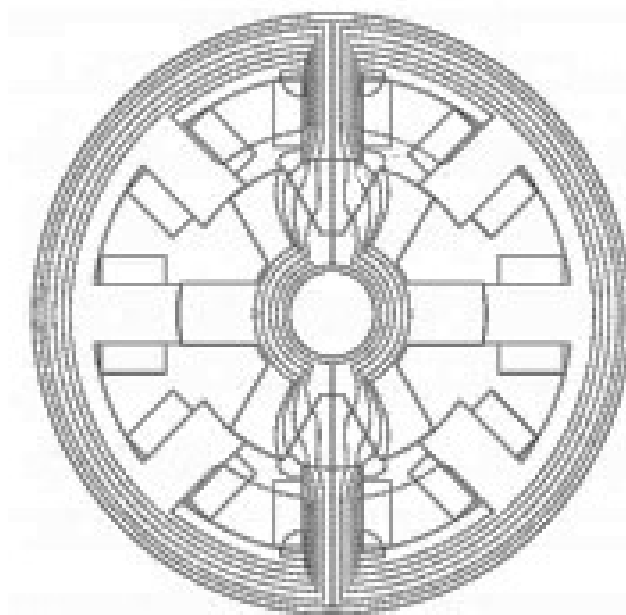
Sobre o MRV rotativo, este pode ser classificado a partir da direção do fluxo magnético na região do entreferro, responsável pela criação do conjugado magnético, em relação ao eixo da máquina. As classificações usuais são o **MRV de fluxo radial** e o **MRV de fluxo axial**.

### 2.3.3.1 MRV Rotativo de Fluxo Radial

O MRV de fluxo radial é aquele onde a direção do fluxo magnético na região do entreferro ocorre de forma perpendicular ao eixo de rotação, ou ainda, a direção do fluxo magnético é a mesma que a direção dos raios dos cilindros do estator e do rotor, conhecida como direção radial.

Este MRV é o mais comum e o mais estudado. As Figura 1 até a Figura 5 são exemplos encontrados na literatura para esse tipo de máquina. Em relação ao MRV de fluxo radial, este pode ainda ser classificado como um **MRV de estrutura básica** ou um **MRV de caminho de fluxo curto** (KRISHNAN, 2001).

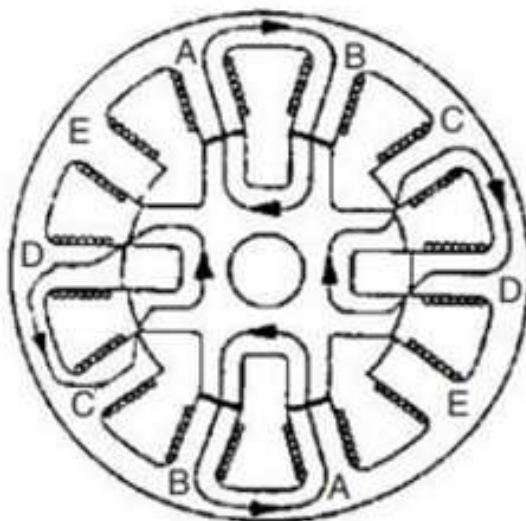
O MRV de estrutura básica possui as bobinas diametralmente opostas ligadas em série, formando uma fase. A Figura 8 apresenta um MRV de fluxo radial com caminho longo de fluxo magnético.



**Figura 8 – MRV de fluxo radial de caminho longo de fluxo (VIJAYRAGHAVAN, 2001).**

Na Figura 8 as bobinas do extremo superior e do extremo inferior, que são diametralmente opostas, estão conectadas em série e, com o seu acionamento, o fluxo magnético percorre todo o diâmetro da máquina.

Já para o caso do MRV de fluxo curto, este possui bobinas adjacentes ligadas em série, formando uma fase, de forma que o caminho percorrido pelo fluxo é menor (KRISHNAN, 2001). Um MRV desse tipo pode ser visto na Figura 9, onde o caminho percorrido pelo fluxo é representado pela linha preta com setas.



**Figura 9 – MRV de fluxo radial de caminho curto de fluxo (Adaptado de KRISHNAN, 2001).**

De acordo com Miller (2001), o MRV de fluxo radial de forma geral possui algumas vantagens e desvantagens principais, sendo as vantagens:

1. Baixo custo de fabricação;
2. Efeitos térmicos mínimos;
3. Operação em altas velocidades;
4. Baixa inércia;
5. Facilidade de reparo;
6. Baixas perdas no rotor;
7. Tolerância à faltas (curto-circuito ou circuito aberto).

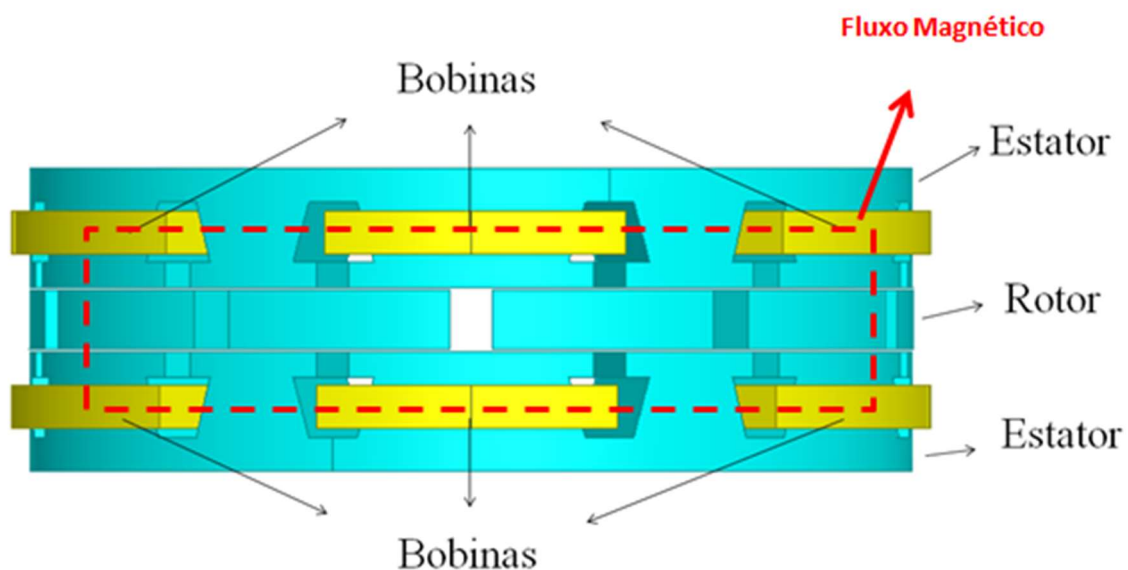
Quanto às principais desvantagens, são listadas:

1. Diâmetro de eixo pequeno;
2. Entreferro pequeno;
3. Necessidade do uso de um sensor de posição;
4. Impossibilidade de operação direta na rede elétrica;
5. Oscilações no conjugado eletromagnético
6. Alto ruído audível;
7. Altas perdas por ventilação em altas velocidades.

### 2.3.3.2 MRV Rotativo de Fluxo Axial

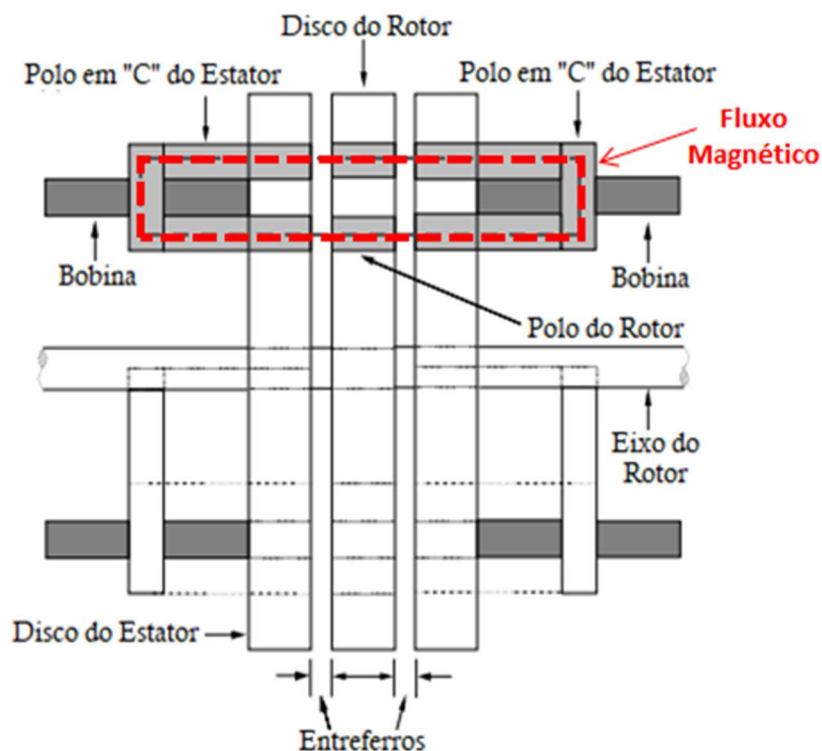
O MRV de fluxo axial é aquele onde a direção do fluxo magnético na região do entreferro ocorre de forma paralela ao eixo de rotação. A direção do eixo da máquina é conhecida como direção axial.

A Figura 10 mostra uma vista lateral de um MRV de fluxo axial com dois estatores e um rotor.



**Figura 10 – MRV de fluxo axial com dois estatores (adaptado de SON, 2017).**

Outra estrutura de MRV encontrada na literatura é mostrada na Figura 11.

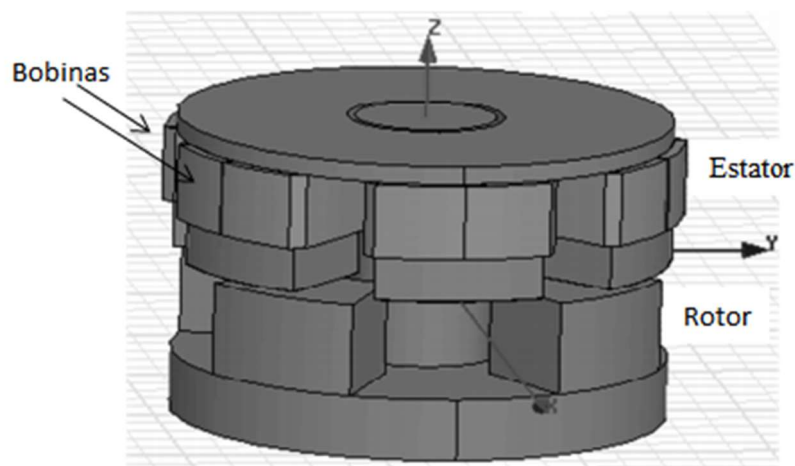


**Figura 11 – Seção longitudinal de um MRV com 2 estatores com polos em formato de “C” (Adaptado de KRISHNAN, 2001).**

Ela consiste de dois discos separados formando o estator e um disco no centro, entre os discos, compondo o rotor. Nessa configuração, cada disco do estator contém polos no formato de “U”, sendo que os polos de um disco de estator faceiam os polos do outro disco de estator e estão alinhados. Os polos do estator e do rotor são fixados por material não magnético, sendo normalmente utilizados discos de alumínio.

Na Figura 11, o retângulo composto por linhas tracejadas vermelhas representa o caminho de fluxo magnético, onde se percebe que na região do entreferro esse fluxo ocorre na direção axial (paralela ao eixo da máquina).

Há ainda o MRV com apenas um estator, este possui um menor volume comparado com o de dois estatores e foi estudado por Sanches (2015). A Figura 12 apresenta uma vista espacial para este tipo de máquina.



**Figura 12 – MRV de fluxo axial com apenas um estator (SANCHES, 2015).**

Sobre os MRV de fluxo axial de forma geral, eles são ideais para aplicações onde o comprimento total do eixo é uma restrição, como no caso de ventiladores de teto ou propulsão de veículos. Contudo, possuem a desvantagem de que a sua fabricação requer que as laminações do estator sejam dobradas uma sobre a outra, ao contrário do empilhamento simples de lâminas usado no MRV de fluxo radial (KRISHNAN, 2001).

## 2.4 MRV do Tipo *In-Wheel*

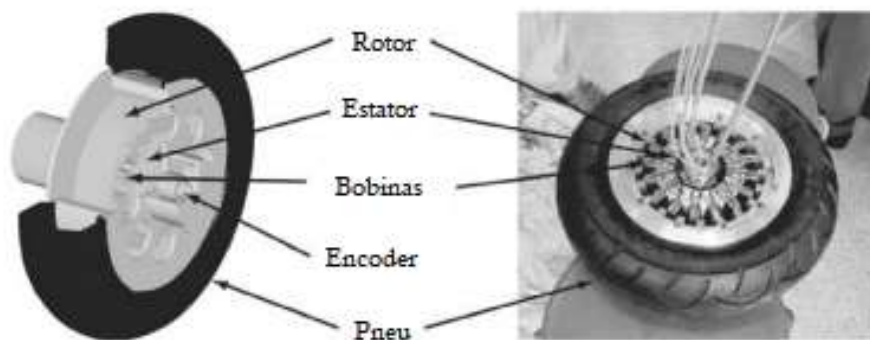
O MRV do tipo *In-Wheel* (do inglês, “na roda”) é aquele no qual a parte móvel do motor (rotor) é montada na própria roda do veículo.

A topologia do tipo *In-Wheel* já foi proposta na literatura para algumas aplicações, da qual se destaca o uso em veículos elétricos. Dentre as diversas topologias para a propulsão veicular, evidencia-se a Multimotor *In-Wheel*, isso é, mais de um motor por veículo, acoplado às rodas, por ser mais confiável e eficiente na propulsão. Algumas das características almejáveis para um motor *In-Wheel* são: robustez, alta eficiência e custo competitivo (MA, 2020).

Na literatura, encontram-se alguns estudos acerca do uso do MRV com acoplamento direto à roda (GOTO, 2005; MAKWANA, 2011; WANG, 2017, XUE, 2009). Nestes estudos, são usados MRVs de fluxo radial.

A Figura 13 apresenta um esquema mostrando a topologia de um MRV *In-Wheel*. No exemplo mostrado, é utilizado um MRV de fluxo radial do tipo 20-16 polos.



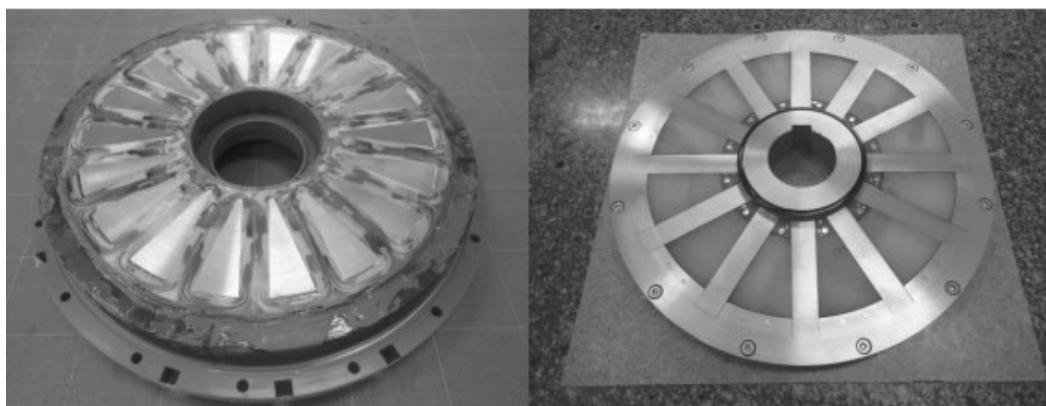


**Figura 13 – MRV *In-Wheel* de fluxo radial (Adaptado de GOTO et al, 2005).**

O “Encoder” mencionado na Figura 13 é um dispositivo eletromecânico que reproduz pulsos elétricos a partir do movimento do seu eixo, isso é, ele é usado para transformar a posição da roda em sinal elétrico digital usado para o controle do MRV.

Há ainda estudos acerca do uso do MRV de fluxo axial com acoplamento direto à roda. Por exemplos, em Goto (2015), dois motores de 18-12 polos, trifásicos, foram utilizados para a tração veicular e avaliou-se que sua densidade de torque por volume foi de  $39Nm/l$  que é comparável a um motor de ímãs permanentes usado em veículos elétricos híbridos.

A Figura 14 mostra o estator e o rotor do MRV de fluxo axial, do tipo *In-Wheel*, usado no estudo citado.



**Figura 14 – MRV *In-Wheel* de fluxo axial usado na propulsão veicular (GOTO, 2015).**

Nesta dissertação será estudado um modelo de MRV regular, rotativo, de fluxo axial, do tipo *In-Wheel*, de 16-24 polos, projetado para gerar o torque necessário para a locomoção de uma cadeira de rodas e do seu usuário, considerando o uso de dois motores, onde cada um deles é acoplado a uma das rodas da cadeira.

## 2.5 Acionamento

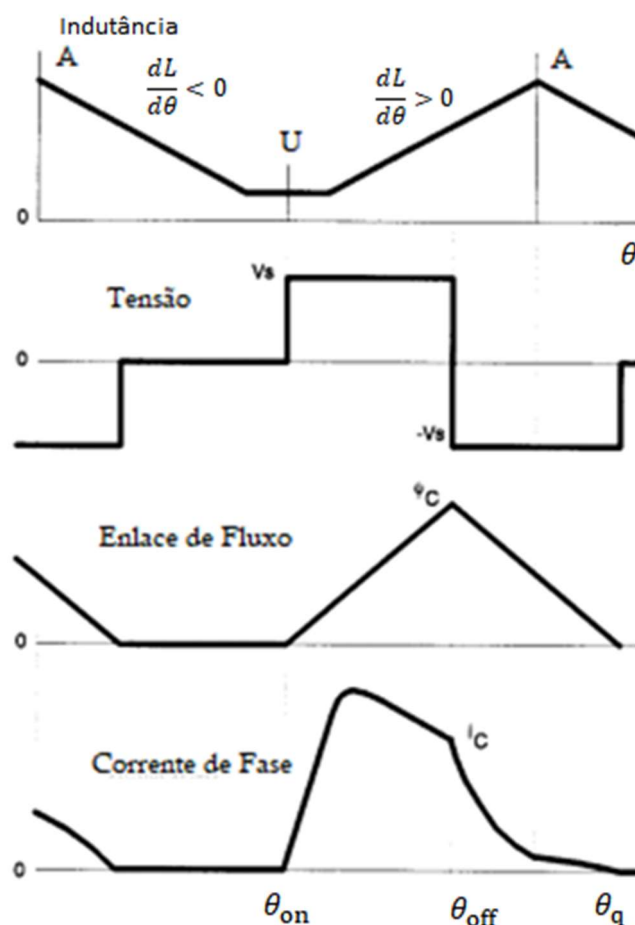
De uma forma geral, o acionamento de um MRV deve ser feito a partir da posição angular do rotor do MRV, tendo, portanto, uma posição de energização, comumente conhecida por  $\theta_{on}$  e uma posição de desenergização  $\theta_{off}$ .

A obtenção da posição angular do rotor pode ser feita através de sensores de posição, que é a técnica mais comumente utilizada. No entanto, há diversas soluções, estudadas e implementadas, que dispensam a utilização de sensores de posição, capazes de estimar a posição angular do rotor (CAI, 2013; CAI, 2014; HA, 2014; PALAKEERTHI, 2014).

Contudo, na operação como motor, caso o fluxo magnético não se reduza a zero antes que os polos comecem a se desalinhar, no ponto onde a indutância passa a decrescer, o torque elétrico mudará de sentido e se criará um torque de frenagem na máquina. Para que este efeito não ocorra, a tensão passa a ser revertida em  $\theta_{off}$ , ao invés de apenas ser zerada. Esse processo é ilustrado na Figura 15.

De acordo com Henriques (2004), o acionamento de um MRV pode ser feito por diferentes estratégias, entre elas: operação a pulso único, operação através de PWM de tensão; e operação através de regulação de corrente.

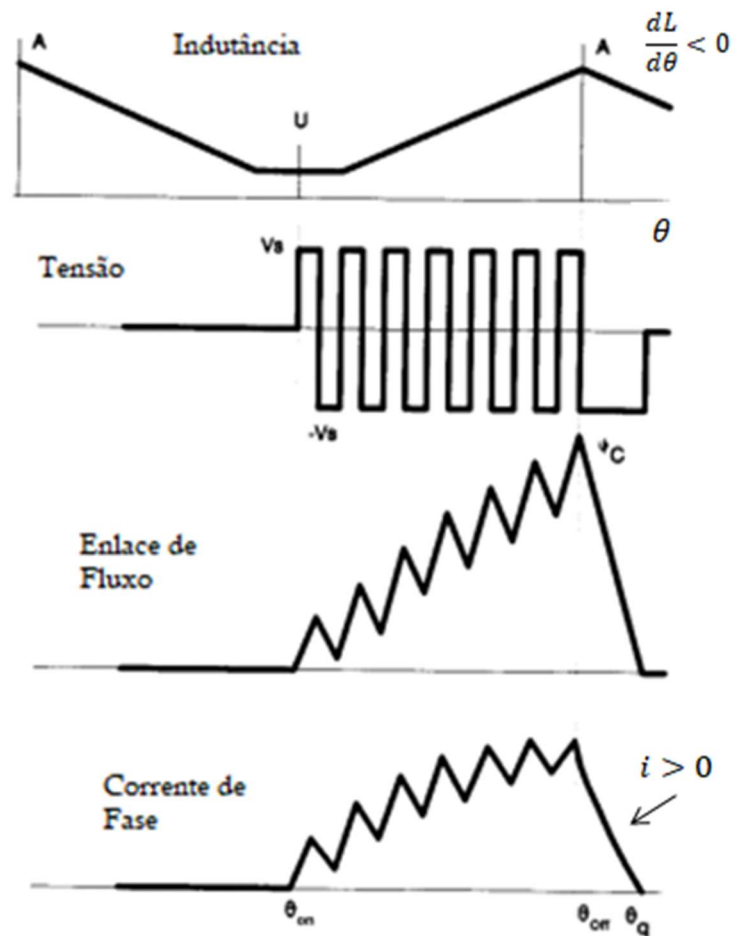
Na operação a pulso único, as chaves semicondutoras são acionadas através de um único pulso e desligadas apenas quando se estabelecer a posição  $\theta_{off}$  do motor. Essa estratégia é comumente usada em altas velocidades. A Figura 15 mostra a curva de indutância ideal, tensão, enlace de fluxo e corrente de fase resultantes. Onde A e U são os valores de indutâncias máxima e mínima, respectivamente.



**Figura 15 – Operação de um MRV com pulso único (adaptado de HENRIQUES, 2004).**

A operação por PWM (*Pulse Width Modulation*, do inglês, “Modulação por Largura de Pulso”) é um método comumente utilizado em baixas velocidades e, diferente da estratégia com pulso único, esta é capaz de usar toda a zona de torque útil do motor, uma vez que a posição de desenergização  $\theta_{off}$  pode ocorrer apenas quando o polo do rotor está alinhado com o polo do estator, na posição de máxima indutância, como ilustrado na Figura 16.

Essa estratégia consiste no chaveamento, em alta frequência, das chaves semicondutoras, podendo ser unipolar (uma chave fica fechada e a outra é acionada) ou bipolar (ambas as chaves são acionadas). A vantagem na operação unipolar está na redução de ruídos e perdas por efeito Joule (HENRIQUES, 2004). As formas de onda para a operação bipolar estão apresentadas na Figura 16.



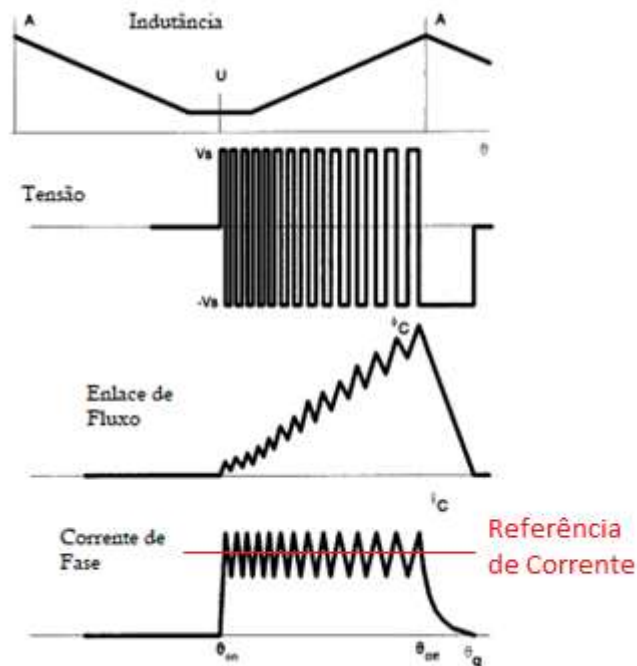
**Figura 16 – Operação bipolar de um PWM em um MRV (adaptado de HENRIQUES, 2004).**

Na operação através de regulação de corrente, as chaves são acionadas de acordo com a corrente de referência de fase. Se a corrente de fase for maior ou menor que a referência de corrente, um comparador de histerese permite o acionamento ou não das chaves. A banda de histerese desse comparador irá definir a frequência de chaveamento. Quanto menor a banda, maior a frequência de chaveamento.

Além disso, como a tensão que alimenta o conversor é fixa, a frequência de chaveamento decresce junto com o aumento da indutância (HENRIQUES, 2004).

Em baixas velocidades, a máquina não possui força contra eletromotriz suficiente para limitar a corrente, e por conta disso, o controle por histerese é usado para se obter aproximadamente um pulso retangular de corrente (HENRIQUES, 2004).

Esse acionamento pode operar em modo unipolar ou bipolar. As curvas de indutâncias, tensão, enlace de fluxo e corrente de fase para a operação bipolar estão apresentadas na Figura 17.



**Figura 17 – Acionamento por controle de corrente de um MRV, operação bipolar (Adaptado de HENRIQUES, 2004).**

Neste trabalho, será realizada uma simulação envolvendo a estratégia de operação por controle de corrente em operação bipolar utilizando um modelo matemático do MRV proposto, obtido a partir de simulações FEM.

## 2.6 Conversores de Potência

Existem inúmeras configurações de conversores desenvolvidos para o MRV e cada um destes é projetado para aplicações específicas. A escolha da configuração deve considerar a potência, características físicas do motor e as necessidades da carga (HENRIQUES, 2004).

De acordo com Henriques (2004), o acionamento do MRV deve apresentar algumas características essenciais:

1. ser capaz de aplicar pulsos de tensão, com polaridade invertida, na fase que tenha acabado de ser desligada, desmagnetizando tal fase no menor tempo possível, e assim não gerando conjugado negativo após passar pela sua posição de alinhamento;

2. permitir a sobreposição de corrente de fase, isso é, permitir que mais de uma fase conduza ao mesmo tempo, o que é desejado quando a máquina opera em altas velocidades e o tempo de comutação entre fases é muito pequeno;
3. ser capaz de controlar a amplitude e forma de onda das correntes de fase;
4. ser capaz de suprir pulsos de corrente unipolar em cada fase, em sincronia com a posição agular instantânea do rotor.

Como já mencionado anteriormente, o MRV necessita apenas de corrente unipolar, uma vez que seu torque não depende do sentido da circulação da corrente nas bobinas, o que simplifica a estrutura dos conversores de potência utilizados.

Por não depender da polaridade da corrente de excitação, estes dispositivos poderiam até utilizar apenas uma chave semicondutora por bobina de fase. Contudo, prefere-se o conversor meia ponte, de tal modo que duas chaves estão sempre em série com a bobina de fase. Portanto, no caso de uma falta, a indutância das bobinas limita o crescimento da corrente e fornece tempo suficiente para a atuação da proteção. Como as fases do MRV são independentes, no caso de uma falta em uma bobina, é possível ainda continuar operando com as outras fases (KRISHNAN, 2001). Alguns estudos acerca da operação do MRV sobre condições de falta foram feitos e mostram que é possível manter estável o torque gerado pelo sistema (XU, 2012; AMARAL, 2018).

Além disso, levando em conta as perdas por chaveamento, os conversores de potência podem ser divididos em dois tipos segundo sua operação e projeto: conversores de comutação brusca (*hard-switching*); e conversores de comutação suave (*soft-switching*).

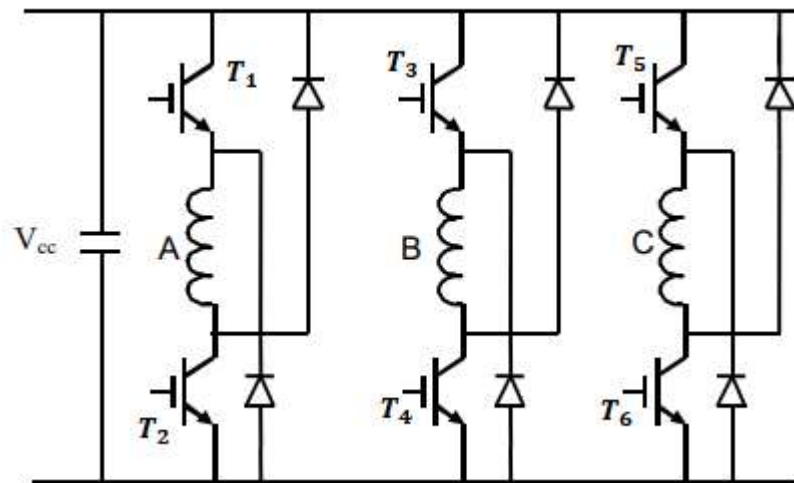
O conversor com comutação suave realiza a comutação das chaves semicondutoras apenas com tensão ou corrente zero, evitando assim perdas no chaveamento, o que aumenta a eficiência do conversor. Para se realizar a comutação suave é necessário o uso de capacitores e indutores, que entram em ressonância, capazes de fazer o cruzamento das tensões e as correntes por zero, contudo o custo do conversor aumenta.

A comutação brusca possui um custo inferior, no entanto, possui mais perdas e uma menor eficiência do conversor (HENRIQUES, 2004).

Algumas das configurações de conversores, com comutação brusca, mais utilizadas no acionamento de um MRV, de acordo com Henriques (2004) e Krishnan (2001), são apresentadas a seguir.

## 2.6.1 Ponte Conversora Assimétrica

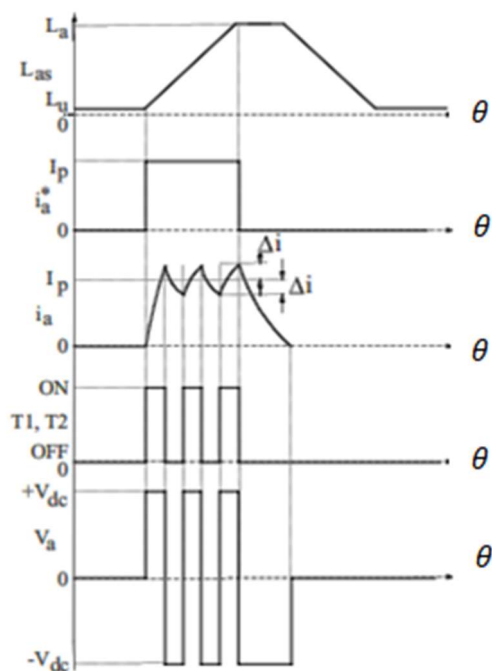
A Figura 18 apresenta uma ponte conversora assimétrica para acionamento de um MRV trifásico, onde, por exemplo, ao se acionar os transistores  $T_1$  e  $T_2$ , uma corrente passará a circular na fase A do MRV. Trata-se de três conversores em meia ponte.



**Figura 18 – Ponte conversora assimétrica (adaptado de HENRIQUES, 2004).**

Existem diferentes formas de operação para a ponte conversora assimétrica. A estratégia mais simples de operação consiste no acionamento de ambos os transistores da fase quando a estratégia de controle utilizada indicar o acionamento daquela fase (no exemplo da Figura 18, para a fase A, seriam os transistores  $T_1$  e  $T_2$ ). O desligamento de ambos os transistores daquela fase depende da estratégia de acionamento, seja por estar em uma posição angular indicada como  $\theta_{off}$  ou pela regulação da corrente. Quando os transistores estão desligados, a energia armazenada na bobina do MRV será transferida para a fonte  $V_{cc}$  através dos diodos da meia ponte.

A Figura 19 apresenta as formas de onda esperadas numa fase quando o MRV é acionado por uma ponte conversora assimétrica, onde sua corrente é regulada por um controlador por histerese, com amplitude da banda  $\Delta i$ .



**Figura 19 – Formas de onda esperadas para a ponte conversora assimétrica (KRISHNAN, 2001).**

Na figura acima,  $L_{as}$  indica a indutância própria da fase A,  $i_a^*$  é o sinal de referência vindo do controlador para a corrente da fase A,  $i_a$  é a corrente da fase A,  $T_1$  e  $T_2$  indicam os estados de operação dos transistores na fase A,  $V_a$  indica a tensão aplicada à fase A.

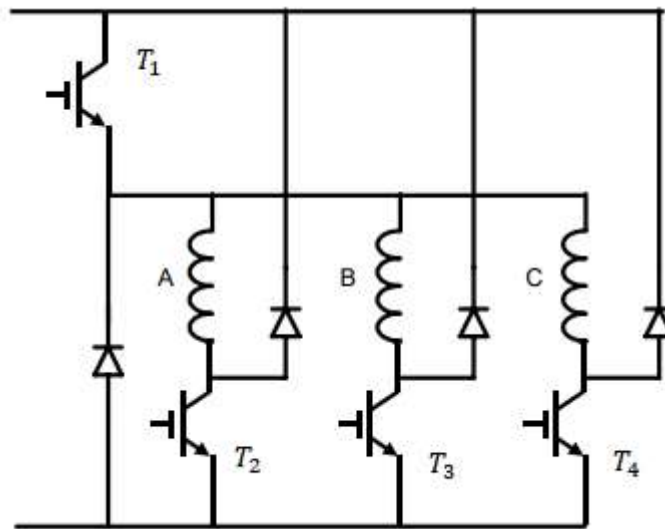
Embora seja muito utilizada, essa operação possui algumas desvantagens: Há muitas variações de tensão em cima do capacitor de elo CC, reduzindo sua vida útil. Além disso, tais alterações de tensão podem deteriorar o isolamento das bobinas da máquina e há um aumento das perdas por chaveamento, por conta da frequente comutação.

A operação mencionada pode ser caracterizada como uma operação bipolar. Há ainda a opção de se realizar uma operação unipolar, onde em vez de desligar ambos os transistores da fase, apenas um transistor será desligado. Dessa forma, a tensão na bobina passa a ser 0 (desconsiderando as quedas de tensão geradas pelo diodo e pelo transistor). Nesse caso, há uma diminuição na frequência de chaveamento e, portanto, há uma melhora com relação às desvantagens apresentadas para a operação bipolar.



## 2.6.2 Conversor de Miller

A Figura 20 apresenta a topologia de um conversor de Miller trifásico. A principal vantagem deste conversor é o uso de  $n+1$  chaves, sendo  $n$  o número de fases do motor, enquanto o conversor clássico necessita de  $2n$  chaves.



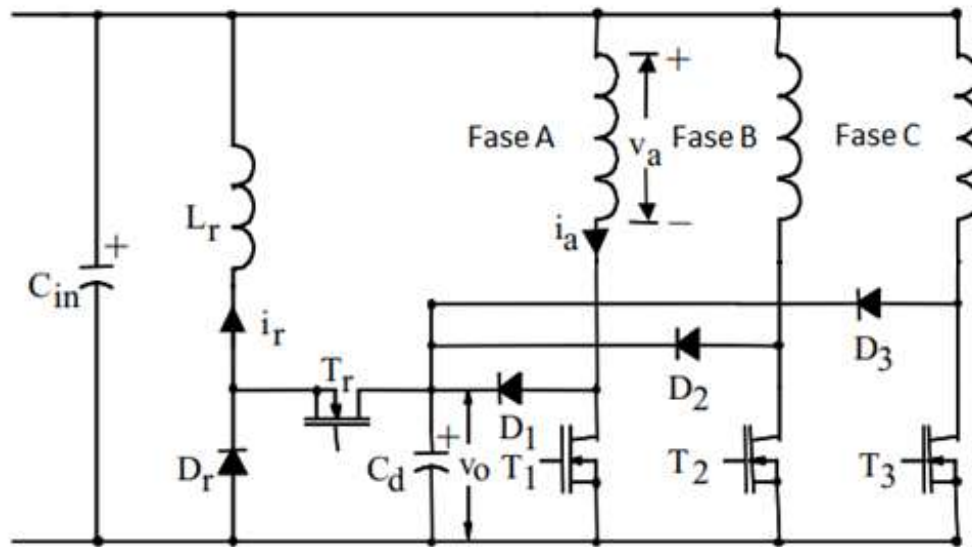
**Figura 20 – Conversor de Miller (adaptado de HENRIQUES, 2004).**

Seu funcionamento se dá a partir de uma única chave ( $T_1$ ) que é responsável por controlar a corrente nas demais fases. As outras chaves ( $T_2, T_3, T_4$ ) têm o objetivo de chavear a fase que será a energizada de acordo com a posição angular do rotor.

A principal desvantagem deste conversor é não permitir um controle totalmente independente de fases, restringindo algumas estratégias de controle possivelmente adotadas, como a aplicação simultânea de uma tensão positiva em uma fase e uma negativa em outra, por exemplo. Dessa forma, o conversor de Miller é amplamente utilizado em aplicações que necessitam de baixa velocidade.

## 2.6.3 Conversor C-Dump

A Figura 21 mostra a topologia de um conversor C-Dump. A principal vantagem deste conversor é o de possuir  $n+1$  chaves, assim como o conversor de Miller, no entanto, esta configuração possui a alternativa do controle independente por fase, possibilitando a energização com tensão positiva de uma fase e tensão negativa em outra.



**Figura 21 – Conversor C-Dump (adaptado de KRISHNAN, 2001).**

Neste conversor, a energia magnética armazenada nas bobinas do motor será parcialmente dividida para o capacitor  $C_d$  e recuperada deste através do conjunto compreendendo o transistor  $T_r$ , o indutor  $L_r$  e o diodo  $D_r$ , sendo então enviada de volta para a fonte.

Para o acionamento, por exemplo, da fase A, o transistor  $T_1$  é acionado. Para seu desligamento, a chave é então desligada, o que habilita o diodo  $D_1$  e a energia da fase é transferida para o capacitor com uma tensão superior à da fonte. Com o uso da energia armazenada no capacitor, é possível a aplicação de tensões negativas nas demais fases durante uma sobreposição de fases, possibilitando um controle de fases independente.

No entanto, uma desvantagem desse conversor é que a tensão aplicável às demais fases é dada pela diferença entre a tensão do capacitor ( $V_o$ ) e a tensão da fonte ( $V_s$ ). E uma eficiente e rápida comutação entre as fases depende de uma rápida desmagnetização da fase, que por sua vez, depende da magnitude da tensão negativa a ser aplicada.

De acordo com Henriques (2004), deseja-se manter a tensão nesse capacitor como sendo o dobro da tensão na fonte ( $2V_s$ ), a fim de possibilitar uma aplicação de tensão negativa de magnitude  $-V_s$  em uma das fases durante a sobreposição de fases.

Sobre suas perdas, a energia circulando entre o capacitor  $C_d$  e o elo CC (representado pelo capacitor  $C_{in}$ ) resulta em perdas adicionais na máquina e no reator  $L_r$ , diminuindo sua eficiência.

Neste trabalho, a estratégia de controle simulada utiliza um conversor do tipo ponte conversora assimétrica composta por transistores ideais.

## Capítulo 3 - Projeto do MRV

Neste capítulo, para elaborar o projeto do MRV, foram levadas em consideração as especificidades do projeto e, então, analisada a capacidade de torque mínima que o motor necessita suprir. Uma modelagem matemática sobre o funcionamento do MRV e sua geração de torque foi obtida e, então, a partir da análise de simulações por elementos finitos, obtida a partir do software Maxwell, de diversas estruturas e do valor mínimo de torque considerado, foi validado um projeto de MRV.

Por fim, foi apresentada uma proposta de acionamento e controle que foi simulada com auxílio da ferramenta Simulink do software Matlab.

### 3.1 Especificações do Projeto

O MRV proposto nessa dissertação tem como finalidade a geração da tração necessária para a locomoção de uma cadeira de rodas e do seu usuário. Por conta disso, a capacidade do motor na geração de torque é uma especificação do projeto.

Além disso, a massa do motor é também uma especificação, uma vez que a resistência à locomoção está ligada diretamente à massa do sistema a ser tracionado e, por consequência, à massa do motor.

Para avaliar o torque necessário, foram consideradas as seguintes condições de movimentações da cadeira de rodas:

- a) Locomoção acelerada em plano reto.
- b) Locomoção em velocidade constante em plano oblíquo.

Em ambos os itens, foram desprezados os efeitos do atrito dos eixos, das rodas com o solo e da resistência do ar.

Para a massa do sistema, foi considerada a massa da cadeira de rodas ( $m_c$ ) igual à 10kg, a massa do seu usuário ( $m_u$ ) igual à 75 kg, a massa dos motores ( $m_m$ ) igual à 55 kg e a massa das baterias e demais equipamentos elétricos ( $m_e$ ) igual à 20 kg. Sendo assim, a massa total do sistema ( $M$ ) considerada é igual a 160 kg, como apresentada em (3).

$$M = m_c + m_u + m_m + m_e = 160 \text{ kg} \quad (3)$$

Para o item a), foi considerado um movimento acelerado onde o sistema sai do repouso e chega a velocidade “ $v$ ” de 2 km/h, em aproximadamente 0,556 m/s, em um intervalo de tempo “ $t$ ” de 4 segundos. Dessa forma, a aceleração uniforme necessária pode ser calculada usando a equação (4), com a qual obtêm-se a aceleração ( $a$ ) de 0,139 m/s<sup>2</sup>.

$$a = \frac{v}{t} \quad (4)$$

De acordo com a 2ª Lei de Newton, a força necessária para se acelerar um corpo ou sistema, é dada em (5).

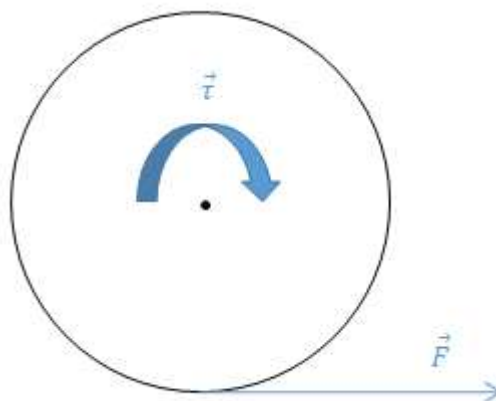
$$F = Ma \quad (5)$$

onde  $F$  é o módulo da força,  $M$  é a massa do corpo ou sistema e  $a$  é o módulo da aceleração do corpo ou sistema.

De acordo com as considerações feitas, a força necessária para locomover a cadeira de rodas em terreno plano, desconsiderando forças de resistência, com uma aceleração de 0,139m/s<sup>2</sup> é calculada como apresentado em (6):

$$F = 160 \times 0,139 = 22,24 \text{ N} \quad (6)$$

Essa força será aplicada à cadeira de rodas a partir do torque que atua no eixo da sua roda, conforma apresentado na Figura 22.



**Figura 22 – Força e torque sobre a roda da cadeira de rodas (Elaboração Própria).**

Portanto, a força será consequência do torque gerado pelo MRV. Considerando que a força e o braço de aplicação da força são perpendiculares, a relação entre o torque e a força é dada em (7).

$$\tau = FR \quad (7)$$

Onde  $\tau$  é o módulo do torque aplicado no eixo,  $F$  é o módulo da força aplicada no sistema e  $R$  é o raio da roda. Considerando um raio de 26cm, isso é, 0,26m, têm-se o apresentado em (8):

$$\tau = 22,24 \times 0,26 = 5,78 \text{ Nm} \quad (8)$$

E por fim, considerando que o projeto determina o uso de dois motores, sendo cada um acoplado em uma roda, esse torque pode ser dividido igualmente entre os dois motores, e assim, têm-se que o torque necessário gerado por um dos MRVs deste projeto de acordo com o item a) é de  $\tau_a = 2,90 \text{ Nm}$ .

Para o item b), foi considerada a locomoção da cadeira de rodas, em movimento uniforme, isso é, sem aceleração, em um plano inclinado, desconsiderando forças resistivas como atrito e resistência com o ar.

A inclinação do plano foi determinada a partir do disposto na NBR 9050 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002). De acordo com a citada norma técnica, a inclinação máxima de uma rampa de acesso deve ser de 8,33%, isso é, a altura da rampa precisa ser no máximo 8,33% do comprimento horizontal da rampa.

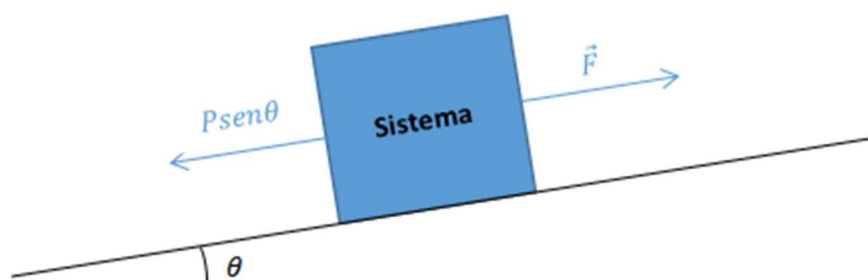
Portanto, o ângulo máximo da inclinação pode ser obtido a partir da relação da tangente (9), onde se considera a altura (A) como o cateto oposto e o comprimento horizontal (H) como o adjacente.

$$tg(\theta) = \frac{CO}{CA} = \frac{A}{H} = \frac{0,0833 \times H}{H} = 0,0833 \quad (9)$$

Sendo assim, o ângulo máximo da inclinação é obtido pela arcotangente (isso é, o arco cuja tangente é) de 0,0833, conforme apresentado em (10).

$$\theta = Arctg(0,0833) = 4,76^\circ \quad (10)$$

A partir dessa inclinação, encontra-se o valor da força necessário para que a cadeira possa se locomover ao longo do plano que é igual à força contrária ao longo do plano realizada pela componente do peso ao longo do plano, conforme apresentado na Figura 23.



**Figura 23 – Forças atuantes no sistema ao longo do plano inclinado (Elaboração Própria).**

Dessa forma, é necessário que a força aplicada pelos motores seja igual ao peso do sistema multiplicado pelo seno do ângulo da rampa, conforme apresentado em (11). Sabe-se ainda que o peso é dado como a multiplicação da massa do sistema pela aceleração da gravidade.

$$F = P \text{sen} \theta = M g \text{sen} \theta \quad (11)$$

Sendo assim, considerando a massa total do sistema  $M = 160 \text{ kg}$ , a aceleração da gravidade como sendo  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$  e o ângulo  $\theta$  igual à  $4,76^\circ$ , teremos que a força  $F$  calculada pela equação (11) é de  $130,2 \text{ N}$ .

Assim como no item a), foi utilizada a equação (7) para se encontrar o torque necessário para o item b) e esse valor foi dividido à metade, uma vez que ele será gerado por dois motores, encontrando-se o valor de  $\tau_b = 16,9 \text{ Nm}$ .

Esse valor calculado é o torque necessário para manter o sistema em equilíbrio de forças, e portanto, considera-se aqui uma movimentação em plano inclinado com velocidade constante.

Dentre os valores calculados, como o torque necessário para o item b) é maior, este será utilizado como uma especificação do projeto, isso é, o motor projetado deverá ter a capacidade de gerar o torque de  $16,9 \text{ Nm}$  sobre o eixo.

Além disso, para esse cálculo foi considerado que a massa dos motores era de  $55 \text{ kg}$ , portanto, outra especificação é a de que a massa de um motor precisa ser de até  $27,5 \text{ kg}$ .

## 3.2 Modelagem Matemática

O MRV proposto nessa dissertação possui três fases, cada uma com oito bobinas em série, cujas tensões são dadas:

$$V_A = V_{A1} + V_{A2} + V_{A3} + V_{A4} + V_{A5} + V_{A6} + V_{A7} + V_{A8} \quad (12)$$

$$V_B = V_{B1} + V_{B2} + V_{B3} + V_{B4} + V_{B5} + V_{B6} + V_{B7} + V_{B8} \quad (13)$$

$$V_C = V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} + V_{C4} + V_{C5} + V_{C6} + V_{C7} + V_{C8} \quad (14)$$

Onde  $V_f$  é a tensão em cada fase ( $f = A, B, C$ ),  $V_i$  é a tensão na bobina correspondente ( $i = A1, A2, A3, [...], C6, C7, C8$ ).

Desconsiderando as indutâncias mútuas, pois não há acoplamento magnético entre as bobinas, as tensões nas bobinas da fase A são dadas pelas seguintes equações:

$$V_{A1} = R_{A1}I_{A1} + \frac{\partial(L_{A1}I_{A1})}{\partial t} \quad (15)$$

$$V_{A2} = R_{A2}I_{A2} + \frac{\partial(L_{A2}I_{A2})}{\partial t} \quad (16)$$

$$V_{A3} = R_{A3}I_{A3} + \frac{\partial(L_{A3}I_{A3})}{\partial t} \quad (17)$$

$$V_{A4} = R_{A4}I_{A4} + \frac{\partial(L_{A4}I_{A4})}{\partial t} \quad (18)$$

$$V_{A5} = R_{A5}I_{A5} + \frac{\partial(L_{A5}I_{A5})}{\partial t} \quad (19)$$

$$V_{A6} = R_{A6}I_{A6} + \frac{\partial(L_{A6}I_{A6})}{\partial t} \quad (20)$$

$$V_{A7} = R_{A7}I_{A7} + \frac{\partial(L_{A7}I_{A7})}{\partial t} \quad (21)$$

$$V_{A8} = R_{A8}I_{A8} + \frac{\partial(L_{A8}I_{A8})}{\partial t} \quad (22)$$

Onde  $R_i$  é a resistência da bobina ‘i’,  $I_i$  é a corrente da bobina “i” e  $L_i$  é a indutância própria da bobina “i”.

Como as bobinas da fase estão conectadas em série, tem-se que a corrente na fase A ( $I_A$ ) será:

$$I_A = I_{A1} = I_{A2} = I_{A3} = I_{A4} = I_{A5} = I_{A6} = I_{A7} = I_{A8} \quad (23)$$

Além disso, pode-se considerar que as resistências das bobinas são iguais, uma vez que as bobinas são feitas do mesmo material e compostas pela mesma quantidade de voltas, portanto têm-se:

$$R = R_{A1} = R_{A2} = R_{A3} = R_{A4} = R_{A5} = R_{A6} = R_{A7} = R_{A8} \quad (24)$$

Substituindo as equações 18 a 27 na equação 15, obtêm-se:

$$V_A = 8RI_A + \frac{\partial(L_{A1} + L_{A2} + L_{A3} + L_{A4} + L_{A5} + L_{A6} + L_{A7} + L_{A8})I_A}{\partial t} \quad (25)$$

As indutâncias próprias das bobinas da mesma fase são iguais, o que pode ser explicado por conta da simetria do MRV, isso é, o circuito magnético para cada bobina será o mesmo, uma vez que os polos do estator e do rotor estarão com o mesmo desalinhamento para as bobinas da mesma fase. Sendo assim, temos:

$$L_A = L_{A1} = L_{A2} = L_{A3} = L_{A4} = L_{A4} = L_{A5} = L_{A6} = L_{A7} = L_{A8} \quad (26)$$

Onde  $L_A$  é a indutância para uma bobina qualquer da fase A.

Substituindo a equação 29 na equação 28, obtêm-se:

$$V_A = 8RI_A + 8 \frac{\partial(L_A I_A)}{\partial t} \quad (27)$$

As tensões nas bobinas das fases B e C seguem o mesmo padrão que a tensão na bobina da fase A apresentada na Equação (30), sendo assim, têm-se:

$$V_B = 8RI_B + 8 \frac{\partial(L_B I_B)}{\partial t} \quad (28)$$

$$V_C = 8RI_C + 8 \frac{\partial(L_C I_C)}{\partial t} \quad (29)$$

Na forma matricial, e lembrando-se que a indutância é dependente da posição angular do rotor ( $\theta$ ), têm-se:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = 8 \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + 8 \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} L_A(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & L_B(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & L_C(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (30)$$

Definindo o vetor tensão como  $V = [V_A \ V_B \ V_C]^T$ , o vetor corrente como  $I = [I_A \ I_B \ I_C]^T$ , a matriz de indutâncias como

$$L = \begin{bmatrix} 8L_A(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 8L_A(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 8L_A(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{e a matriz de resistências como}$$

$$R = \begin{bmatrix} 8R & 0 & 0 \\ 0 & 8R & 0 \\ 0 & 0 & 8R \end{bmatrix}, \text{ a equação matricial para as tensões nas fases do MRC fica como:}$$



$$[V] = [R][I] + \frac{\partial}{\partial t}([L(\theta)][I]) \quad (31)$$

$$[V] = [R][I] + \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta} [L(\theta)] \frac{\partial \theta}{\partial t} [I] + [L(\theta)] \frac{\partial}{\partial t} [I] \right\} \quad (32)$$

Como a derivada temporal da posição angular é a velocidade angular do rotor ( $\omega$ ), tem-se por fim a equação elétrica deste MRV:

$$[V] = [R][I] + \left\{ \omega \frac{\partial}{\partial \theta} [L(\theta)][I] + [L(\theta)] \frac{\partial}{\partial t} [I] \right\} \quad (33)$$

Com relação ao conjugado eletromagnético gerado nas três fases do MRV, de acordo com Krishnan (2001), ao se multiplicar pela esquerda os termos da equação pela matriz transposta de  $[I]$  e dividindo pela velocidade angular  $\omega$ , e rearranjando termos, este pode ser deduzido como:

$$T_e = \frac{1}{2} [I]^T \frac{\partial [L(\theta)]}{\partial \theta} [I] \quad (34)$$

Já a equação mecânica do MRV é dada por:

$$T_e = J \frac{\partial \omega}{\partial t} + B\omega + T_L \quad (35)$$

Onde  $J$  é o momento de inércia,  $B$  é o coeficiente de atrito viscoso e  $T_L$  é o torque da carga.

### 3.3 Análise por Elementos Finitos

Apesar da sua simplicidade, o MRV possui um princípio de operação magnético não linear, uma vez que, conforme apresentado na Equação (2), seu torque é calculado a partir da corrente de fase e da variação da indutância da máquina, onde essa por sua vez depende da corrente e, portanto, a sua não linearidade dificulta o desenvolvimento de fórmulas que considerem unicamente os princípios bem conhecidos do eletromagnetismo.

A maior dificuldade para entender a operação e o projeto do MRV reside nos polos salientes duplos: nem o rotor nem o estator têm uma superfície cilíndrica lisa no entreferro, mas ambos têm polos salientes ou dentes. Devido a esta característica, a sua operação em regime permanente se caracteriza por uma série de transientes nos quais os parâmetros do circuito indutivo dos enrolamentos das bobinas de fase são funções variáveis da posição e da corrente. A variação com a corrente é associada com a intensa saturação de polos parcialmente sobrepostos, que é difícil de calcular em detalhes sem programas de

simulação, como por exemplo, aqueles baseados no método dos elementos finitos (KRISHNAN, 2001).

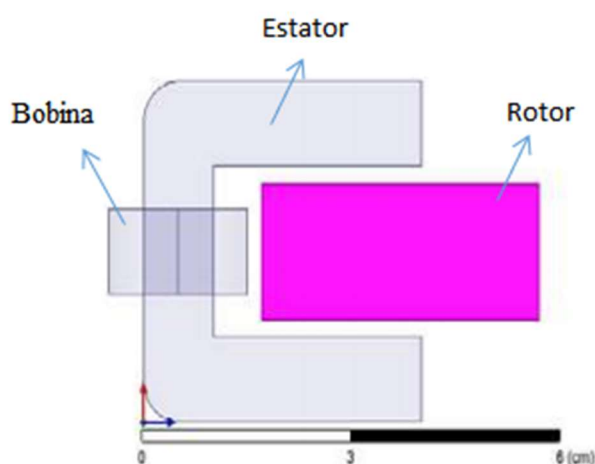
Ademais, os resultados obtidos pela simulação são úteis para o projeto do conversor de potência e da estratégia de controle do MRV, uma vez que com a simulação por elementos finitos é possível de estimar as indutâncias do motor e os tempos de fechamento e abertura dos circuitos de cada fase dependem do conhecimento dos intervalos angulares em que acontecem a máxima e mínima indutância por fase.

Neste trabalho, foi utilizado o programa Maxwell, software de simulação baseado no método dos elementos finitos (FEM – *Finite Element Method*), onde foram realizadas simulações tridimensionais.

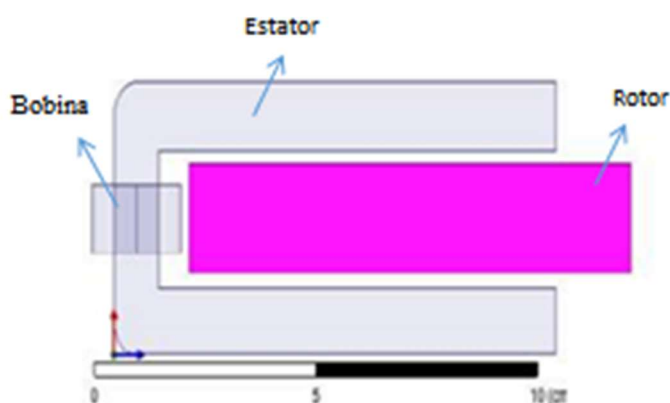
### 3.3.1 Modelagem e Desenho

Para a realização dessa dissertação, foi aproveitado o estudo de iniciação científica realizado pelo autor durante sua graduação. Nele, foram simuladas, com apoio de programa de simulação baseado no método dos elementos finitos, diversas estruturas para o núcleo do estator do MRV a fim de verificar a melhor opção em termos de capacidade de geração de torque e de facilidade de construção (LIMA, 2018).

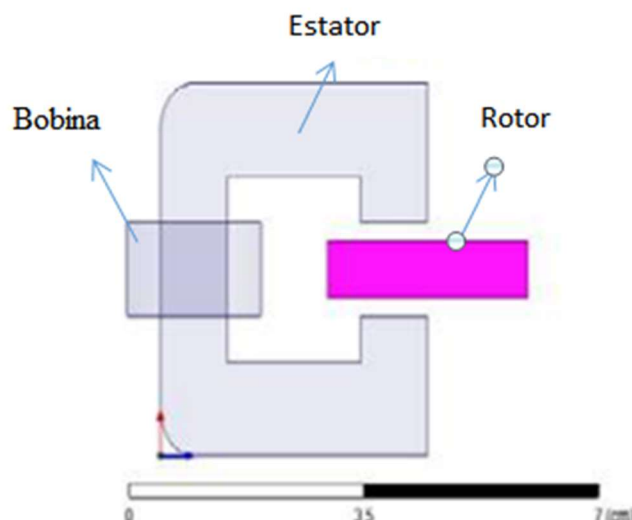
Algumas das estruturas simuladas estão mostradas nas Figura 24, Figura 25 e Figura 26.



**Figura 24 – Núcleo do estator em formato de U (LIMA, 2018).**



**Figura 25 – Núcleo do estator em formato de U alongado (LIMA, 2018).**



**Figura 26 – Núcleo do Estator em formato de C (LIMA, 2018).**

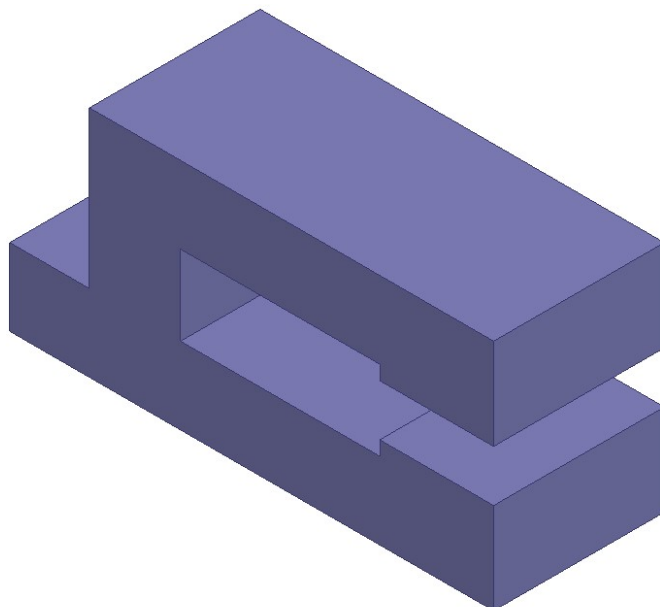
A partir desse estudo, considerou-se que a melhor estrutura entre as simuladas, dentro dos critérios selecionados, foi a de formato C. Com esse resultado, foi produzido por Lima (2020) um novo estudo considerando os núcleos do estator em formato de C e com algumas alterações para se adequar melhor às especificações do projeto (capacidade de geração de torque para a locomoção de uma cadeira de rodas).

O artigo produzido por Lima (2020), a partir desse estudo, encontra-se no Anexo A.

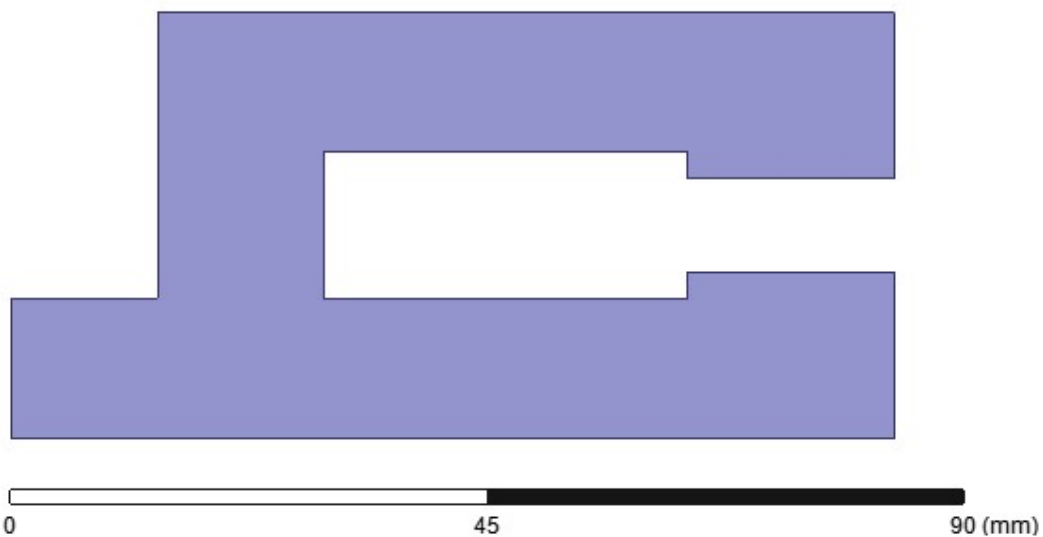
Prosseguindo o trabalho citado, nesta dissertação foi considerado um motor de relutância do tipo In-Wheel com 24 polos no estator e 16 polos no rotor. Para cada polo do estator foi construído um núcleo ferromagnético separado dos demais.

O núcleo do estator possui uma estrutura denominada pelo citado autor como do tipo C, por conta do seu formato.

O núcleo do estator foi desenhado de forma a atender às especificações do projeto e está apresentado em perspectiva na Figura 27 e em uma vista frontal na Figura 28.

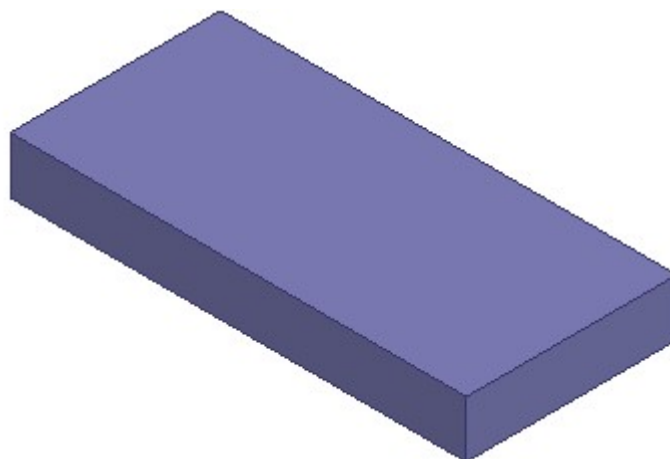


**Figura 27 – Vista em perspectiva do núcleo do estator na simulação FEM (Elaboração Própria).**

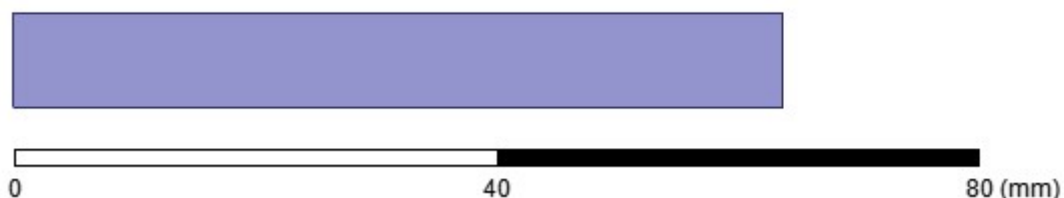


**Figura 28 – Vista frontal do núcleo do estator na simulação FEM (Elaboração Própria).**

Sobre o rotor, este também é formado por núcleos isolados, um para cada polo. Esse núcleo é formado por um paralelepípedo e está apresentado em perspectiva na Figura 29 e em uma vista frontal na Figura 30.

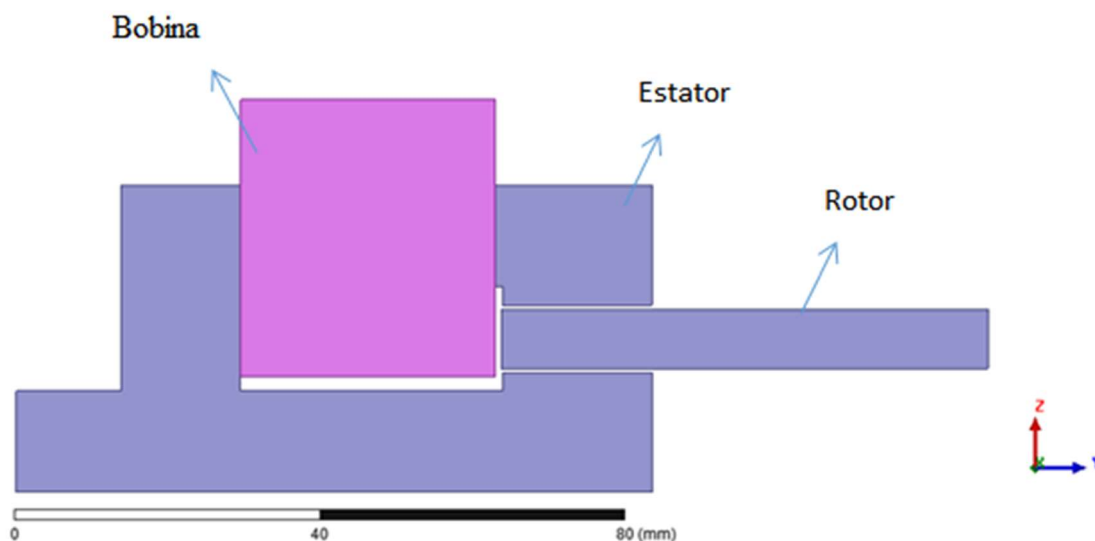


**Figura 29 – Vista em perspectiva do núcleo do rotor na simulação FEM (Elaboração Própria).**



**Figura 30 – Vista frontal do núcleo do rotor na simulação FEM (Elaboração Própria).**

Na Figura 31, estão apresentados na cor azul acinzentado tanto o núcleo do estator quanto o do rotor, no instante em que ambos estariam alinhados. Em roxo, mostra-se a bobina. Para a simulação, foi utilizado o material Aço 1020 para o núcleo do estator e do rotor e para a bobina foi utilizado o material Cobre.



**Figura 31 – Núcleo do estator, núcleo do rotor e bobina na simulação FEM (Elaboração Própria).**

Sobre este modelo, foram consideradas as seguintes características: o comprimento de cada entreferro é de 0,5mm e há dois entreferros; a bobina foi projetada para ser composta de cobre esmaltado 18AWG, enrolada em 450 voltas. Desta forma, dado que a corrente máxima suportada pelo material da bobina é de 2,5 A, a força magnetomotriz máxima é de 1125 ampere-espira (Ae).

Com relação à resistência da bobina, foi utilizada a informação de que o fio de cobre esmaltado 18AWG possui uma resistividade de 20,73  $\Omega/\text{km}$  e de que o comprimento esperado de fio por bobina foi de 60,75 m, tendo portanto uma resistência por bobina de 1,26  $\Omega$  e, considerando que as bobinas da mesma fase são ligadas em série, haverá uma resistência por fase de 10,08  $\Omega$ .

Sobre o momento de inércia da estrutura, os núcleos do rotor foram considerados como massas puntiformes localizadas nos seus respectivos centros de massa a uma distância de 12,16 cm do eixo. Sendo assim, foi obtido um momento de inércia  $72,7 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$ .

Com relação à massa esperada da estrutura, o seu cálculo foi realizado a partir do volume de cada componente do MRV simulado e da densidade do material utilizado.

Para os núcleos de estator e de rotor, o volume esperado é de  $V_{\text{núcleos}} = 19,9 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  e considerando a densidade do aço de acordo com Beer (2015) de  $\mu_{\text{aço}} = 7860 \text{ kg/m}^3$ , a massa esperada é dada pela equação 36.

$$m_{\text{núcleos}} = V_{\text{núcleos}} \times \mu_{\text{aço}} = 15,6 \text{ kg} \quad (36)$$

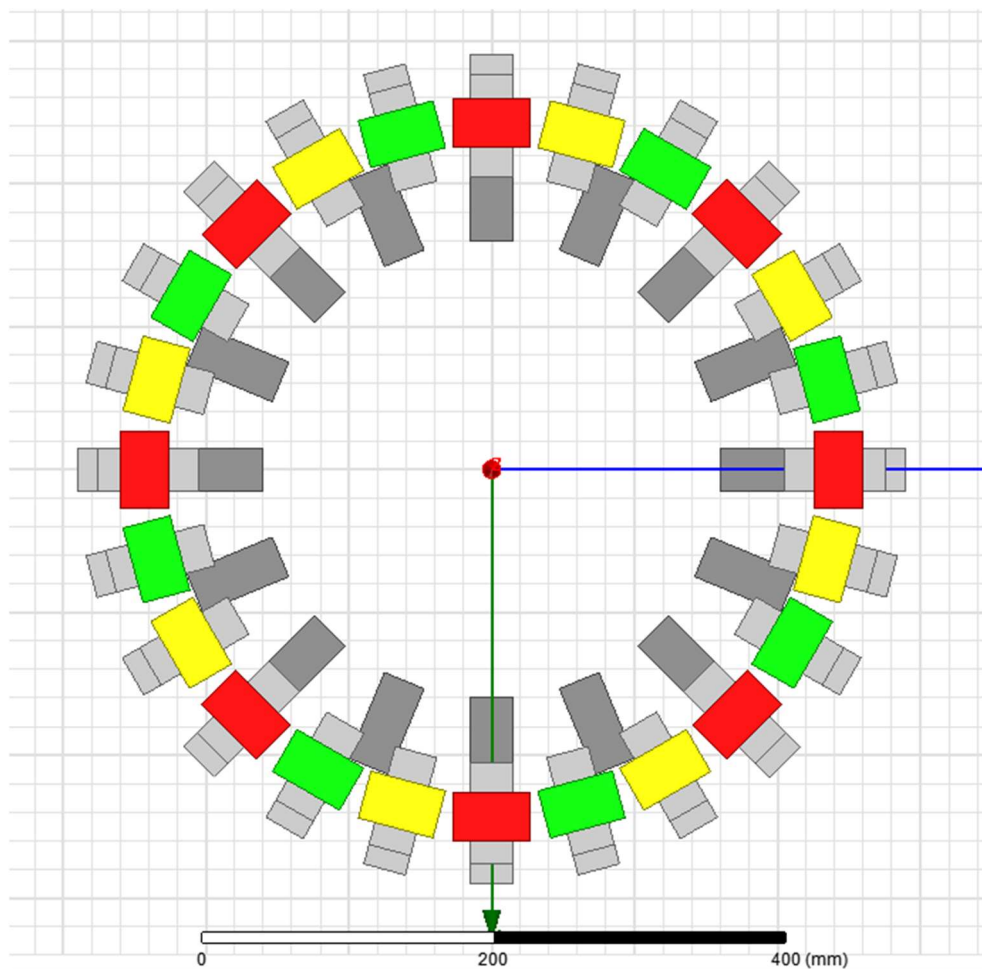
Há ainda que se calcular a massa esperada para a bobina. O volume esperado é de  $V_{\text{bobinas}} = 12,9 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  e a densidade do cobre de acordo com Beer (2015) é de  $\mu_{\text{cobre}} = 8910 \text{ kg/m}^3$ , portanto a massa esperada é dada pela equação 37.

$$m_{\text{bobinas}} = V_{\text{bobinas}} \times \mu_{\text{cobre}} = 11,4 \text{ kg} \quad (37)$$

Sendo assim, considerando apenas os núcleos e as bobinas, desconsiderando os suportes dos núcleos à cadeira, a massa esperada para o MRV é de  $M_{\text{simulado}} = 27 \text{ kg}$  que é menor que o valor especificado para a massa do MRV que era de  $m_{\text{motor}} = 27,5 \text{ kg}$  especificado no Capítulo 3.1.

### 3.3.2 Indutância e Torque Simulados

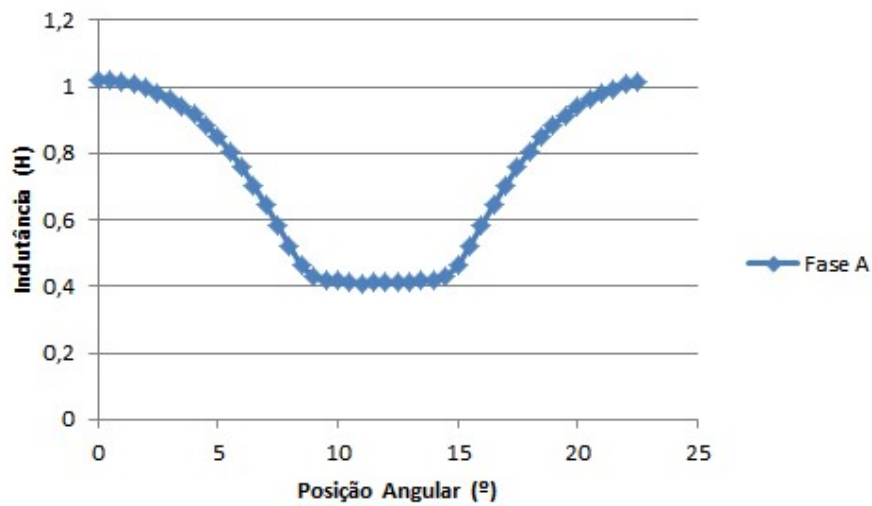
Como mencionado, o MRV foi projetado de forma a conter 24 núcleos de estator, 16 núcleos de rotor e 24 bobinas divididas em três fases de acionamento. O desenho da estrutura completa está apresentado na Figura 32.



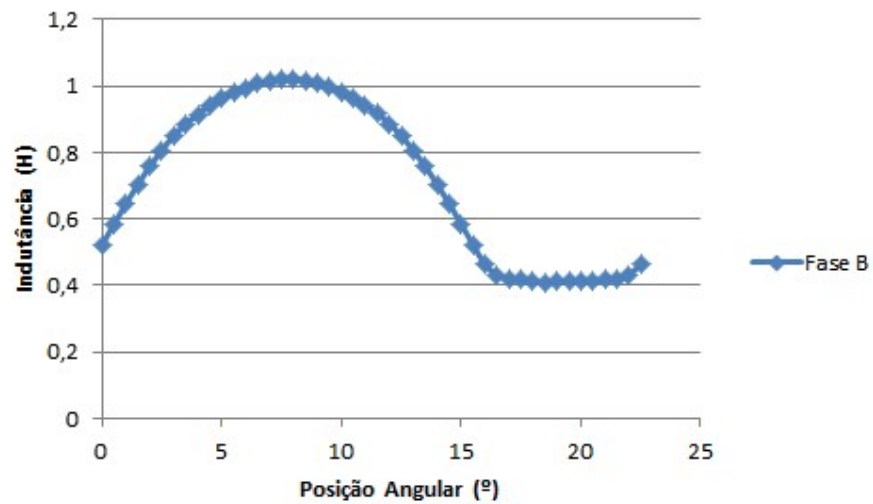
**Figura 32 – Estrutura completa do MRV desenhada no programa de simulação (Elaboração Própria).**

Na Figura 32, os núcleos de estator estão representados na cor cinza claro, os núcleos de rotor na cor cinza escuro e as bobinas estão representadas com relação a sua fase, onde a fase A está na cor vermelha, a fase B na cor verde e a fase C na cor amarela.

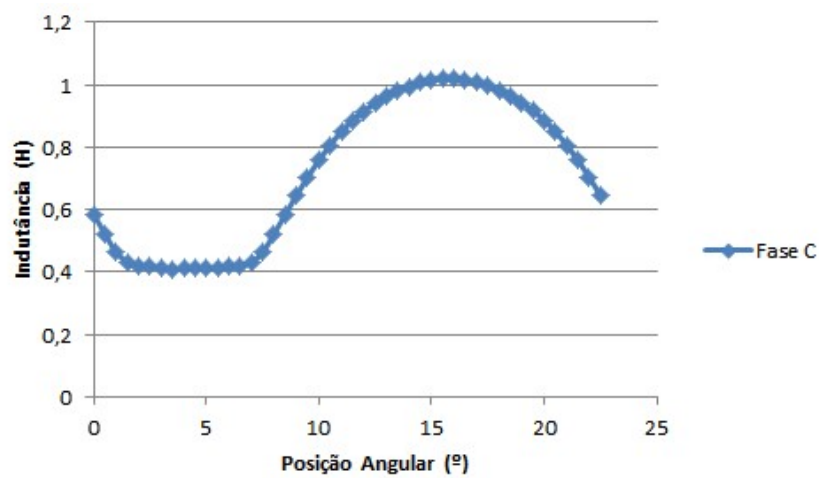
A partir do desenho acima e das especificações já mencionadas, foram obtidas, com o apoio do simulador, as curvas de indutância para o conjunto de bobinas de cada fase. A posição  $0^\circ$  para o rotor nos gráficos abaixo é a mesma posição em que o rotor está apresentado na Figura 32. Na Figura 33 está apresentado o resultado para as bobinas da fase A, na Figura 34 para as bobinas da fase B e na Figura 35 para as da fase C.



**Figura 33 - Indutância própria de uma bobina da Fase A (Elaboração Própria).**



**Figura 34 - Indutância própria de uma bobina da Fase B (Elaboração Própria).**



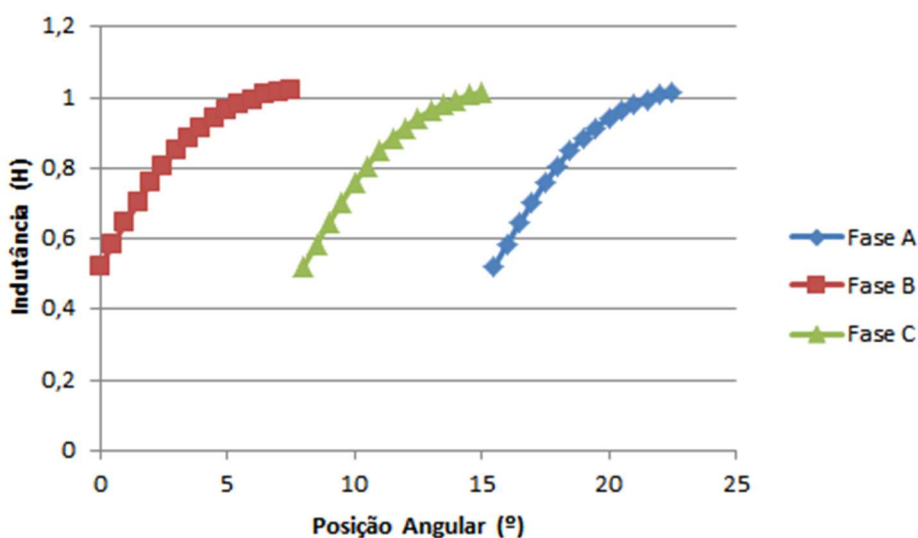
**Figura 35 - Indutância própria de uma bobina da Fase C (Elaboração Própria).**



Com os resultados obtidos para as indutâncias das bobinas, foi considerada como estratégia de acionamento, que as bobinas da fase A serão acionadas quando o rotor estiver entre as posições  $15^\circ$  e  $22,5^\circ$ , as bobinas da fase B serão acionadas quando o rotor estiver entre as posições  $0^\circ$  e  $7,5^\circ$  e as bobinas da fase C serão acionadas quando o rotor estiver entre as posições  $7,5^\circ$  e  $15^\circ$ . Essa escolha se deu pelo fato de que, nesses intervalos, a indutância própria dessas fases está crescendo à medida que a posição angular aumenta, e de acordo com Krishnan (2001) o torque gerado pelo MRV depende da derivada da indutância com relação à posição angular, sendo assim, quanto maior essa derivada maior será o torque obtido.

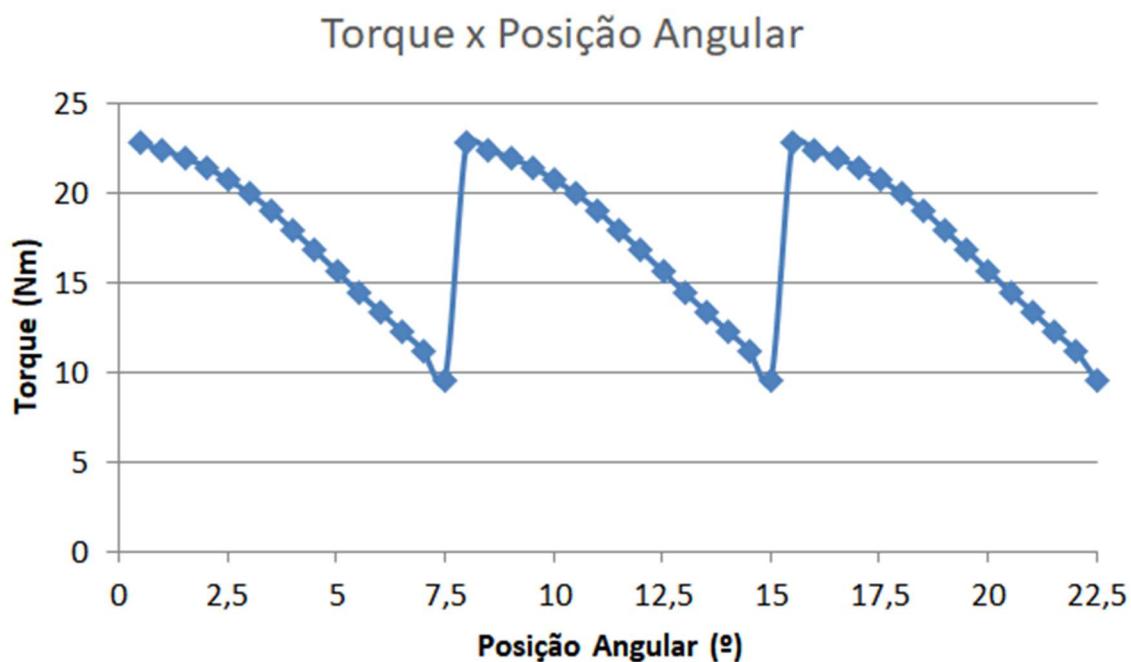
Essa sequência de acionamento será repetida a cada  $22,5^\circ$ , dando assim o movimento circular do motor.

Levando em consideração a estratégia de acionamento mencionada, foi obtida também a curva de indutâncias por fase em acionamento, conforme apresentado na Figura 36.



**Figura 36 - Indutância própria do conjunto de 8 bobinas que compõem cada fase durante seu acionamento (Elaboração Própria).**

Com o apoio do programa de simulação por elementos finitos, foi obtida uma curva de torque estático gerado por posição angular do rotor, considerando a aplicação de uma corrente de 2,5 A. Essa curva está apresentada na Figura 37.



**Figura 37 - Curva de torque em função da posição angular para o MRV simulado (Elaboração Própria).**

Os valores do torque gerado e da indutância para cada posição angular, variando 0,5° de uma faixa entre 0,5° e 7,5° estão dispostos na Tabela 1.

**Tabela 1 – Resultados da Simulação FEM para o Torque Gerado e Indutância.**

Posição Angular (°)	Torque Gerado (Nm)	Indutância (H)
0	22,784	0,52164
0,5	22,4168	0,584334
1	21,98	0,645894
1,5	21,4544	0,7037442
2	20,7632	0,758484
2,5	19,9968	0,807084
3	19,0448	0,8505162
3,5	17,928	0,8868042
4	16,8152	0,9147411
4,5	15,6632	0,942678
5	14,488	0,9616482
5,5	13,4048	0,9806184
6	12,3024	0,9936432
6,5	11,1072	1,006668
7	9,5784	1,0148328
7,5	0,148104	1,0229976

A partir dos valores obtidos, é possível calcular o torque médio gerado como sendo de  $\tau_{méd} = 17,32 Nm$ . Verifica-se que esse valor está acima do torque considerado como especificação para o projeto que era de  $\tau = 16,9 Nm$ , conforme estipulado no Capítulo 3.1.

Também se pode analisar a variação do torque a partir da equação 38.

$$T_{ripple} = \frac{T_{máx} - T_{mín}}{T_{méd}} \times 100\% \quad (38)$$

Onde  $T_{máx}$  é o torque máximo,  $T_{mín}$  é o mínimo,  $T_{méd}$  é o médio e  $T_{ripple}$  é o valor percentual da variação de torque.

Usando a equação 38, com os valores de torque entre 0 e 7 graus, para se retirar o torque próximo de zero, obtêm-se um valor de 76,2% para a variação do torque.

### 3.4 Proposta de Controle

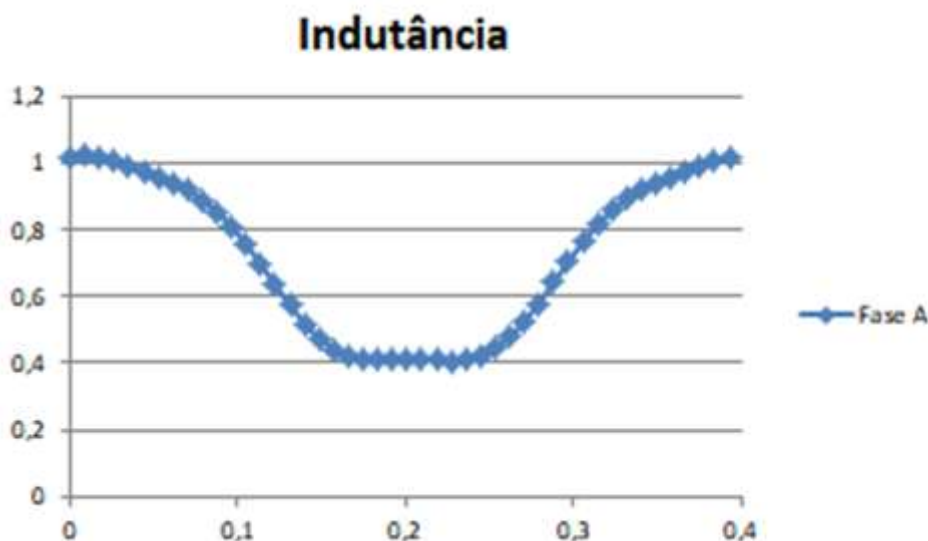
Inicialmente, foi realizada a parametrização da curva de indutância obtida a partir das simulações por elementos finitos com apoio da ferramenta CurveFitting do software Matlab.

É importante ressaltar que para obter a curva de indutância e, posteriormente, a curva da derivada da indutância foi necessário utilizar valores para a posição angular em radianos ao invés do valor usual em graus. Isso ocorre, pois a derivada da indutância que aparece na equação (34) deverá ser calculada na unidade de H/rad (Henry por radiano) e não em H/° (Henry por grau).

A função obtida para a indutância da fase A, com um coeficiente de determinação  $R^2=0,9994$ , foi:

$$L_A(\theta) = 1,959sen(8,033\theta - 0,0708) + 1,582sen(11,62\theta + 2,337) + 0,03216sen(56,99\theta - 3,794) \quad (39)$$

Onde  $L_A$  é a indutância da fase A e  $\theta$  é a posição angular em radianos. A curva de indutância parametrizada está apresentada na Figura 38.

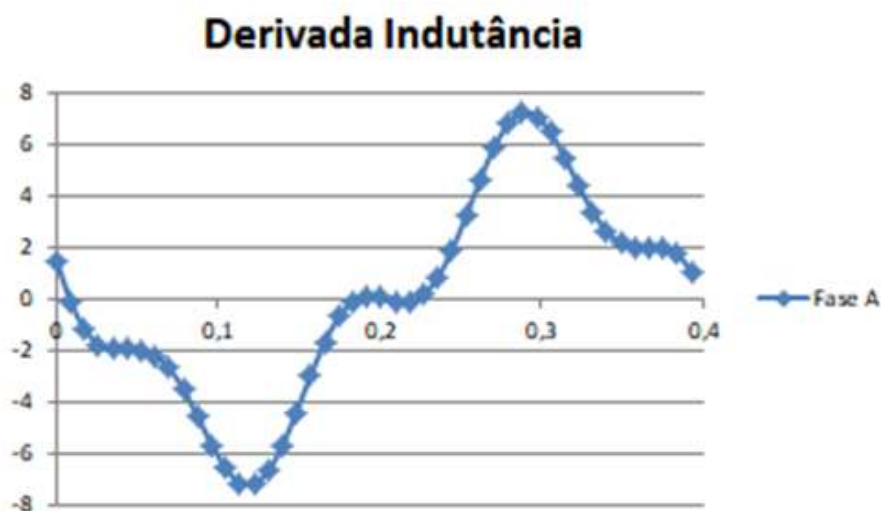


**Figura 38 – Curva de indutância obtida a partir da parametrização da ferramenta CurveFitting (Elaboração Própria).**

Também foi necessário obter a derivada da indutância. A derivada da função parametrizada foi calculada como:

$$\frac{\partial L_A(\theta)}{\partial \theta} = 15,7366 \cos(8,033\theta - 0,0708) + 18,3828 \cos(11,62\theta + 2,337) + 1,8328 \cos(56,99\theta - 3,794) \quad (40)$$

Onde  $L_A$  é a indutância da fase A e  $\theta$  é a posição angular do rotor em radianos. A curva da derivada da indutância com relação à posição angular está apresentada na Figura 39.

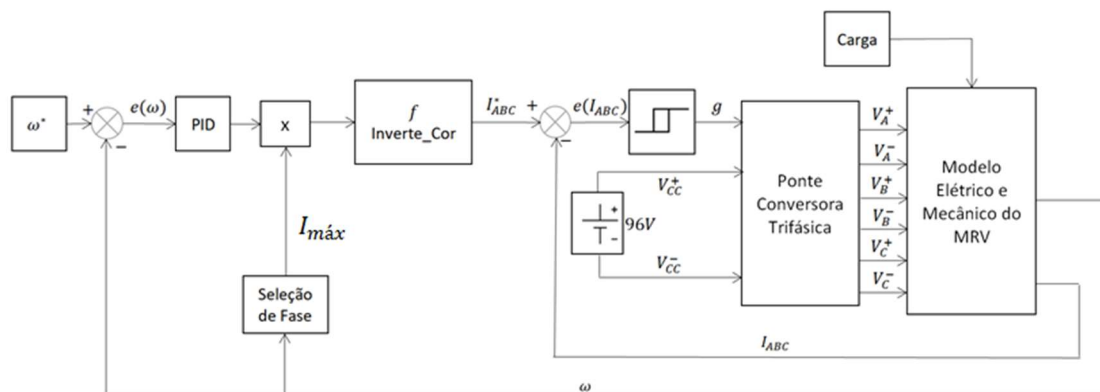


**Figura 39 – Curva da derivada da Indutância obtida a partir da derivada da função parametrizada da ferramenta Curve Fitting (Elaboração Própria).**

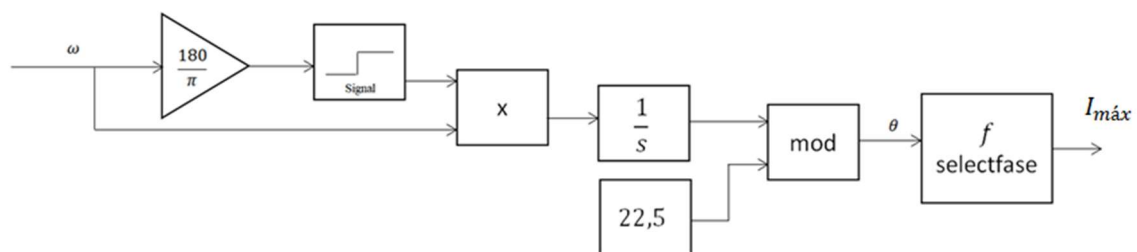
O controle proposto foi realizado com apoio da ferramenta Simulink do software Matlab. Nele foi considerado um controlador de velocidade angular, do tipo PID, cuja entrada é o erro da velocidade. Através de diversas tentativas, foram obtidos os seguintes parâmetros de controle: proporcional igual a 100; derivativo igual a 0,1; e integral igual a 0,1. Um esquema para a simulação é mostrado na Figura 40 e também, o diagrama real utilizado, no Anexo B.

Para obter o sinal de referência de corrente da fase que deverá entrar em condução, a saída do controlador PID, limitada entre -1 e 1, é multiplicada pela corrente máxima de operação  $I_{m\acute{a}x}$ , obtida a partir do bloco Seleção de Fase para a Corrente. O controle da corrente da fase é feito via um comparador de histerese com uma banda de corrente entre 0,01 A e -0,01 A.

O bloco Seleção de Fase para a Corrente é mostrado em detalhe na Figura 41.



**Figura 40 – Esquema de controle simulado (Elaboração Própria).**



**Figura 41 – Bloco Seleção de Fase para Corrente (Elaboração Própria).**

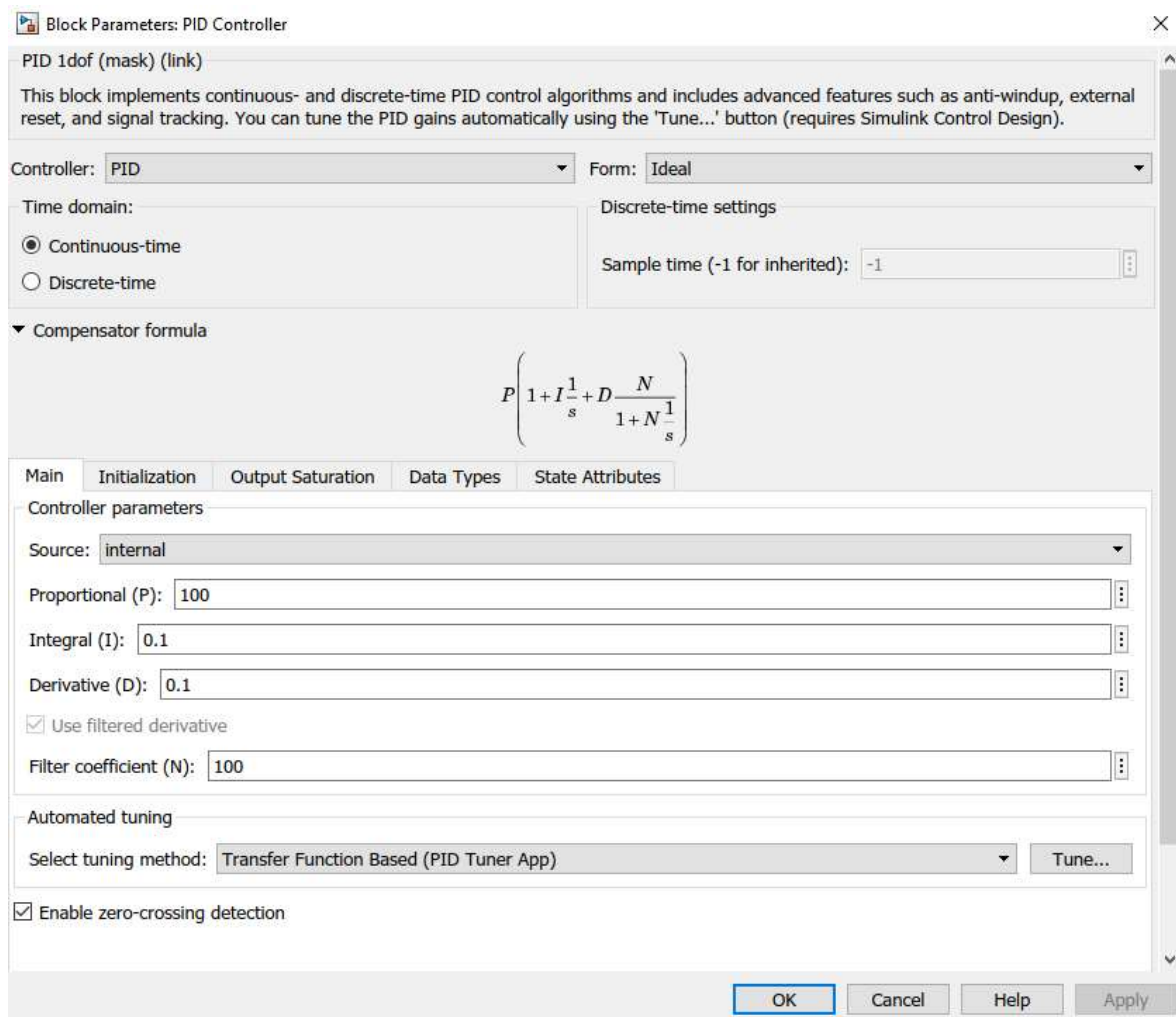
Vê-se na Figura 40 que foi utilizado um conversor que, alimentado por uma bateria de 96 V, gera as tensões das fases A, B e C, a partir do sinal recebido do comparador de histerese. Percebe-se na Figura 41 que a corrente máxima de operação é obtida a partir da

posição angular do rotor que é entregue a função “selectfase” em intervalos de 22,5°. A função “selectfase” está apresentada no Anexo C.

Como uma estratégia para obter-se torque negativo, isso é, no sentido contrário ao da rotação do motor, foi utilizada a função “Inverte\_Corrente”. Quando o sinal de controle da corrente é negativo, isso significa que o controlador está demandando um torque negativo a fim de reduzir a velocidade do motor. No entanto, como discutido anteriormente, a polaridade da corrente para o MRV não altera o torque gerado. Para que a inversão da direção do torque ocorra, a função “Inverte\_Corrente” substitui o sinal negativo de corrente por um sinal positivo de corrente de mesmo valor na fase onde a derivada da indutância é negativa.

A função “Inverte\_Corrente” está mostrada no Anexo D.

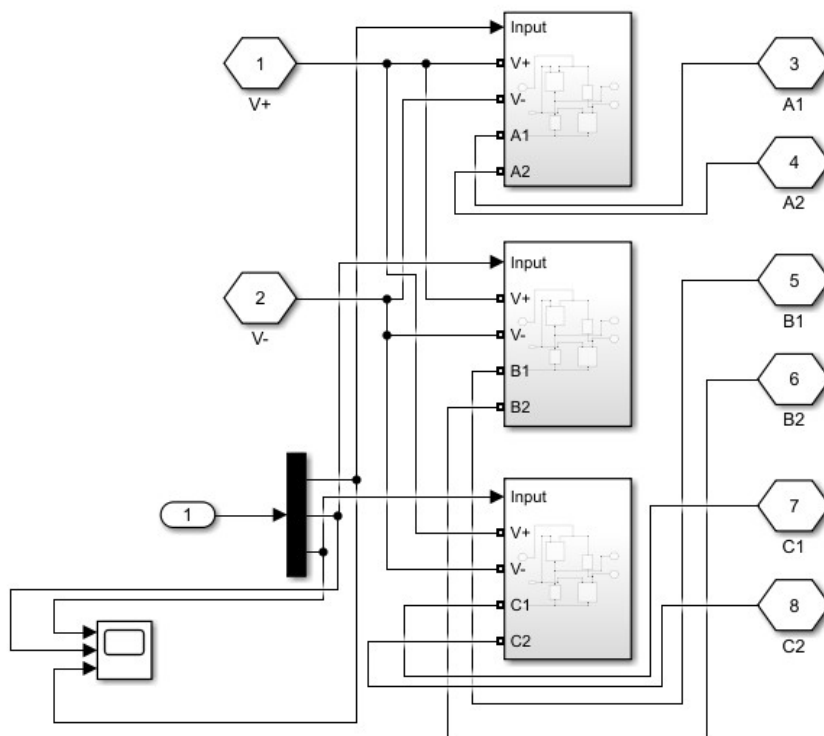
Na Figura 42 são mostrados os detalhes internos do bloco referente ao controlador PID.



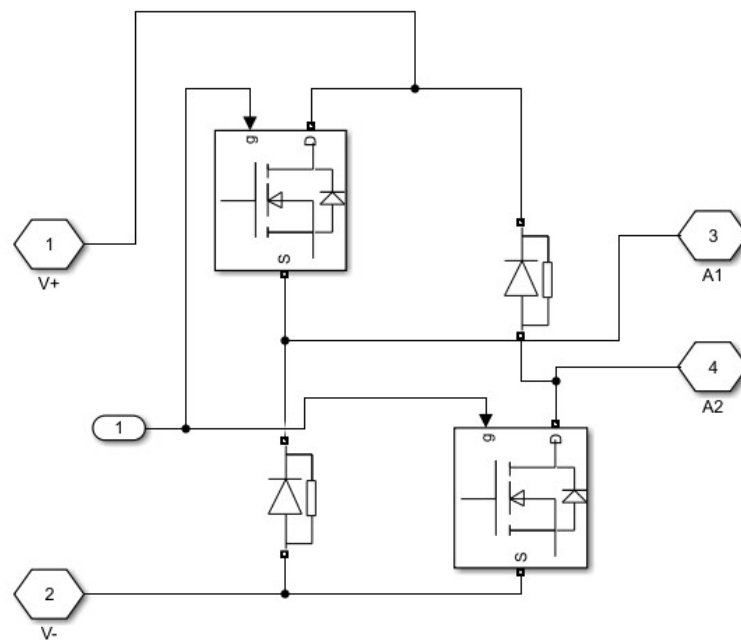
**Figura 42 – Configurações do PID Utilizadas no Simulink (Elaboração Própria).**

A Figura 43 mostra o diagrama de blocos do acionamento eletrônico das três fases. O seu sinal de entrada 1 é composto por três sinais, sendo cada um referente a uma corrente de fase. As bobinas são conectadas aos terminais A1, A2, B1, B2, C1 e C2. A Figura 44 mostra os detalhes internos do conversor assimétrico da fase A.

As pontes conversoras são alimentadas pela tensão contínua de 96 V de uma bateria ideal, sendo que estas geram tensões positivas e negativas em cada uma das fases.

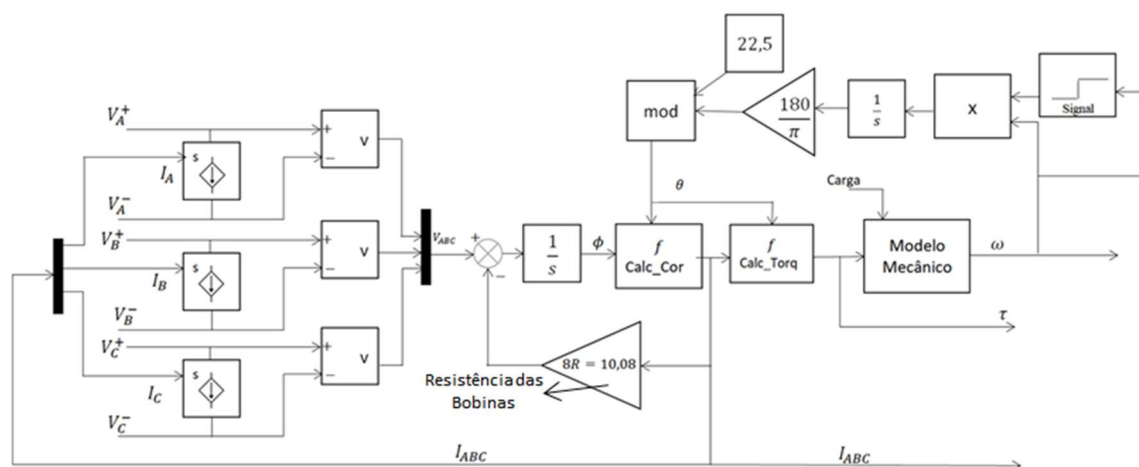


**Figura 43 – Conversor composto de pontes conversoras assimétricas (Elaboração Própria).**



**Figura 44 – Ponte Conversora Assimétrica da fase A (Elaboração Própria).**

Para simular o funcionamento do MRV foi conectada a saída do conversor uma fonte de corrente dependente que serve como um modelo de carga. Essa fonte possui igual valor a corrente estimada do modelo elétrico. Dessa forma, o conversor estará funcionando como se estivesse conectado ao MRV e será possível obter o sinal de tensão elétrica gerada ao se conectar um voltímetro na saída do conversor. Esse sinal de tensão elétrica será utilizado no modelo elétrico, cujo esquema é mostrado na Figura 45. A modelagem utilizada no simulador é apresentada no Anexo E.



**Figura 45 – Esquema do Modelo Elétrico do MRV (Elaboração Própria).**



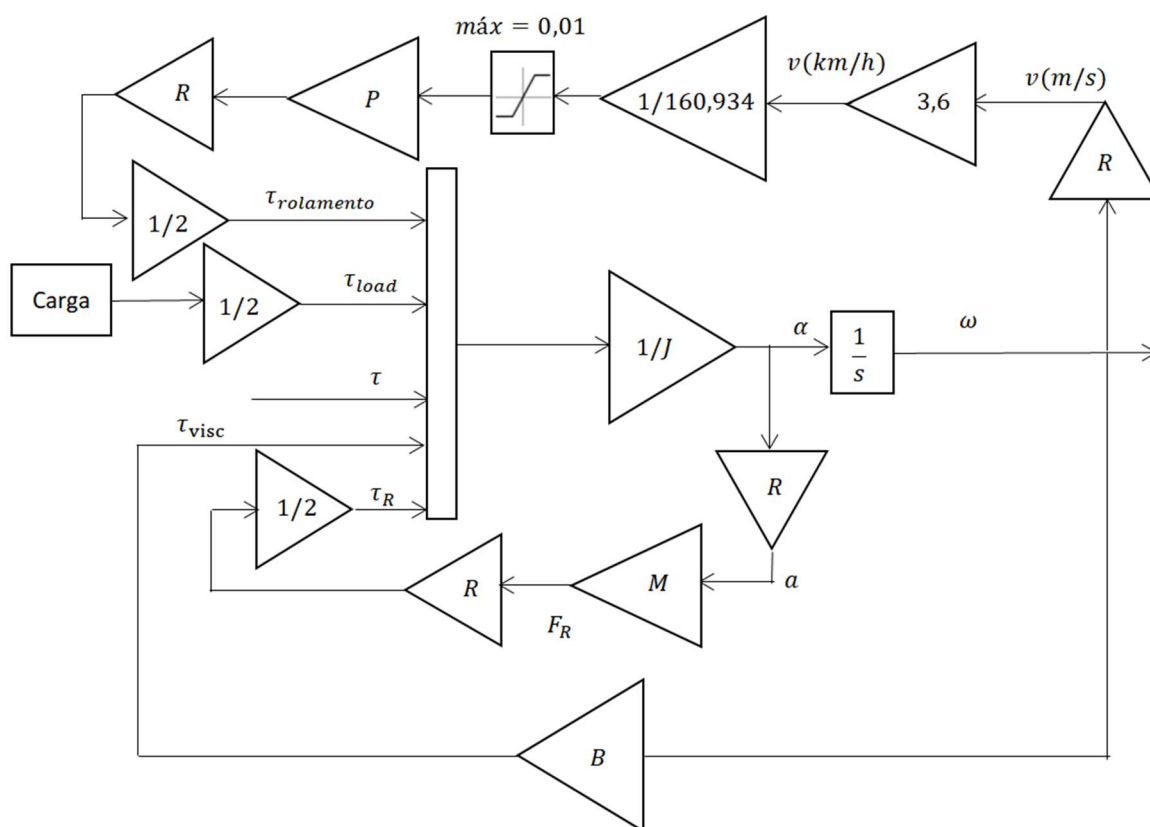
Nesse diagrama, a tensão medida, proveniente do circuito conversor, é subtraída da queda de tensão gerada pelas resistências das bobinas e a tensão resultante é logo integrada para se obter o fluxo magnético. Com o fluxo e a posição angular do rotor, são realizados cálculos para obter a corrente e o conjugado eletromagnético gerado. Esses cálculos estão apresentados nos Anexos F e G.

O conjugado eletromagnético é então subtraído dos seguintes conjugados: do conjugado de carga ( $\tau_{load}$ ) que, neste caso, está associado ao seno do ângulo de inclinação da rampa onde o veículo se encontra em movimento, em concordância com a equação 11; do conjugado referente à aceleração linear do sistema ( $\tau_R$ ); do conjugado de atrito viscoso referente ao atrito do eixo do motor ( $\tau_{visc}$ ); do conjugado de atrito de rolamento da roda ( $\tau_{rolamento}$ ), que de acordo com GILLESPIE (1992), é obtido a partir da multiplicação do peso da estrutura com o raio da roda e com o coeficiente de atrito de rolamento  $f_0$ , onde foi utilizado o coeficiente de 0,01, referente a um solo de cimento liso, sendo que para velocidades abaixo de 1,60km/h, foi utilizado um coeficiente dependente da velocidade linear do sistema, conforme a equação 41.

$$f_0 = \frac{v}{160,934} \quad (41)$$

Onde  $f_0$  é o coeficiente de atrito de rolamento para baixas velocidades e  $v$  é a velocidade linear do sistema em km/h.

Esses conjugados, com exceção do conjugado de atrito viscoso, foram divididos por dois, pois se considera que a cadeira de rodas seria movimentada por dois motores, um em cada roda. Esses cálculos são realizados no bloco denominado de Modelo Mecânico da Figura 45 e detalhados na Figura 46.



**Figura 46 –Esquema do Modelo Mecânico do MRV (Elaboração Própria).**

A partir do modelo mecânico são obtidas a velocidade angular do MRV em radianos por segundo e a posição angular do MRV em radianos.

Reunindo-se as informações obtidas do modelo mecânico e as demais usadas no bloco de funcionamento do MRV, têm-se ao todo: as tensões por fase (em volts), as correntes por fase (em Ampère), os fluxos por fase (em volts por segundo), o torque eletromagnético (em Newton metro), a velocidade angular (em radianos por segundo) e a posição angular do rotor (em radianos).

Todas essas informações permitirão verificar a eficiência da estratégia de controle de velocidade do motor e da sua capacidade para a geração de torque apropriado nas condições de operação descritas no capítulo 4, onde também são apresentados os resultados simulados deste trabalho.

## Capítulo 4 - Resultados Simulados

A fim de se testar a estratégia de controle e o MRV propostos, foram simuladas 3 condições de movimento para a cadeira de rodas e em seguida foram analisadas a velocidade do motor (em rad/s), o torque gerado (em Newton-metro) e as correntes de fase (em Ampére). Em todas essas movimentações, o controle foi realizado sobre a velocidade angular do motor, conforme explicado anteriormente na seção 3.4.

As locomoções simuladas contemplam: em 4.1, uma movimentação acelerada, até atingir uma velocidade de regime permanente partindo do repouso, em plano reto, e então uma desaceleração de volta ao repouso; em 4.2, uma movimentação acelerada, partindo de uma velocidade não nula, em plano reto, e então uma desaceleração voltando à mesma velocidade inicial; e em 4.3, uma movimentação com velocidade constante em plano inclinado.

Com relação aos tempos de simulação: em 4.1 e em 4.2, foram simulados 30 segundos; e em 4.3, foram simulados 60 segundos.

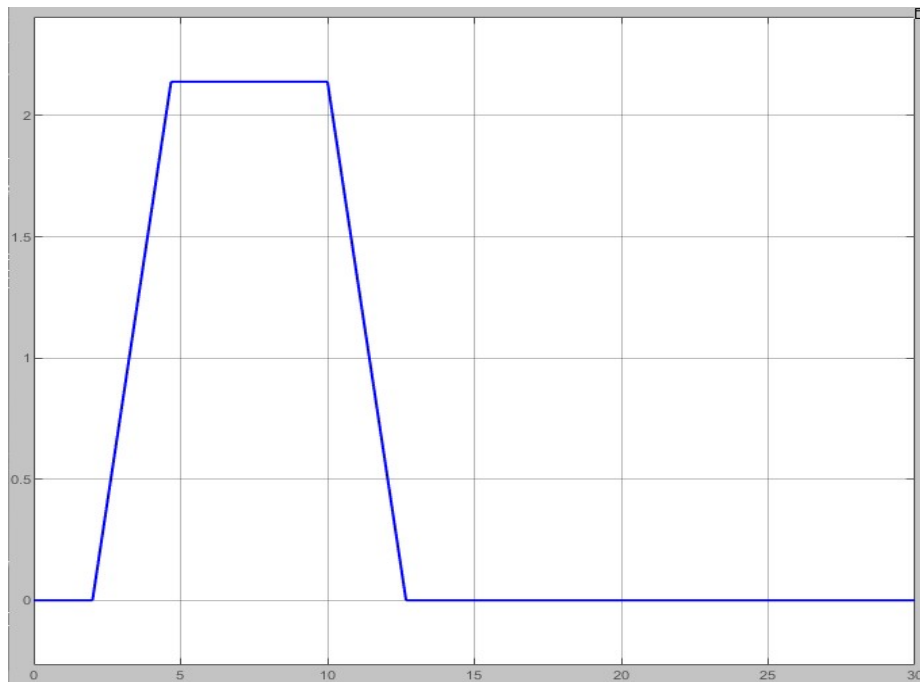
### 4.1 Movimento Partindo do Repouso

Nessa simulação, foi considerada que a cadeira de rodas está inicialmente em repouso e, do tempo 2s até o tempo 4,7s, o sinal de referência do controlador para a velocidade angular sobe em uma rampa indo de 0rad/s até 2,14 rad/s (2 km/h aprox.) Posteriormente, do tempo 10 s até 12,7 s, a referência retorna para 0 rad/s (0km/h).

O sinal de referência de velocidade está apresentado na Figura 47.

Após a simulação, a resposta da velocidade de rotação do motor, em rad/s, foi registrada e está apresentada na Figura 48. Percebe-se que o método de controle foi eficaz em elevar a velocidade do motor partindo do repouso até um valor especificado e depois acelerar até o repouso.

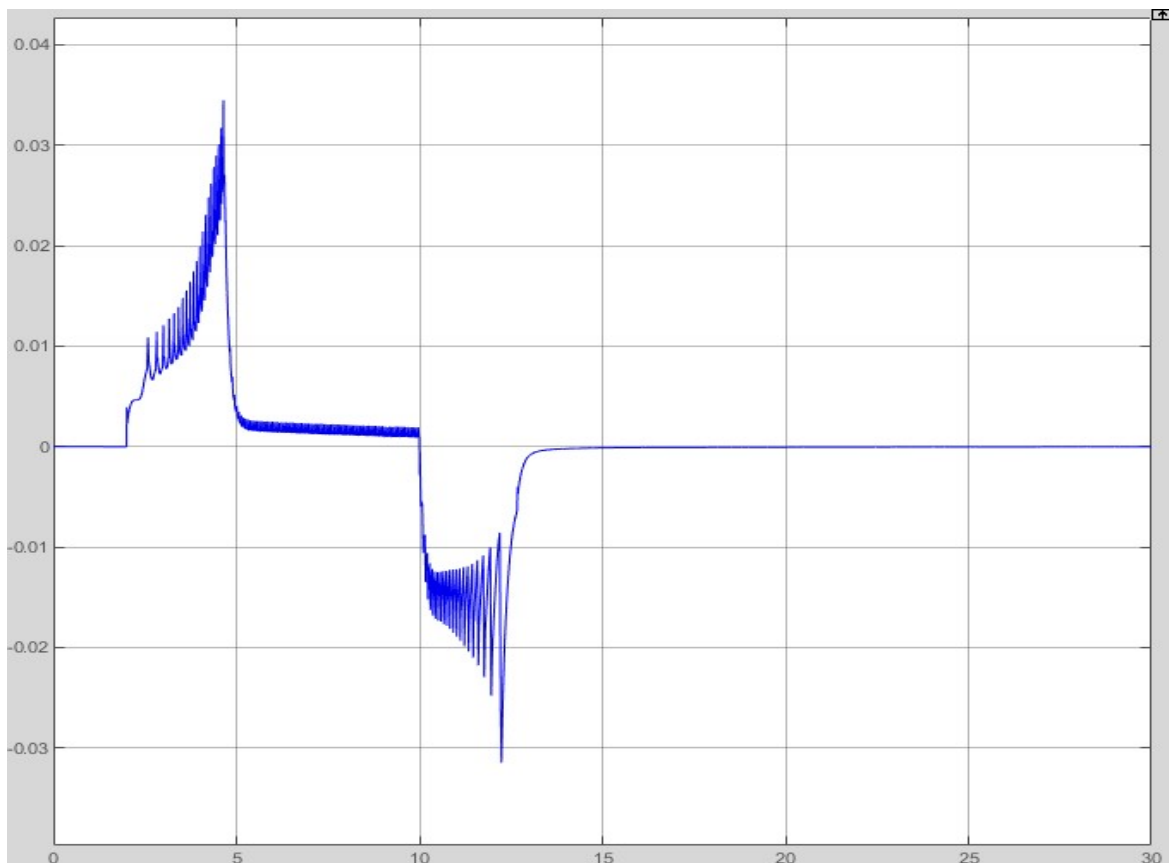
Pode-se ainda avaliar o sinal referente ao erro da velocidade angular entregue ao controlador PID, apresentado na Figura 49. Percebe-se que o erro, em módulo, fica abaixo de 0,03rad/s.



**Figura 47 – Sinal de referência para a velocidade angular na Movimentação Partindo do Repouso. Escalas: Ver:0,5 rad/s/div; Hor:5 s/div (Elaboração Própria).**



**Figura 48 – Velocidade de rotação do motor na Movimentação Partindo do Repouso. Escalas: Ver:0,5 rad/s/div; Hor: 5 s/div (Elaboração Própria).**

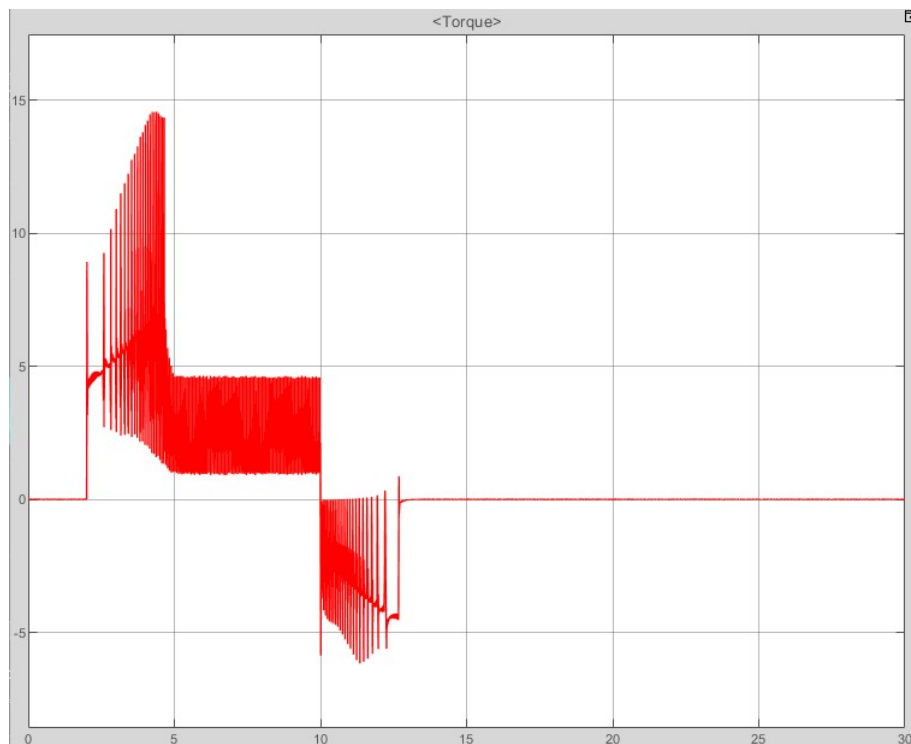


**Figura 49 – Sinal de erro da velocidade angular entregue ao PID na Movimentação Partindo do Repouso. Escalas: Ver: 0,01 rad/s; Hor: 5 s/div (Elaboração Própria).**

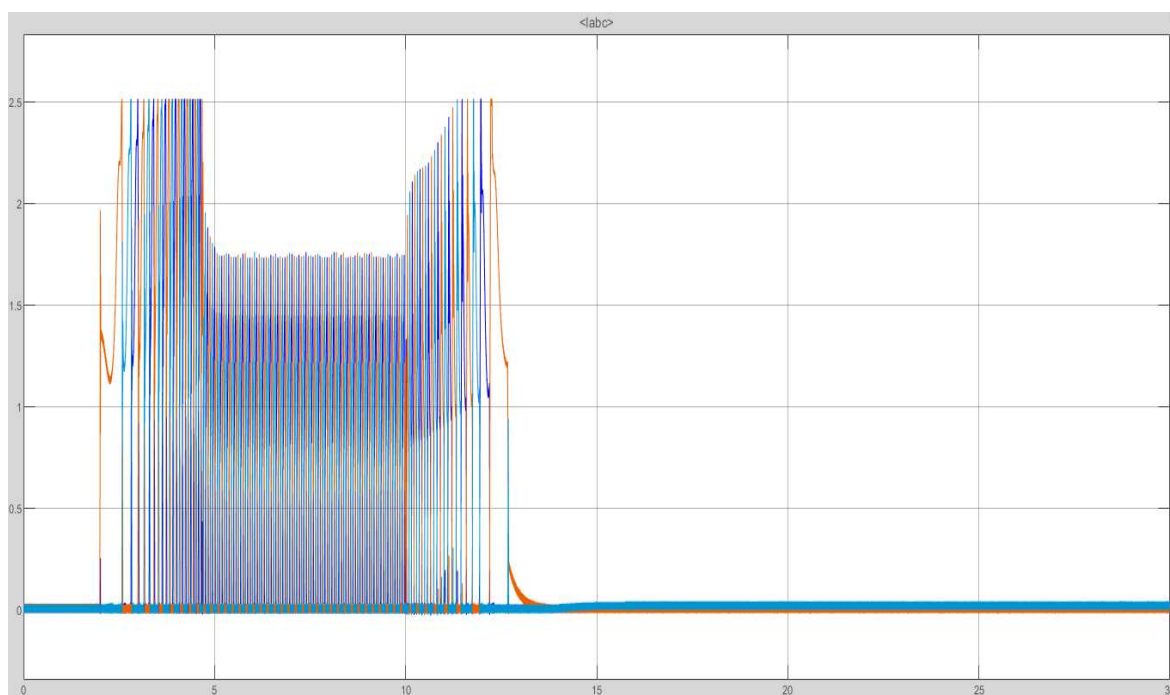
Com relação ao torque eletromagnético gerado e às correntes de fase, estes estão apresentados nas Figura 50 e Figura 51, respectivamente.

Sobre o torque eletromagnético, observa-se a capacidade do sistema de controle de gerar torque negativo.

Sobre as correntes de fase, durante a aceleração e a desaceleração, foram obtidos sinais aproximadamente retangulares com o topo sendo igual ao valor máximo de corrente especificada para o motor.



**Figura 50 – Torque eletromagnético gerado na Movimentação Partindo do Repouso. Escalas: Ver: 5 Nm/div; Hor: 5 s/div (Elaboração Própria).**



**Figura 51 – Correntes de fase na movimentação partindo do repouso. Escalas: Ver: 0,5 A/div; Hor: 5 s/div (Elaboração Própria).**

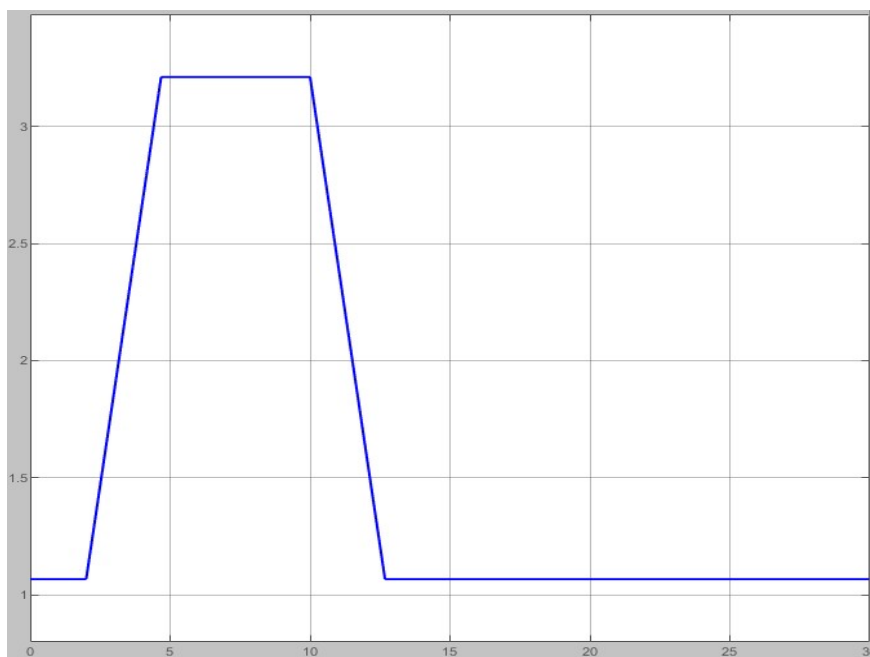
## 4.2 Movimento Acelerado em Plano Reto

Foi considerada uma movimentação onde a cadeira de rodas se desloca com uma velocidade de 1,068 rad/s (1 km/h aprox.) e, do tempo 2 s até o tempo 4,7 s, a referência da velocidade angular consiste de uma rampa indo de 1,068 rad/s até 3,21 rad/s (3 km/h aprox.). Posteriormente, do tempo de 10 s até o tempo de 12,7 s, a referência retorna até 1,068 rad/s. Esta referência é apresentada na Figura 52.

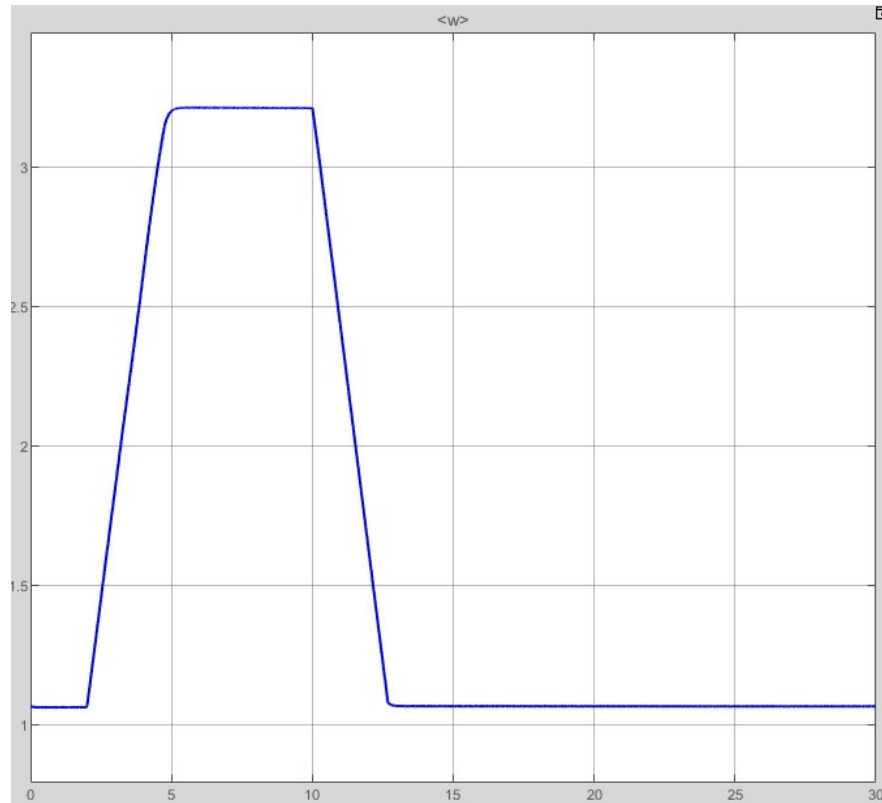
Após a simulação, a resposta da velocidade de rotação do motor está apresentada na Figura 53. Percebe-se que o controlador foi eficaz em elevar a velocidade até o valor especificado e depois reduzi-la de volta ao valor anterior.

Pode-se ainda analisar o sinal de erro da velocidade angular entregue ao PID, e conforme apresentado na Figura 54, o erro, em módulo, está abaixo de 0,1 rad/s durante a aceleração e abaixo de 0,02 rad/s durante a desaceleração.

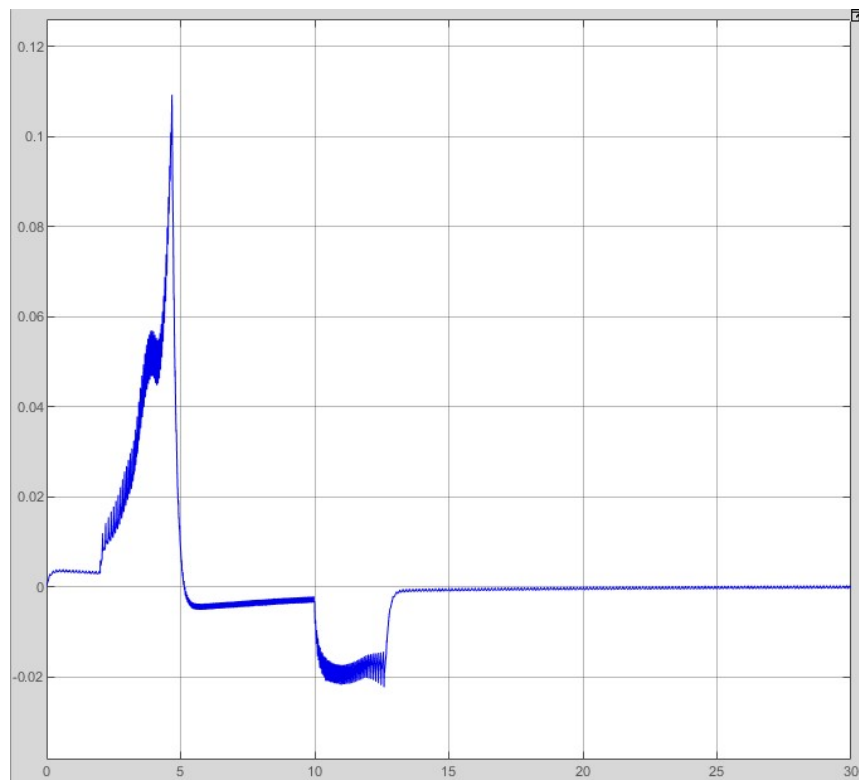
O menor erro durante a desaceleração pode ser explicado devido que, durante esse processo, o torque de atrito causa uma desaceleração por si só, fazendo com que a velocidade diminua mais rapidamente, enquanto que na aceleração, o torque do atrito é contrário ao do motor, dificultando o acréscimo de velocidade. Nota-se que a referência da velocidade máxima foi maior que a do caso 4.1.



**Figura 52 – Sinal de referência para a velocidade angular na Movimentação Acelerada em Plano Reto. Escalas: Ver:0,5 rad/s/div; Hor:5 s/div (Elaboração Própria).**



**Figura 53 – Velocidade de rotação do motor na Movimentação Acelerada em Plano Reto. Escalas: Ver: 0,5 rad/s/div; Hor:5 s/div (Elaboração Própria).**

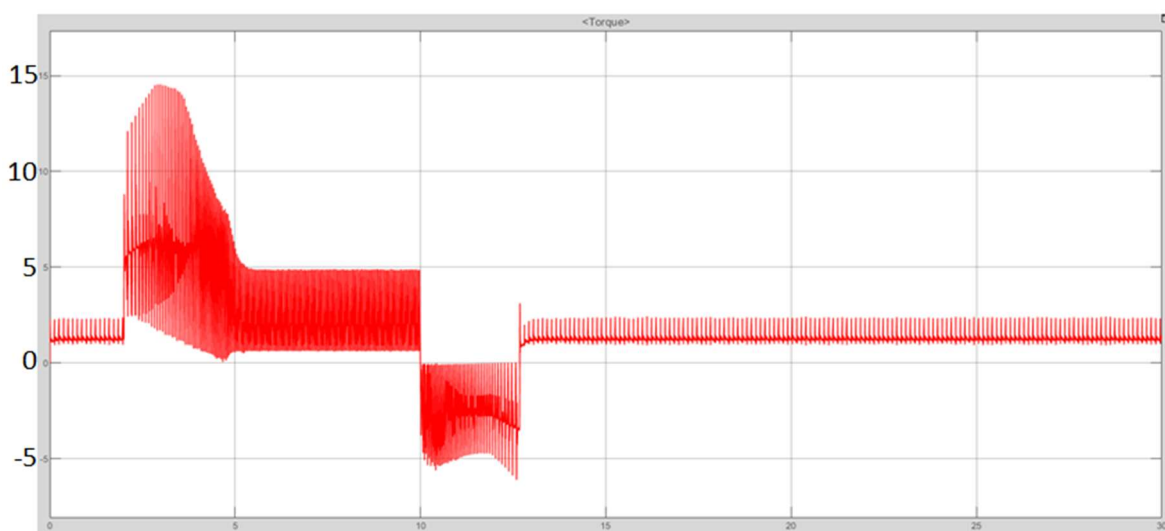


**Figura 54 – Sinal de erro da velocidade angular entregue ao PID na Movimentação Acelerada em Plano Reto. Escalas: Ver:0,02 rad/s/div; Hor: 5 s/div (Elaboração Própria).**

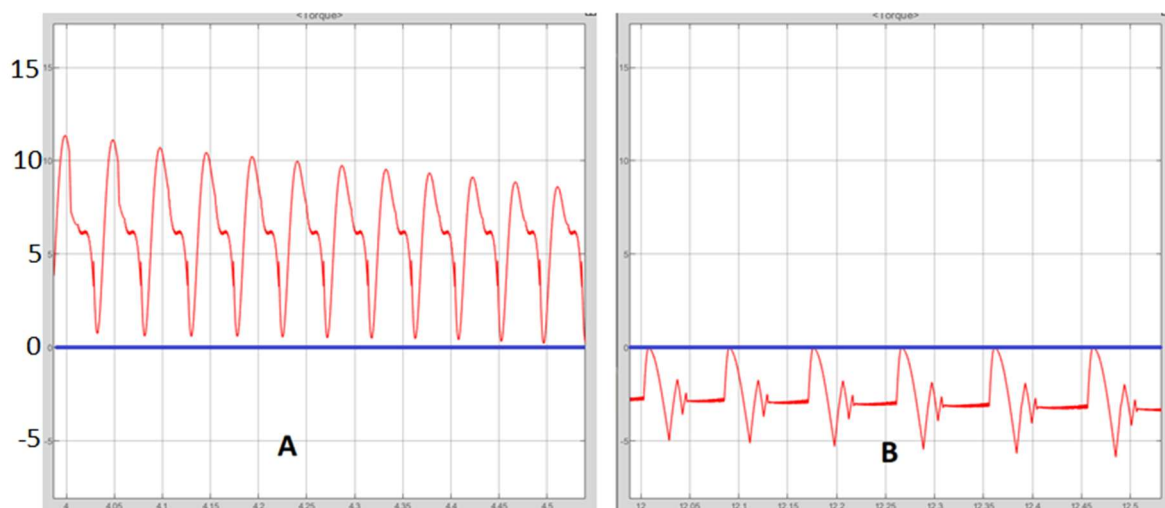


Com relação ao torque eletromagnético obtido, este está apresentado na Figura 55 e ampliado na Figura 56. Percebe-se que durante a movimentação sem aceleração, é gerado um torque eletromagnético médio na ordem de 2 Nm. Esse torque é responsável por se opor aos torques de atrito viscoso e de rolamento.

Também se pode perceber que o torque durante a desaceleração, em módulo, é menor que durante a aceleração. Isso também pode ser explicado pelo fato do torque de atrito gerar uma desaceleração por si só.



**Figura 55 – Torque eletromagnético gerado na Movimentação Acelerada em Plano Reto. Escalas: Ver: 5 Nm/div; Hor: 5 s/div (Elaboração Própria).**

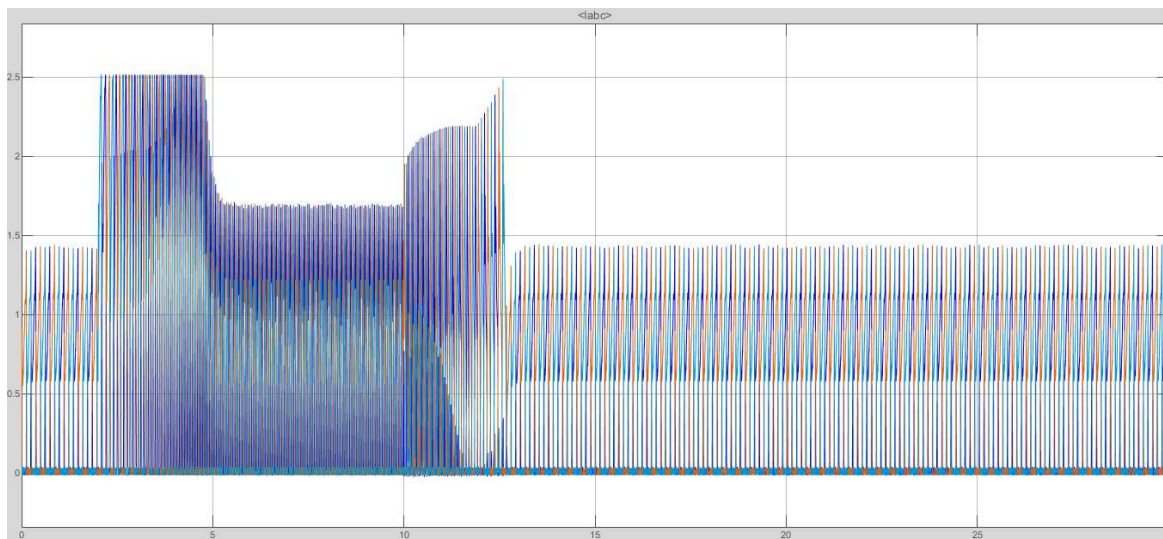


**Figura 56 – Torque eletromagnético gerado, onde em A têm-se o torque entre 4,0 s e 4,5 s e em B têm-se o torque entre 12,0 s e 12,5 s. A linha azul escura indica o valor zero para o torque. Escalas: Ver:5 Nm/div; Hor: 0,05 s/div (Elaboração Própria).**

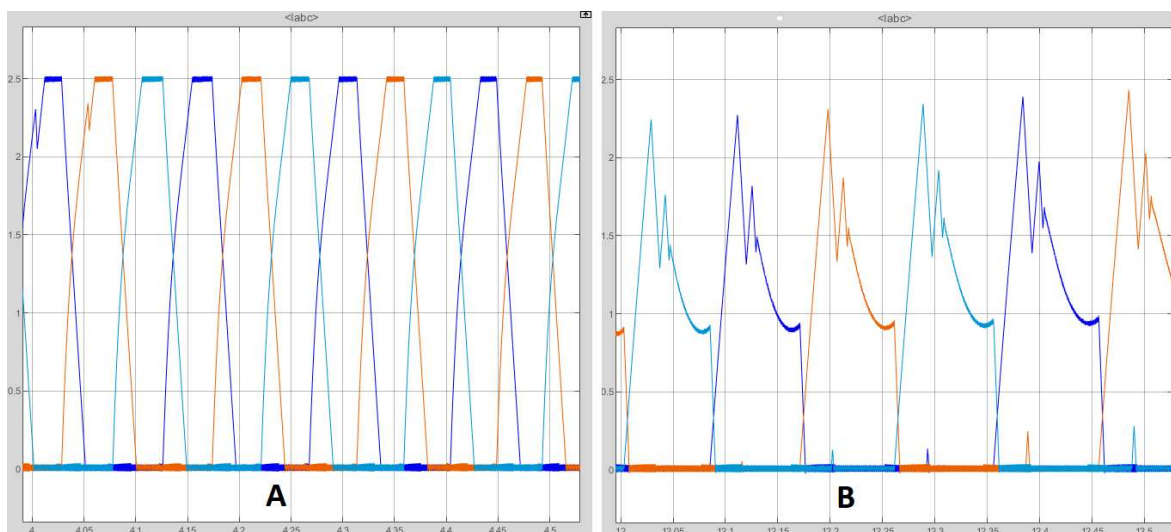
Percebe-se na Figura 56 que há uma elevada variação no torque eletromagnético gerado. Nas demais movimentações, essa variação irá se manter, o que mostra que a

estratégia de controle teria que ser aperfeiçoada para reduzir o ripple de torque, que poderá ser capaz de produzir ruídos e vibrações no motor [SANCHES, 2015].

As correntes de fase estão apresentadas na Figura 57 e ampliadas na Figura 58.



**Figura 57 – Correntes de fase na Movimentação Acelerada em Plano Reto. Escalas: Ver:0,5 A/div; Hor: 5 s/div (Elaboração Própria).**



**Figura 58 – Correntes de fase, onde em A têm-se os valores para o tempo entre 4,0 s e 4,5 s e em B têm-se os valores entre 12,0 s e 12,5 s. Escalas: Ver:0,5 A/div; Hor: 0,05 s/div (Elaboração Própria).**

Pode-se observar que, durante a aceleração, a corrente chega ao valor limite imposto para o MRV (2,5 A) e seu sinal é aproximadamente trapezoidal, indicando que, nessa movimentação, o motor está sendo altamente demandado. Para a desaceleração, o mesmo não ocorre.

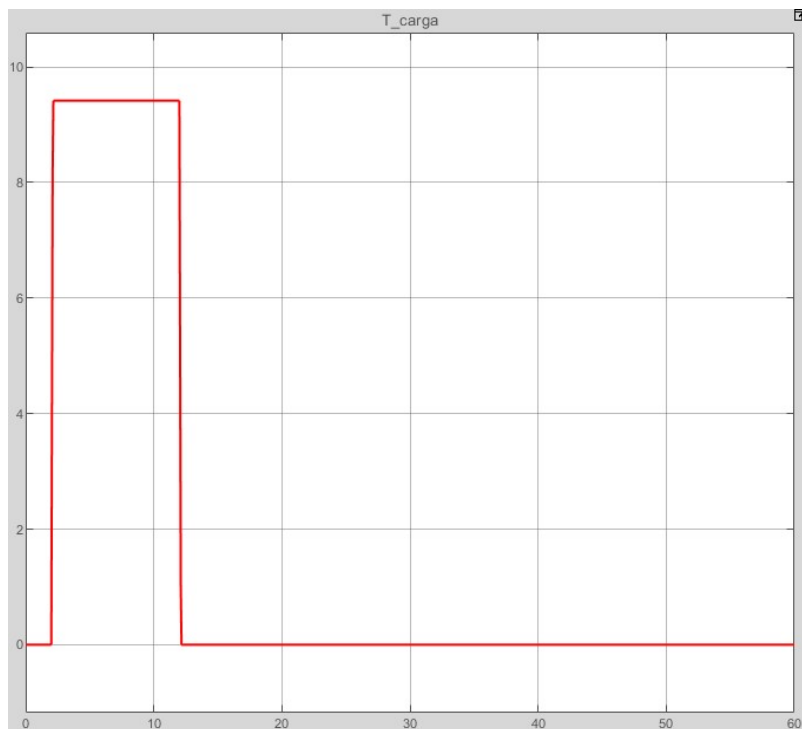
### 4.3 Movimentação em Plano Inclinado

Nesta análise foi considerado que existia inicialmente um movimento com velocidade constante. Por conta disso, o comparador recebeu um sinal de referência constante no valor de 1,068 rad/s (1 km/h aprox.).

Para esta simulação, foi considerada uma superfície de deslocamento em rampa com um ângulo de inclinação igual a  $0,7^\circ$ , o que resulta, aproximadamente, em um seno de 0,012. De acordo com o capítulo 3.1, o ângulo de inclinação da rampa que a cadeira de rodas deveria ser capaz de movimentar-se seria de  $4,76^\circ$ . No entanto, ao realizar-se a simulação, utilizando este valor de inclinação, o motor e a estratégia de controle propostos não foram capazes de manter a velocidade da cadeira de rodas, de forma que se optou por um ângulo menor.

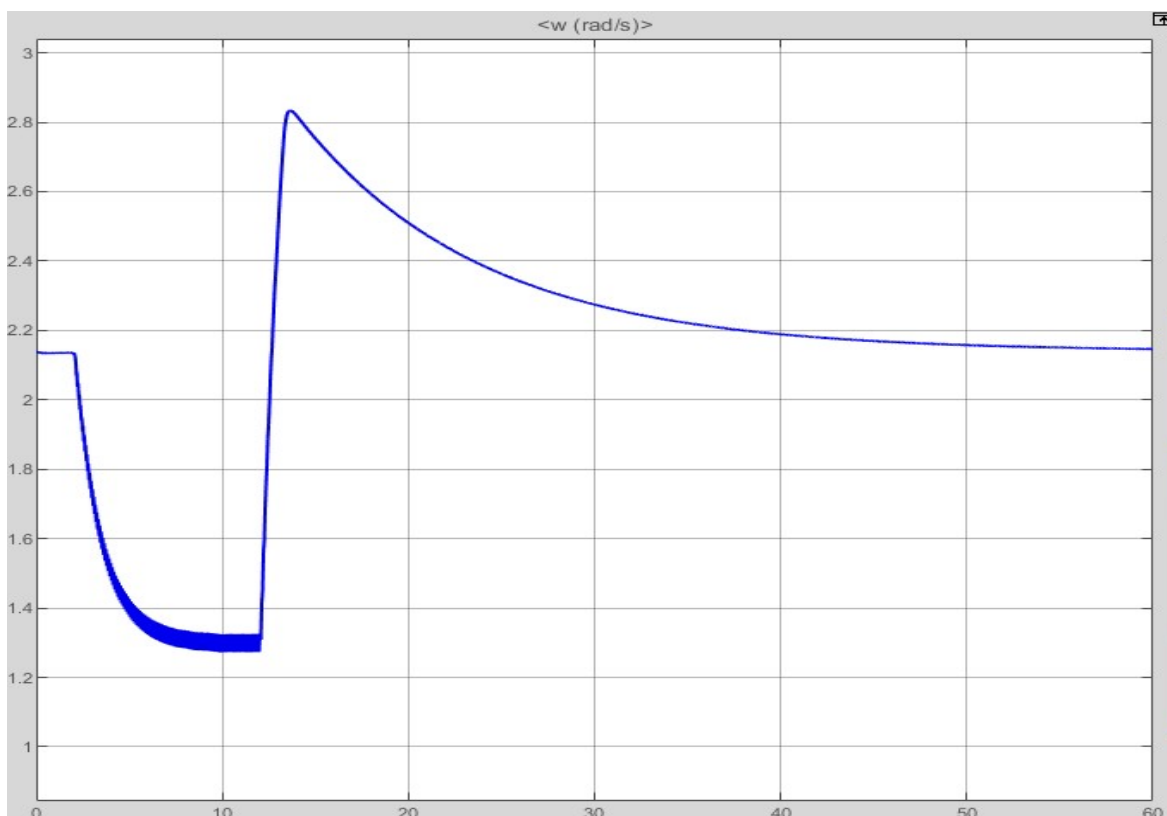
O valor de inclinação da rampa foi reduzido até que a movimentação fosse possível e pudesse verificar-se como se comportam as respostas de torque, velocidade e correntes de fase em uma situação onde um torque de carga devido a inclinação é demandado.

O torque de carga referente à inclinação da rampa está apresentado na Figura 59. Esse torque de carga foi aplicado a partir do tempo 2 s e foi retirado no tempo 12 s.



**Figura 59 – Torque de carga referente à inclinação da rampa. Escalas: Ver: 2 Nm/div; Hor: 10 s/div (Elaboração Própria).**

As respostas da velocidade do motor, em rad/s, torque eletromagnético gerado e correntes de fase estão apresentados nas Figura 60, Figura 61 e Figura 62, respectivamente.

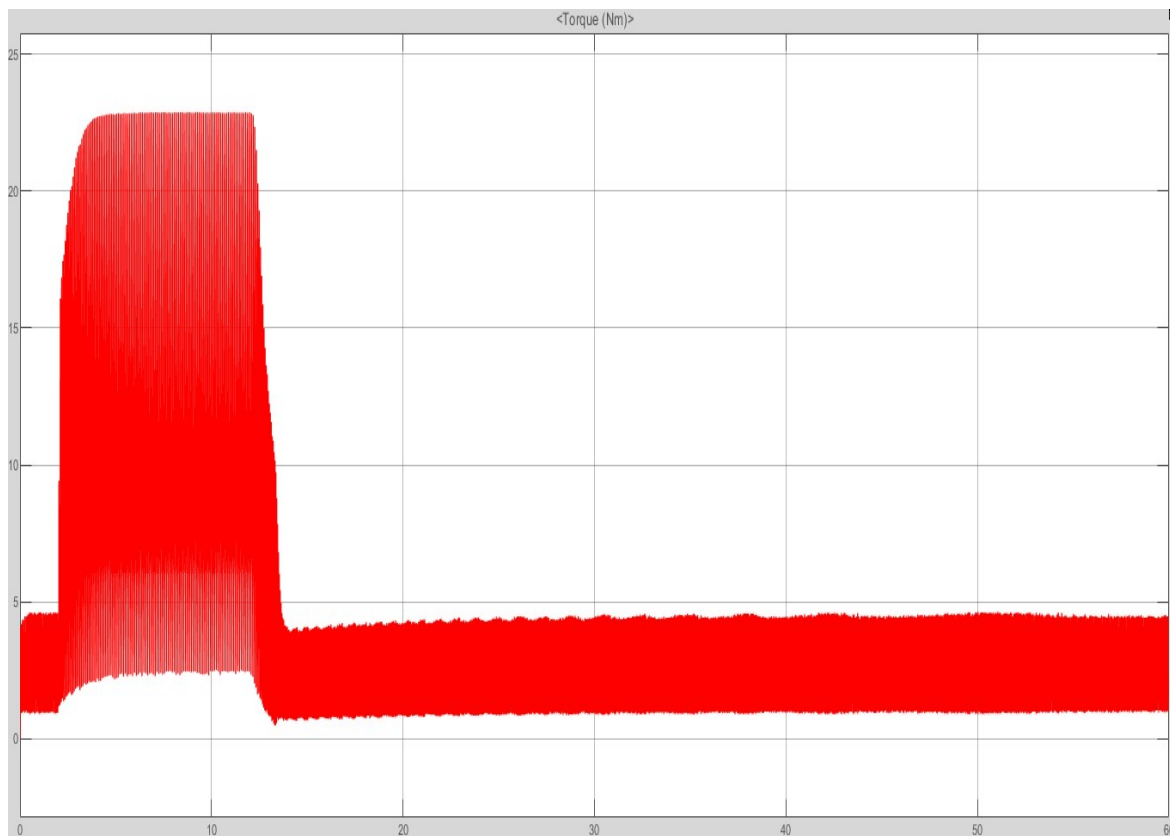


**Figura 60 - Velocidade do motor, em rad/s, na Movimentação em Plano Inclinado. Escalas: Ver: 0,2 rad/s/div; Hor: 10 s/div (Elaboração Própria).**

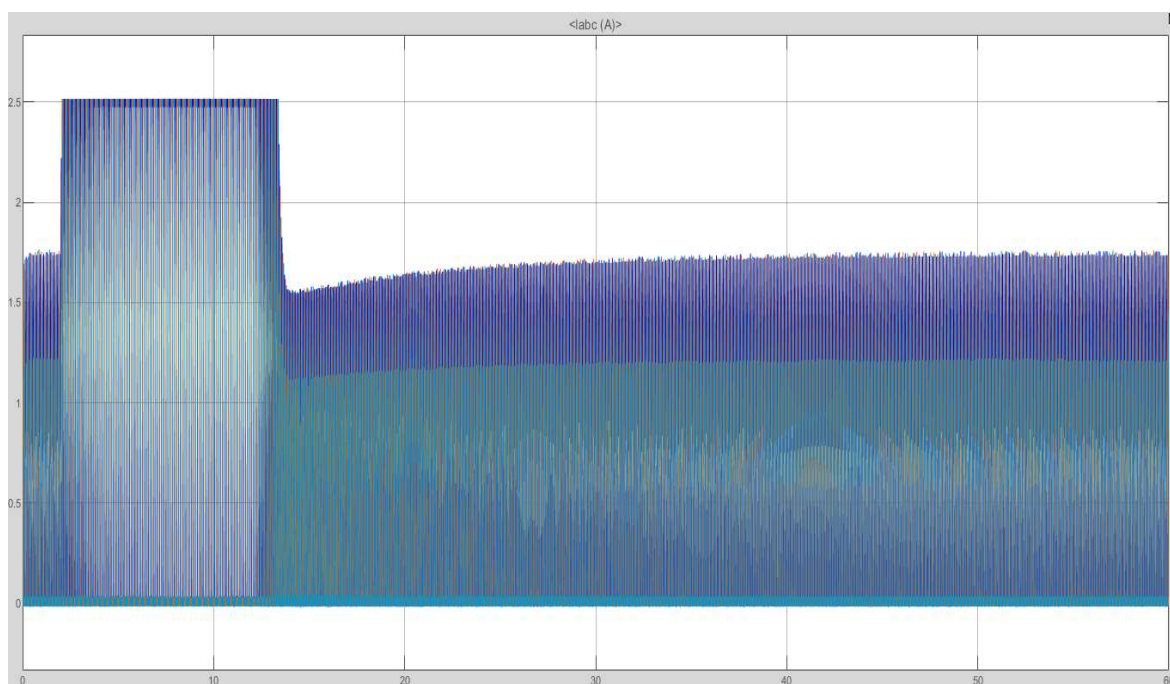
Percebe-se que a partir do tempo 2 s, quando começa a atuar o torque de carga referente à inclinação da rampa, a velocidade reduz-se até um valor médio de 1,3 rad/s.

Também se pode avaliar que nessa movimentação, o torque do motor foi demandado ao seu máximo, o que pode ser percebido, na Figura 62 pelas correntes de fase que ao observa-la mais de perto se aproximam a sinais retangulares com o seu topo no valor máximo de corrente estipulado para o motor (2,5 Ampères).

Ao analisar-se a resposta do torque eletromagnético, mostrado na Figura 61, durante o intervalo entre 2 s e 12 s, tem-se que o torque gerado foi elevado – em comparação com as movimentações anteriores - e se aproxima aos valores previstos na simulação realizada por elementos finitos que estão mostrados na Figura 37.



**Figura 61 - Torque eletromagnético gerado na Movimentação em Plano Inclinado. Escalas: Ver: 5 Nm/div; Hor: 10 s/div(Elaboração Própria).**



**Figura 62 - Correntes de fase na Movimentação em Plano Inclinado. Escalas: Ver: 0,5 A/div; Hor: 10 s/div (Elaboração Própria).**

## Capítulo 5 - Fabricação do Protótipo

Após a modelagem do MRV e simulações, a fabricação de um protótipo foi iniciada. No entanto, por conta da pandemia da COVID-19 e suas consequências, não foi possível finalizar a fabricação para obter resultados experimentais.

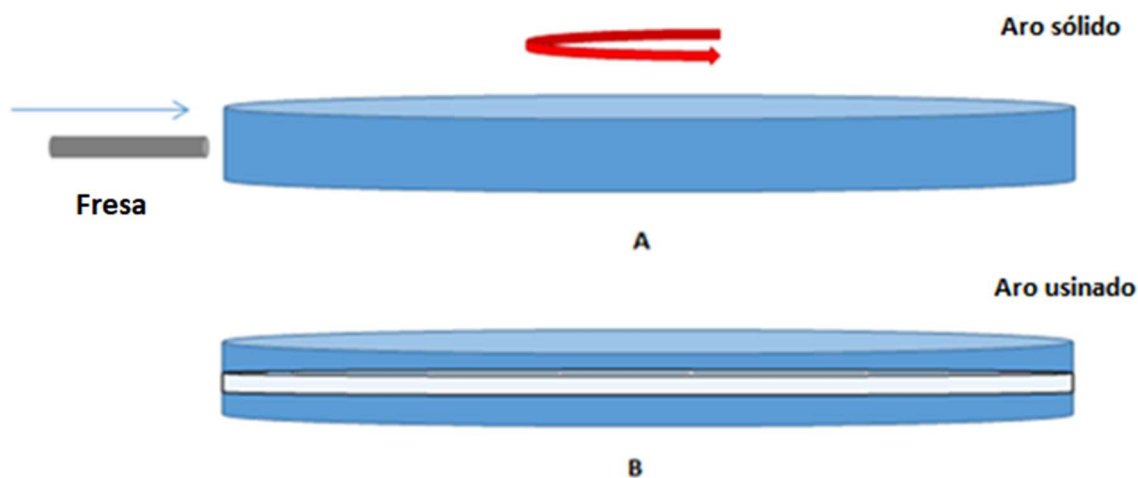
Com relação ao processo de fabricação, foram construídos 4 núcleos do estator bobinados com cobre esmaltado 18AWG e 16 núcleos do rotor postos em um aro de alumínio.

Em um primeiro momento, foi construído um rotor utilizando um aro 16 (aro comercial de bicicleta) e colocados os núcleos de rotor presos a ele por parafusos, conforme apresentado na Figura 63. No entanto, essa construção não foi efetiva, uma vez que os núcleos do rotor não ficaram alinhados perfeitamente.



**Figura 63 – Rotor construído em aro 16 (aro comercial) descartado (Elaboração Própria).**

Para que os núcleos do rotor ficassem alinhados em um mesmo plano, o que é necessário para que eles sejam capazes de atravessar os núcleos de estator com uma sobra de apenas 1,0mm (0,5mm de entreferro superior e inferior), foi utilizado um aro de alumínio maciço e nele foi feita uma cavidade utilizando uma fresa, a fim de obter uma cavidade do tamanho do núcleo do rotor. O esquema para se construir a cavidade está apresentado na Figura 64.



**Figura 64 – Processo de Fabricação da Cavidade do Rotor (Elaboração Própria).**

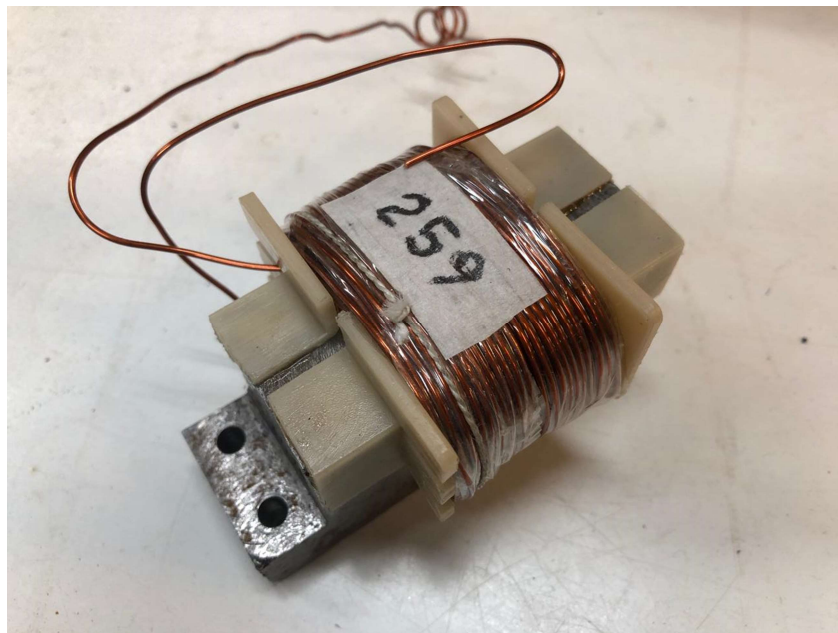
De acordo com a Figura 64, em A, tem-se o aro de alumínio maciço que foi posto para rotacionar ao redor do próprio eixo e em seguida foi aproximada uma fresa a fim de se obter a cavidade ilustrada em B.

Na cavidade feita, foram encaixados os núcleos do rotor, igualmente espaçados ao longo do aro usinado.

O rotor construído e um núcleo do estator bobinado são apresentados nas Figura 65 e Figura 66, respectivamente.



**Figura 65 – Rotor construído para o Protótipo (Elaboração Própria).**



**Figura 66 – Núcleo de estator construído e bobinado (Elaboração Própria).**

Conforme se pode ver na Figura 65, os núcleos do rotor conseguiram passar por um espaço produzido por um paquímetro digital contendo 9,23mm, sem bater nas extremidades. Como o núcleo do rotor possui uma espessura de 8mm, era necessário que todos conseguissem passar por um espaço de 9,00mm. Por conta disso, os núcleos do estator foram construídos com um entreferro de 0,75mm (0,25mm a mais que o utilizado nas simulações).

Com a utilização de um multímetro, a resistência de uma bobina foi medida e foi obtido o valor de  $0,7\Omega$ . Esse valor é menor do que o previsto na seção 3.2.1, e isso se deve ao fato de que a bobina construída possui 259 voltas enquanto que a bobina projetada possui 450 voltas.

Ao todo, foram construídos 4 núcleos do estator e o rotor por completo, sendo necessário portanto ainda se construir mais 4 núcleos para se obter uma fase completa e 16 núcleos para se obter as demais fases.

Ressalta-se que estas peças foram construídas com auxílio de ferramentas disponíveis na maioria de oficinas mecânicas e no laboratório de usinagem do departamento de Engenharia Mecânica da UFF.



## Capítulo 6 - Conclusões

Nos últimos anos, o motor de relutância variável se tornou objeto de estudo para diversas aplicações, em especial, para a tração veicular. No entanto, publicações a respeito desse motor, na sua versão com fluxo magnético na direção axial, são escassas.

O MRV de fluxo axial possui um pequeno comprimento axial e por isso pode ser utilizado em aplicações onde o espaço de alocação do motor é limitado, como em veículos elétricos e na tração veicular como um todo.

Ademais, o MRV possui a característica de não possuir ímãs permanentes, tornando sua fabricação mais barata em comparação a outros motores, e por conta disso, ele é aqui apresentado como uma alternativa para ser usado em cadeiras de rodas elétricas, a fim de se reduzir o seu custo.

Uma proposta de MRV de fluxo axial do tipo *In-Wheel* foi apresentada e projetada a fim de se obter um conjugado suficiente para diversas condições de locomoção de uma cadeira de rodas e seu usuário.

Este MRV possui 24 núcleos de estator bobinados e acionados por 3 fases de corrente e seu rotor possui 8 núcleos.

O MRV proposto foi simulado tridimensionalmente em software FEM, onde foi possível obter suas curvas de indutância, que foram utilizadas para a simulação do acionamento e controle no ambiente Simulink do Matlab. Além dessas curvas, foram estimadas outras características, tais como: massa, momento de inércia e resistência das bobinas.

Seu acionamento foi feito a partir de uma ponte conversora assimétrica ligada a uma bateria de tensão contínua de 96V e o seu sistema de controle de velocidade foi composto por um controlador convencional do tipo PID e um comparador de histerese de corrente.

Dentre as locomoções analisadas, o MRV projetado foi capaz de tracionar o sistema acelerando-o e desacelerando-o, assim como também foi capaz de sair e retornar ao repouso.

Já para a locomoção sobre uma rampa inclinada, o MRV projetado não foi capaz de locomover a cadeira de rodas sobre uma rampa com inclinação de  $4,76^\circ$  - valor especificado por norma para a inclinação de rampas para cadeiras de rodas, contudo foi avaliado seu desempenho para uma rampa com inclinação de  $0,7^\circ$ .

Por fim, um protótipo foi parcialmente construído, onde foram finalizados o rotor com seus 16 núcleos e 4 dos 24 núcleos de estator, mostrando portanto a factibilidade da construção do MRV.

É válido ressaltar que essa construção se deu, majoritariamente, no laboratório de mecânica da Universidade Federal Fluminense e que, por decorrência da pandemia da COVID-19, este permaneceu fechado por certo período, inviabilizando a conclusão da construção.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Alguns trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos a partir do apresentado nessa dissertação são:

- a) Aperfeiçoamento das geometrias do estator e do rotor, a fim de se obter um torque mais elevado para que a cadeira de rodas possa se locomover sobre plano inclinado.
- b) Estudo e aplicação de outras técnicas de controle, a fim de reduzir o ripple de torque gerado.
- c) Finalização do primeiro protótipo a fim de se obter resultados experimentais.
- d) Construção de um segundo protótipo e acoplamento de ambas unidades a uma cadeira de rodas.

## Bibliografia

ALRIFAI, Muthana et al. Nonlinear speed control of switched reluctance motor drives taking into account mutual inductance. *Journal of Control Science and Engineering*, 11p, 2008.

ALJAISM, Wadah Abass. *Switched Reluctance Motor: Design, Simulations and Control*. Thesis – School of Engineering, University of Western Sydney, Sydney, 192 p, 2007.

AMARAL, T. G; PIRES, V. F; PIRES, A. J; MARTINS, J. F; CHEN, H. Power Transistor Fault Diagnosis in SRM Drives Based on Indexes of Symmetry. In: 2018 16th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC), Tallinn, p. 1-4, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9050: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. 4a Ed. Rio de Janeiro, 147p, 2020.

AVUTU, Sateesh Reddy; BHATIA, Dinesh; REDDY, B. Venkateswara. Design of low-cost manual cum Electric-powered wheelchair for Disabled person's to use in indoor. In: 2016 2nd International Conference on Next Generation Computing Technologies, Dehradun, p. 178-184, 2016.

BEER, Ferdinand P. et al. *Mecânica dos Materiais*. 7. ed. Porto Alegre: Mc Graw-Hill, 856p, 2015.

CAI, Jun; DENG, Zhiquan. A switching flux-linkage reference-based sensorless method for switched reluctance motor drives. In: *Electric Power Components and Systems*, v. 42, n. 2, p. 227-237, 2014.

CAI, Jun; DENG, Zhiquan. A sensorless starting control strategy for switched reluctance motor drives with current threshold. In: *Electric Power Components and Systems*, v. 41, n. 1, p. 1-15, 2013.

COMITÊ DE AJUDAS TÉCNICAS. *Tecnologia assistiva*. Brasília, 138p, 2009.

FITZGERALD, A. E.; JR., Charles Kingsley; UMANS, Stephen D. *Máquinas Elétricas: Com Introdução à Eletrônica de Potência*. 6. Ed. Porto Alegre: Artmed, 603p, 2006.

- GILLESPIE, Thomas D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Denver: SAE, 495p, 1992.
- GOTO, H et al. A multipolar SR motor and its application in EV. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 290-291 Part 2, p. 1338-1342, 2005.
- GOTO, H. MURAMAKI, S. ICHINOKURA, O. Design to maximize torque-volume density of axial-flux SRM for in-Wheel EV. In: *IECON 2015 – 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Yokohama, p. 005191-005196, 2015.
- GOTO, H. Double Stator Axial-Flux Switched Reluctance Motor for Electric City Commuters. In: *2018 International Power Electronics Conference*, Niigata, p. 3192-3196, 2018.
- HA, Keunsoo; KIM, Jaehyuck; CHOI, Jang Young. FFT-Based Position Estimation in Switched Reluctance Motor Drives. *Journal of Magnetism*, v. 19, n. 1, p. 90-100, 2014.
- HENRIQUES, Luís Oscar de Araújo Porto. Implementação de estratégia de minimização de oscilações de torque e remoção de sensor de posição para um acionamento de relutância variável usando técnica neuro-fuzzy. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 156p, 2004.
- KERMANIPOUR, M. J; GANJI, B. Modification in Geometric Structure of Double-Sided Axial Flux Switched Reluctance Motor for Mitigating Torque Ripple. In: *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 38, n. 4, Fall, p. 318-322, 2015.
- KUCUK, F; NAKAMURA, T. Torque Density and Efficiency Improvement of a Switched Reluctance Motor via Low-Cost Permanent Magnets. In: *2018 XIII International Conference on Electrical Machines*, pp. 2318-2322, 2018.
- KRISHNAN, Ramu. *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design and applications*. Boca Raton: CRC Press, 432p, 2001.

LIMA, Rafael; SANTISTEBAN, Jose. Estudo e Simulação de um Motor de Relutância Chaveado para Aplicação em uma Cadeira de Rodas. In: Revista PIBIC Ano 2018, Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação – UFF, Niterói, p. 955-958, 2018.

LIMA, Rafael; SANTISTEBAN, Jose. Um Estudo sobre o Motor de Relutância de Fluxo Axial na Propulsão Veicular. In: MOMAG 2020 – 19º SBMO Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14º CBMAG Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. Niterói, p. 767-771, 2020.

LIY, M. V. Terras raras, o ouro do século XXI, são a arma da China na guerra tecnológica. El País Brasil, Pequim, 16 jun. 2019, Economia. Disponível em: <[https://brasil.elpais.com/brasil/2019/06/06/economia/1559832258\\_232021.html](https://brasil.elpais.com/brasil/2019/06/06/economia/1559832258_232021.html)>. Acesso em: 08 abr. 2020.

MA, X; WANG, X; SOULARD, J. Design Procedure of 48V In-Wheel Outer Rotor SPMS for Fully Electric Vehicles. In: The 10<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, p. 128-133, 2020.

MADHAVAN, R. FERNANDES, B. G. A novel axial flux segmente SEM for electric vehicle application. In: The XIX International Conference on Electrical Machines, Rome, p. 1-6, 2010.

MADHAVAN, Ramanujam; FERNANDES, Baylon G. Comparative analysis of axial flux SRM topologies for electric vehicle application. In: IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, December, Bengaluru, p. 1-6, 2012.

MAKWANA, J. A. AGARWAL, P. SRIVASTAVA, S. P. Novel simulation approach to analyses the performance of in-wheel SRM for an Electrical Vehicle. In: 2011 International Conference on Energy, Automation and Signal, Bhubaneswar, p. 1-5, 2011.

MILLER, T. J. E. Electronic Control of Switched Reluctance Machines. Woburn: Newnes, 272 p, 2001.

PALAKEERTHI, Ramesh; SUBBAIAH, P. Rotor position of switched reluctance motor using sensorless method. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, v. 70, n. 2, p. 234-240, 2014.

SAKURAI, Atsuhiko. Sliding mode control of switched reluctance motors. Thesis (Master of Applied Science) - Graduate Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, Toronto, 110p, 2001.

SALO, Jussi. Design and analysis of a transversal-flux switched-reluctance linear-machine pole pair. Thesis (Doctor of Science in Technology), Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, 161p, 1999.

SANCHES, Eric Serge; SANTISTEBAN, José Andrés. Mutual inductances effect on the torque of an axial magnetic flux switched reluctance motor. In: IEEE Latin America Transactions, v. 13, n. 7, p. 2239-2244, 2015.

SECRETARIA DE DIREITOS HUMANOS. Cartilha do Censo. Brasília, 29p, 2012.

SON, D; LEE, D; AHN, J. Design and Analysis of double stator axial field type srm. In: 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, pp. 1-6, 2017.

VIJAYRAGHAVAN, Praven. Design of switched reluctance motors and development of a universal controller for switched reluctance and permanent magnet brushless DC motors drives. Thesis (Doctor of Philosophy in Electrical Engineering) – Department of Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 215p, 2001.

WANG, Yan-yang; YANG, Fu-ning. SRM representative parameters effect on in-wheel motored vehicle performance. In: 2nd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering ICITE, Singapore, p. 36-41, 2017.

WORLD HEALTH ORGANIZATION; THE WORLD BANK. World Report on Disability. Malta, 325p, 2011.

XU, L., D. Zhao, C. Zhang, R. Ge. Research on Fault Analysis and Fault-Tolerant Control of Valve Electric Actuator System Based on SRM. In 2012 Fifth International Symposium on Computational Intelligence and Design, Hangzhou, p. 389-393, 2012.

XUE, X. D. et al. Study of Motoring Operation In-Wheel Switched Reluctance Motor Drives for Electric Vehicles. In: 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, Taipei, p. 1-6, 2009.



# Anexo A – Artigo Produzido pelo Autor

19º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 8-12 de novembro de 2020

## *Um Estudo sobre o Motor de Relutância de Fluxo Axial na Propulsão Veicular*

Rafhael S. Lima, Jose A. Santisteban

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações

Universidade Federal Fluminense – UFF

Niterói, Brazil

[rafaelkouza.lima@gmail.com](mailto:rafaelkouza.lima@gmail.com), [josesantisteban@id.uff.br](mailto:josesantisteban@id.uff.br)

**Abstract**— Several products, equipment and solutions have been developed in order to improve the well-being and quality of life of impaired people. Dealing with low speed vehicles, the motorized wheelchair is a product that facilitates the locomotion and autonomy of certain people with motor disability, however only a small portion of the population who needs it is attended, principally because of its high cost. In this work, aiming a cheap alternative of traction for a wheelchair, the possibility to use a axial flux switched reluctance motor (AFSRM) as wheel-in type has been evaluated through finite element analysis, where different electromagnetic structures were simulated in order to verify the torque capabilities. As result, a particular model of AFSRM located in the wheel has been proposed, where the stator has 24 poles and the rotor has 16 poles. The stator is appropriately activated by 3-phase currents in order to obtain the best average torque, the possible within imposed conditions. The obtained results, composed by simulations and preliminary electromechanical tests, confirm the utility of this approach.

**Keywords**— *Switched Reluctance Motor of Axial Flux, Maxwell Software, Finite Element Method, Motorized Wheelchair.*

### I. INTRODUÇÃO

De forma geral, as pessoas com deficiência não têm acesso igualitário à assistência médica, educação, e oportunidades de emprego [1]. Além das variadas dificuldades, parte desse grupo necessita da utilização de cadeiras de rodas para se locomover. Com o intuito de facilitar e criar autonomia para os usuários das cadeiras de rodas, em especial daqueles com pouca mobilidade dos membros superiores, a solução proposta é a utilização de cadeiras de rodas motorizadas. No entanto, o seu elevado custo impossibilita a sua aquisição por uma grande parcela daqueles que dela necessitam. Por conta disso, soluções para a diminuição do seu custo são foco de pesquisa em diversos artigos e publicações [2,3]. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta um estudo de uma estrutura de Motor de Relutância Variável (MRV) de fluxo axial projetada para ser acoplada às rodas de uma cadeira de rodas.

A característica mais notável de um MRV é a presença de enrolamentos apenas nos estatores. Já os rotores não possuem enrolamentos nem ímãs permanentes [4,5]. Deve ser mencionado que as suas aplicações não se limitam a níveis de baixa potência mas também alcançam a indústria automobilística [6].

Segundo a orientação do fluxo magnético responsável pela geração do torque eletromagnético, o do seu entreferro, dois tipos de MRV podem ser identificados: o de fluxo radial, o mais conhecido, e aquele que apresenta o fluxo na direção axial, paralelo ao eixo do motor, o tipo contemplado neste artigo.

Considerando que as correntes no estator são impostas, o torque gerado pelo MRV pode ser modelado como descrito na equação (1) [4].

$$T_e = [i] \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} [i]^T \quad (1)$$

Onde  $L(\theta, i)$  é uma matriz em cuja diagonal principal são listadas as indutâncias próprias de cada bobina e os demais elementos são as indutâncias mútuas entre as bobinas. " $i$ " é um vetor linha com os valores de corrente em cada bobina e " $\theta$ " é o deslocamento angular do eixo do motor.

A avaliação de (1) é laboriosa devido às relações não lineares encontradas na matriz de indutâncias. Ainda mais, no caso de um MRV de fluxo axial, uma mudança na posição angular do eixo produz mudanças tridimensionais no fluxo magnético, de tal modo que uma análise bidimensional não é apropriada. Afortunadamente, os programas de simulação de campos eletromagnéticos, baseados na análise por elementos finitos, tem evoluído ao mesmo tempo do que a velocidade dos computadores, permitindo atualmente avaliar estruturas eletromagnéticas em frações do tempo que seria gasto, por exemplo, duas décadas atrás.

Desta forma, na seção II deste artigo, serão apresentados os resultados mais relevantes de algumas das simulações que permitiram definir as especificações do MRV proposto para tracionar uma cadeira de rodas. Na seção III, será mostrada uma estrutura preliminar de testes construída para medir a capacidade de geração de torque quando interagem o campo magnético gerado pela circulação de corrente de uma bobina do estator com um pólo do rotor. Em seguida, na seção IV é mostrada uma estrutura, ainda em processo de construção, acoplada ao aro de uma roda real. Por fim, na seção V são apresentadas as principais conclusões deste estudo.

### II. PROJETO DO MRV

Para este estudo, foi utilizada como ferramenta um programa de simulação com capacidade tridimensional [7]. Diversas estruturas foram simuladas a fim de se escolher a melhor estrutura na geração do torque e, ao mesmo tempo, que possuísse



certa facilidade na sua construção mecânica quando fossem acopladas à roda de uma cadeira de rodas, como no modelo apresentado na Fig. 1.

Os polos do rotor das estruturas simuladas foram especificados para que as faces externas dos mesmos fiquem a uma distância de 19 cm do eixo da roda.



Fig. 1. Roda da cadeira de rodas modelo.

#### A. Núcleo do Estator em "U"

Inicialmente, foi simulada uma estrutura eletromagnética onde o núcleo do estator possuía uma geometria em formato de "U", e continha uma bobina com uma força magnetomotriz de 100 Aesp. Foi considerada uma área máxima de entreferro de  $3\text{cm}^2$ , quando os polos de estator e rotor ficam alinhados, e um comprimento de entreferro de 2mm. A estrutura simulada está mostrada na Fig. 2.

Levando em conta a densidade volumétrica do material utilizado e o seu volume, a massa da estrutura foi estimada em 230 gramas.

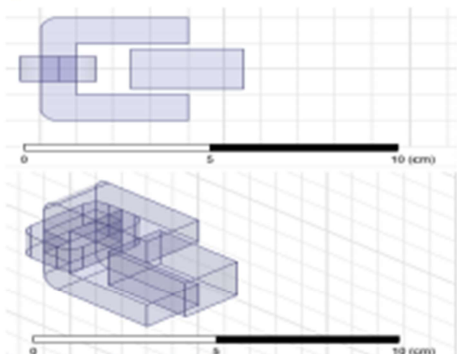


Fig. 2. Estrutura em formato de "U".

As simulações consideraram cinco posições angulares do rotor, para os quais resultaram diferentes valores de torque. Estes são apresentados na Tabela I, adiante, e foram comparados com os gerados pelas outras estruturas simuladas.

#### B. Núcleo do Estator em "U" Duplo

Essa estrutura, embora parecida a apresentada no item anterior, o núcleo do seu estator gera torque a partir de dois núcleos do rotor. As demais características, tais como força magnetomotriz, área e largura dos entreferros foram mantidas. A estrutura simulada é mostrada na Fig. 3. Os valores de torque em função do ângulo de rotação aparecem na Tabela I.

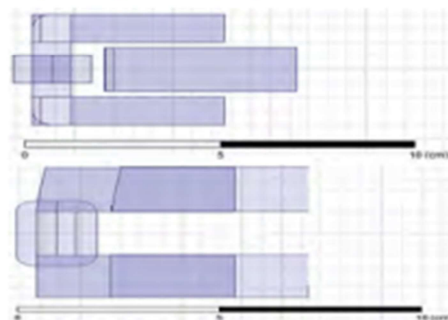


Fig. 3. Estrutura em formato de "U" duplo.

É importante destacar que, a partir de um certo valor de deslocamento angular, essa estrutura possui uma redução no torque gerado devido a que um dos polos do rotor fica localizado entre dois polos do estator e, com isso, aparecem dois caminhos de fluxo magnético percorrendo aquele polo do rotor, sendo que se estabelece um torque adicional contrário ao desejado. Essa situação é ilustrada na Fig. 4.

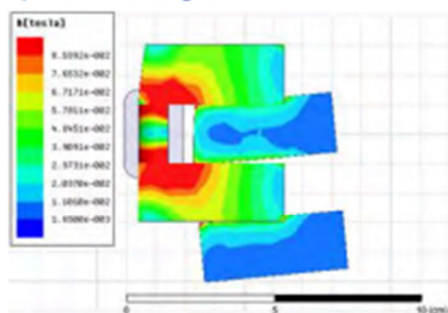


Fig. 4. Fluxos magnéticos na estrutura "U" duplo passando pelo mesmo polo do rotor.

#### C. Núcleo do Estator em "U" Alongado

Nessa estrutura, os polos do rotor e do estator são alongados de forma a se aumentar a área do entreferro para  $16,6\text{cm}^2$ . As demais características foram mantidas. A estrutura simulada encontra-se na Fig. 5.

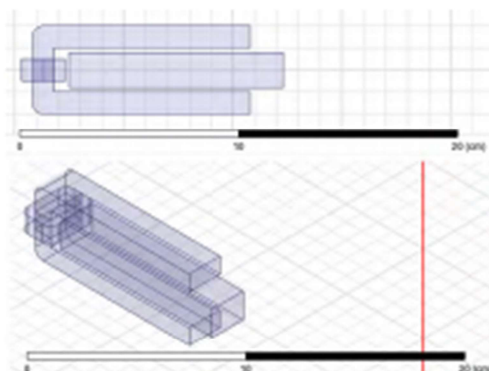


Fig. 5. Estrutura em formato de "U" alongado.

Os valores de torque em função do deslocamento angular são mostrados na Tabela I.

Para essa estrutura, estimou-se uma massa de 590 gramas, que é 2,56 vezes maior do que a massa da estrutura em "U".

Ao comparar com a estrutura em "U", constata-se que este aumento de massa implica no aumento de torque, entretanto a construção dessa estrutura seria difícil considerando as limitações de construção presentes no laboratório de usinagem disponível.

#### D. Núcleo do Estator em "C"

Essa estrutura é similar a estrutura em "U", no entanto, o núcleo do estator possui o formato de "C", como ilustrado na Fig. 6. A massa estimada dessa estrutura é de 207 gramas, cerca de 0,9 vezes menor do que a da estrutura em "U". As demais características foram mantidas.

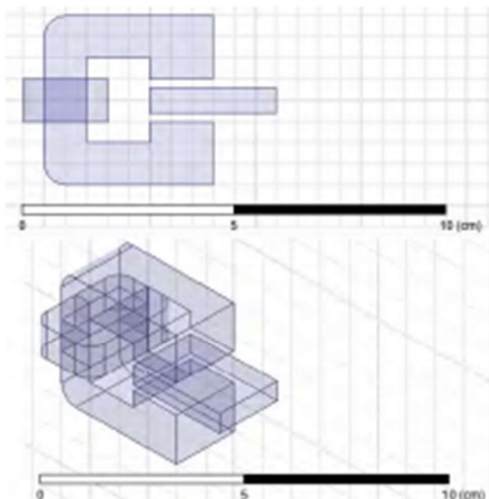


Fig. 6. Estrutura em formato de "C".

Destaca-se que, neste caso, a espessura do rotor é menor do que a da estrutura em "U". Os valores de torque em função do deslocamento angular do rotor estão apresentados na Tabela I.

#### E. Escolha da Estrutura para a Construção de um Protótipo

Na Tabela I estão mostrados os torques obtidos, para cada estrutura estudada, em função do deslocamento angular do rotor.

Verifica-se que a estrutura em formato de "U" duplo possui o maior torque, na região de 1º a 3º, cerca de duas vezes maior do que as estruturas "U" e "C", o que era esperado ao interagir dois núcleos de rotor com o estator. Entretanto, essa estrutura não foi escolhida devido às dificuldades de construção e pela geração de um torque negativo a partir de um deslocamento maior a 3º. Eventualmente, essa estrutura poderia ser considerada em estudos futuros, considerando um maior número de polos no estator e no rotor.

Como já comentado, o aumento da massa na estrutura em formato de "U" alongado reflete num aumento equivalente do torque produzido, entretanto torna-se difícil a sua construção considerando as restrições de usinagem.

Por fim, a estrutura em formato de "C" apesar de gerar um torque menor do que o gerado pela estrutura em formato de "U", tem como vantagem a menor massa da estrutura. Por esta razão, esta foi a estrutura escolhida para a construção de um protótipo.

TABELA I VALORES DE TORQUE X POSIÇÃO ANGULAR

Estrutura	Posição Angular	Torque (Nm)				
		5º	4º	3º	2º	1º
Estator em "U"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	43	44	44	41	34	
Estator em "U" duplo	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	
	96	18	23	19	02	
Estator em "U" alongado	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
	51	47	41	30	05	
Estator em "C"	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	30	31	31	30	26	

Uma vez escolhida a geometria "C" para os polos de estator e rotor, foi realizado o projeto do motor completo contendo 24 polos no estator e 16 no rotor, sendo que as bobinas dos estatores são previstas para serem acionadas com correntes divididas em três fases (uma fase para um conjunto de 8 bobinas). O projeto do MRV levou em conta as dimensões da cadeira de rodas modelo e, além disso, que tivesse capacidade de locomover, em terreno plano, a cadeira motorizada junto ao seu usuário. Na Fig. 7, se encontra o diagrama da estrutura completa do MRV a ser acoplado à roda.

Desta forma, as dimensões foram ajustadas para ter um entreferro de 0,5mm e a força magnetomotriz por bobina de 350 Aesp.

Com auxílio do simulador, os valores de torque dessa estrutura completa, em função da posição angular do rotor, foram estimados e são mostrados na Fig. 8.

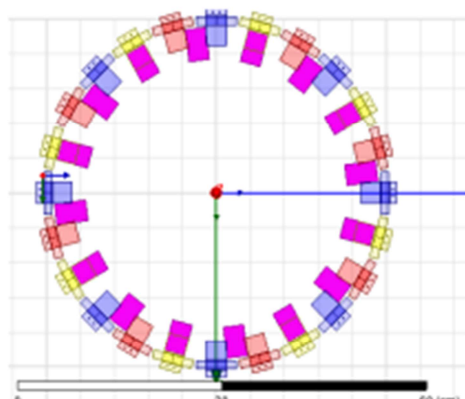


Fig. 7. Projeto da estrutura escolhida onde os polos do rotor estão em rosa, e os do estator estão em azul (fase A), vermelho (fase B) e amarelo (fase C).

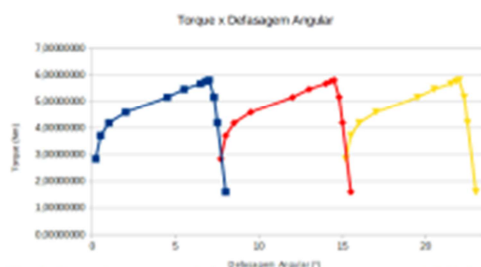


Fig. 8. Curva de torque por de fase em angular do rotor para o MRV simulado.

### III. TESTES ELETROMECÂNICOS

#### A. Estrutura preliminar

Para avaliar o princípio de operação do MRV proposto, foi construída uma estrutura de testes preliminar, mostrada na Fig. 9, contendo apenas um polo do rotor e um polo do estator. O polo do rotor é acoplado a uma haste horizontal de forma a mantê-lo na posição em que "atravessa" os dentes do estator. A haste gira ao redor de um eixo vertical afastado do polo do estator, uma distância similar ao raio real do MRV proposto.



Fig. 9. Estrutura preliminar para testes.

Para avaliar o torque gerado pela estrutura, amarraram-se uma linha de nylon ao polo do rotor e, com o auxílio de uma roldana, prendeu-se à outra extremidade da linha uma sacola plástica com objetos de massas conhecidas. Foram colocados os objetos na

sacola plástica e simultaneamente imposta corrente na bobina do estator de tal modo que a posição angular do rotor ficasse em torno de 3°. Para cada valor de massa total era calculado o torque correspondente. Na Fig. 10 é mostrada a estrutura com a presença da polia e da sacola plástica.

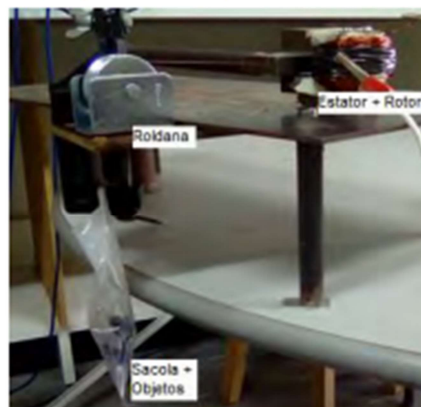


Fig. 10. Teste para estimar o torque eletromagnético gerado.

#### B. Resultados

A partir dos experimentos realizados, foi obtida a relação torque por corrente aplicada à bobina, mostrada na Fig. 11. Percebe-se que existem valores de torque com corrente zero, o que pode ser explicado pelo atrito estático da polia e do próprio eixo e também pela presença de certo magnetismo residual nos polos. Contudo, esta relação se aproxima de uma função polinomial de grau dois, conforme esperado analiticamente para o torque de um MRV com relação a corrente aplicada a bobina mantendo o deslocamento angular fixo.

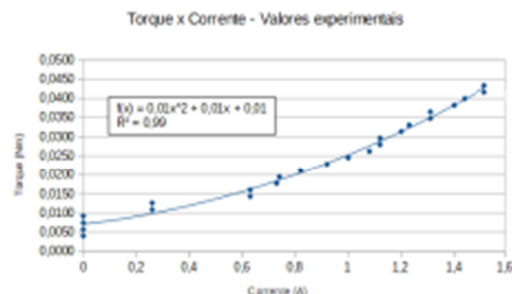


Fig. 11. Curva de torque x corrente obtida experimentalmente.

Foi observado que, utilizando uma corrente de 1,52 A, o que causa uma força magnetomotriz de 364,8 Aesp, o torque obtido foi consideravelmente menor do que o estimado nas simulações. Esta diferença pode ser atribuída às imperfeições da construção experimental, onde a largura do entreferro foi de 2mm ao invés de 0,5mm, e o comprimento compartilhado entre o rotor e o estator foi de 2,2cm enquanto que na simulação foi de 2,6 cm.

Desta forma, uma nova simulação foi realizada levando em conta as dimensões reais da estrutura construída e dessa vez o

valor experimental foi apenas 0,65 vezes menor do que o valor simulado.

#### IV. FUTURO PROTÓTIPO

Em relação ao protótipo final, ainda em fase de construção, no momento já se dispõe de uma estrutura de rotor contendo 16 polos acoplados a um aro de 16cm de raio, como mostrado na Fig. 12.

Para chegar a essa construção, em razão de detalhes mecânicos da roda comercial, algumas mudanças nas dimensões mecânicas da estrutura têm sido consideradas. Como próximos passos, a construção dos 24 estatores está sendo encomendada.



Fig. 12. Roda real em adaptação.

#### V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o estudo realizado para a escolha da geometria dos polos dos estatores e rotores de um MRV de fluxo axial proposto para a tração veicular de uma cadeira de rodas, sendo que dois MRVs ficariam acoplados mecanicamente às rodas.

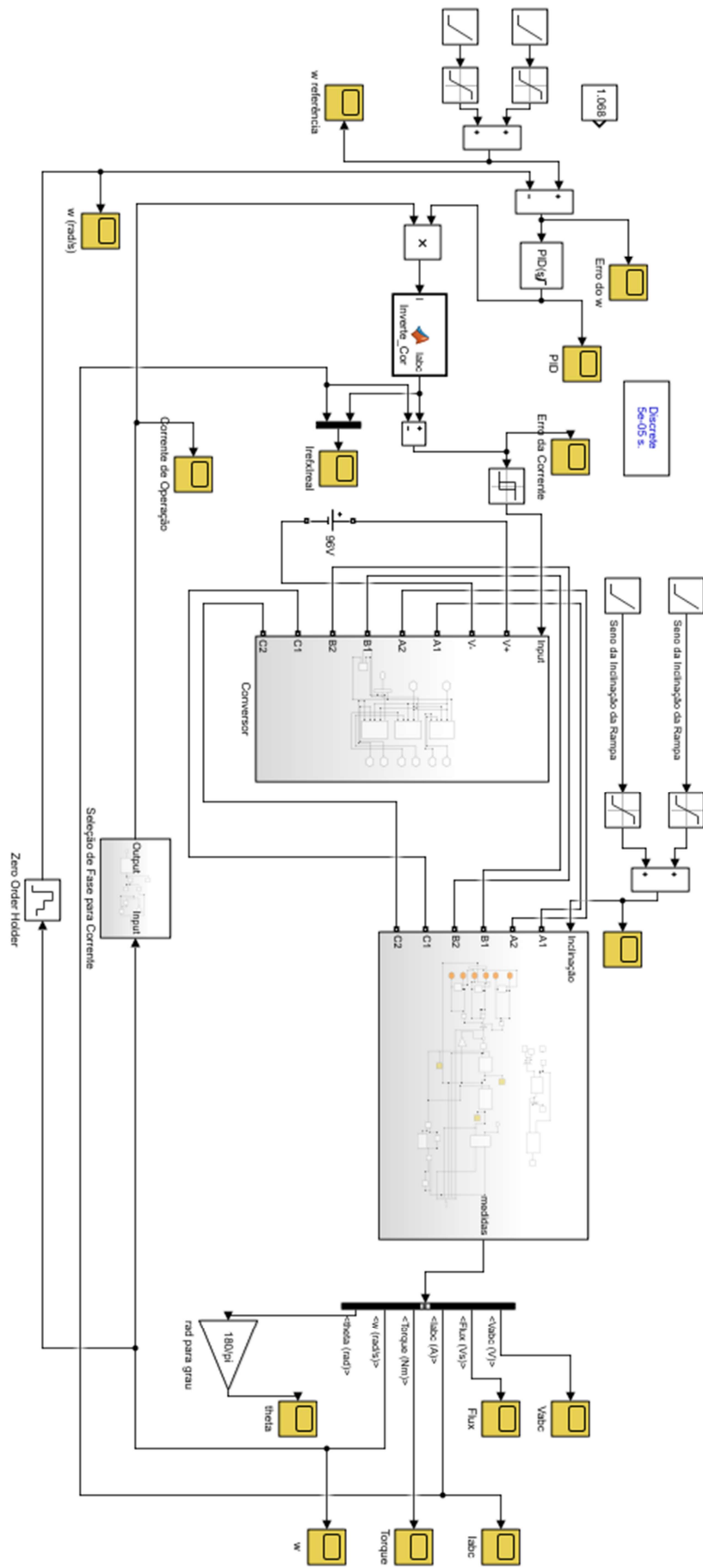
Foram avaliadas quatro tipos de estruturas eletromagnéticas que se mostraram possíveis de serem utilizadas na tração de uma cadeira de rodas. Em função da análise através de simulações e da facilidade de construção foi escolhida a estrutura com formato "C".

Uma estrutura preliminar, contendo apenas um polo de estator e outro do rotor, utilizando a geometria escolhida foi testada para confirmar o princípio de operação e sua capacidade de geração de torque. Apesar de obter valores abaixo do esperado para o torque, os testes confirmaram uma função quadrática para o torque com relação à corrente aplicada nas bobinas e os problemas com a construção mecânica justificam esses valores obtidos.

#### REFERÊNCIAS

- [1] World Health Organization; The World Bank. World Report on Disability. Malta, 2011. 325 p.
- [2] F. L. Lopes et al. "Cadeira de Rodas Motorizada de Baixo Custo." Santa Rita do Sapucaí, 2013. Artigo – Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, 2013.
- [3] A. Barcelos et al. "Sistema de Controle e Motorização de Cadeira de Rodas." Resende, 2008. Artigo – Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica, Associação Educacional Dom Bosco, Resende, 2008.
- [4] R. Krishnas, Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications. Nova Iorque: CRC Press, 2001. 432 p.
- [5] A. E. Fitzgerald, C. K. Jr., S. D. Umans, Máquinas Elétricas com Introdução à Eletrônica de Potência, 6. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 603 p.
- [6] S. Nakano, K. Kiyota, A. Chiba, "Design consideration of high torque-density switched reluctance motor for hybrid electrical vehicle", 2016, 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiba, 2016, pp. 1-6.
- [7] Ansys Maxwell II, <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>, acessado em 12 de Março de 2020.

## **Anexo B – Diagrama Montado para a Simulação do Projeto de Controle**



## Anexo C – Código utilizado na função SelectFase

```
function fasecond = selectfase( thetadivide)

Imax = 2.5;

    if (thetadivide <= 7.5)
        Ia = 0;
        Ib = Imax;
        Ic = 0;
    else
        if (thetadivide <=15)
            Ia=0;
            Ib=0;
            Ic=Imax;
        else
            Ia=Imax;
            Ib=0;
            Ic=0;
        end
    end

end

fasecond = [Ia Ib Ic];
```

## Anexo D – Código utilizado na função “Inverte\_Corrente”

```
function Iabc = Inverte_Cor(I)

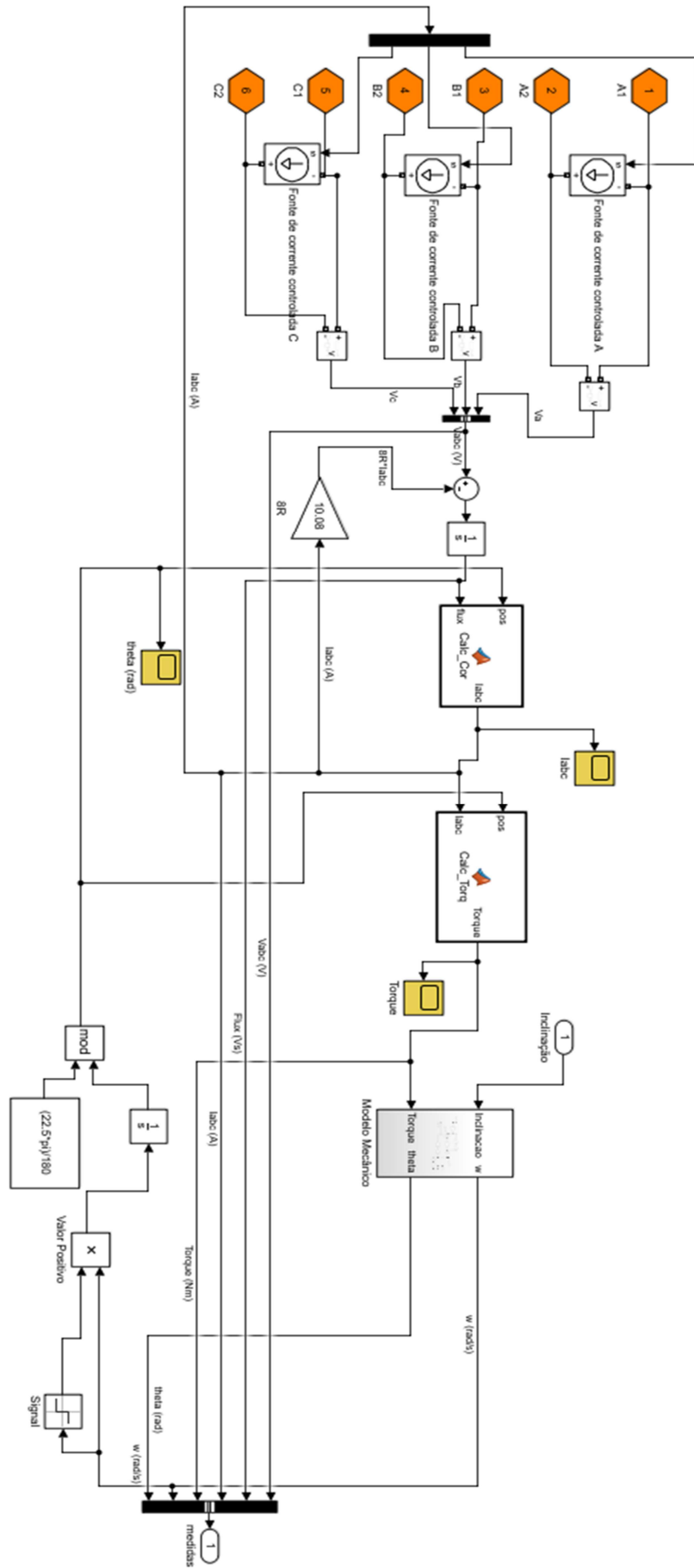
%I sinal de corrente em Ampère
%Iabc sinal de corrente corrigido em Ampère

if (I(1) < 0)
    I(3) = -I(1);
    I(1) = 0;
end
if (I(2) < 0)
    I(1) = -I(2);
    I(2)=0;
end
if (I(3) < 0)
    I(2) = -I(3);
    I(3) = 0;
end

Iabc = I;
```



## **Anexo E – Diagrama Utilizado para Simular o Modelo Elétrico e Mecânico do MRV**



## Anexo F – Código utilizado para cálculo da corrente

```

function Iabc = Calc_Cor(pos,flux)

%posicoes em rad
%fluxo em Vs
%correntes em A
%indutância em H

if (pos <= (7.5*pi/180))
    posb = pos + (15*pi/180);
    posc = pos + (7.5*pi/180);
else
    if (pos <= (15*pi/180))
        posb = pos - (7.5*pi/180);
        posc = pos + (7.5*pi/180);
    else
        posb = pos - (7.5*pi/180);
        posc = pos - (15*pi/180);
    end
end

a1 =      1.9590 ;
b1 =      8.0330 ;
c1 =     -0.0708 ;
a2 =      1.582  ;
b2 =     11.62  ;
c2 =      2.337  ;
a3 =      0.03216;
b3 =     56.99;
c3 =     -3.794;

La = a1*sin((b1*pos)+c1) + a2*sin((b2*pos)+c2) + a3*sin((b3*pos)+c3);
Lb = a1*sin((b1*posb)+c1) + a2*sin((b2*posb)+c2) + a3*sin((b3*posb)+c3);
Lc = a1*sin((b1*posc)+c1) + a2*sin((b2*posc)+c2) + a3*sin((b3*posc)+c3);

L = [La 0 0; 0 Lb 0; 0 0 Lc];

Linv = inv(L);

Iabc = Linv * flux;

```

## Anexo G – Código utilizado para cálculo do torque

```

function Torque = Calc_Torq(pos,Iabc)

%posicoes em rad
%corrente em A
%Toque eletromagnético em Nm
%Derivada da Indutância em H/rad

if (pos<=(7.5*pi/180))
    posb = pos + (15*pi/180);
    posc = pos + (7.5*pi/180);
else
    if (pos <=(15*pi/180))
        posb = pos - (7.5*pi/180);
        posc = pos + (7.5*pi/180);
    else
        posb = pos - (7.5*pi/180);
        posc = pos - (15*pi/180);
    end
end

a1 =      1.9590 ;
b1 =      8.0330 ;
c1 =     -0.0708 ;
a2 =      1.582  ;
b2 =     11.62  ;
c2 =      2.337  ;
a3 =      0.03216;
b3 =      56.99 ;
c3 =     -3.794 ;

DLa = a1*b1*cos((b1*pos) + c1) + a2*b2*cos(c2 + (b2*pos)) + a3*b3*cos(c3
+ (b3*pos));
DLb = a1*b1*cos((b1*posb) + c1) + a2*b2*cos(c2 + (b2*posb))+ a3*b3*cos(c3
+ (b3*posb));
DLc = a1*b1*cos((b1*posc) + c1) + a2*b2*cos(c2 + (b2*posc))+ a3*b3*cos(c3
+ (b3*posc));

DL = [DLa 0 0 ; 0 DLb 0 ; 0 0 DLc ];

Torque = 0.5 * Iabc' * DL * Iabc;

```