

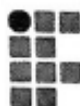
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLE DE CORRENTE
PARA A MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 6X4
OPERANDO COMO MOTOR**

LETÍCIA ABDIAS FELIPE

Itumbiara

2019



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Betícia Abdias Selipe

Matrícula: 2014104090142

Título do Trabalho: Desenvolvimento de um controle de coerente para a máquina a relutância variável 6x4 operando como motor

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara
Local

24/05/2021
Data

Betícia Abdias Selipe

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

LETÍCIA ABDIAS FELIPE

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLE DE CORRENTE
PARA A MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 6X4
OPERANDO COMO MOTOR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca Examinadora do Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Eletricista

Prof. Ghunter Paulo Viajante, Dr. (IFG) – Orientador

Prof. Marcos Antônio Arantes de Feitas, Dr. (IFG)

Prof. Victor Régis Bernadeli, Dr. (IFG)

Itumbiara

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F313d

Felipe, Letícia Abdias

Desenvolvimento de um controle de corrente para a máquina a relutância variável 6x4 operando como motor. / Letícia Abdias Felipe. -- 2019.

81 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Ghunter Paulo Viajante.

1.Histerese 2. Correntes elétricas 3. Relutância variável I. Título. II. Viajante, Ghunter Paulo.

CDD: 621.31912

Bibliotecária: Rosiane Gonçalves de Lima CRB/1-1684



INSTITUTO FEDERAL
GOIÁS
Câmpus Itumbiara

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS
COORDENAÇÃO DE CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TERMO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLE DE CORRENTE PARA A MÁQUINAS A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 6X4 OPERANDO COMO MOTOR.

AUTOR: LETÍCIA ABDIAS FELIPE.

ORIENTADOR: Prof. Dr. GHUNTER PAULO VIAJANTE.

Aprovado como parte das exigências para obtenção do diploma de Engenheiro Eletricista, do Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

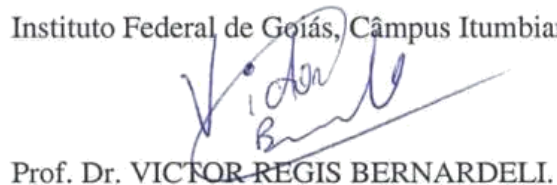
Itumbiara, 09 de dezembro de 2019.


Prof. Dr. GHUNTER PAULO VIAJANTE.

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.


Prof. Dr. MARCOS ANTÔNIO ARANTES DE FREITAS.

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.


Prof. Dr. VICTOR REGIS BERNARDELI.

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

DEDICATÓRIA

A minha família e a todos meus amigos que contribuíram de alguma forma com a conclusão dessa etapa em minha vida.

“Você não acorda um belo dia e se transforma em borboleta

Crescer é um processo.”

Rupi Karl

RESUMO

As Máquinas a Relutância Variável se tornaram competitivas quando comparadas aos tradicionais motores de indução e aos motores de ímãs permanentes, principalmente quando opera em velocidades variáveis. Isso também ocorre por conta de algumas vantagens inerentes à máquina como simplicidade construtiva, possibilidade de operação em altas velocidades, sem ímãs ou bobinas no rotor, adaptabilidade a condições hostis etc. Face ao exposto, torna-se essencial investigar as particularidades da MRV. Vislumbrando estas necessidades, este trabalho apresenta uma contribuição ao estudo da Máquina a Relutância Variável acionada como motor, com o controle de corrente aplicado via histerese. O objetivo principal é apresentar o motor sobre diversas condições de operação, bem como o desenvolvimento de um controlador de corrente. É apresentado um modelo matemático para o Motor a Relutância Variável que utiliza a modelagem linear senoidal e um modelo computacional para análise em regime permanente e transitório. Também é apresentada uma estratégia de controle de chaveamento nas fases através da variação do ângulo de magnetização atuando as chaves superiores e inferiores do conversor assimétrico *Half Bridge*. O projeto e equacionamento do conversor estático *Half-Bridge* por histerese e a implementação foi feito em ambiente SIMULINK. Os resultados são apresentados e discutidos ao longo do trabalho.

Palavras Chaves: Motor a Relutância Variável, Controle de Corrente, Histerese

ABSTRACT

Switched Reluctance Machines have become competitive when compared to traditional induction motors and permanent magnet motors, especially when operating at variable speed. This is also due to some inherent advantages of the machine such as constructive simplicity, high speed operation without rotor magnets or coils, adaptability to conditions. hostile etc. Given the above, it is essential to investigate the particularities of MRV. Looking at these needs, this paper presents a contribution to the study of Switched Reluctance Machine driven as a motor, with hysteresis current control. The main objective is to present the motor under various operating conditions, as well as the development of a current controller. Thus, it presents a mathematical model for the Switched Reluctance Motor that uses linear sinusoidal modeling and a computational model for analysis in permanent and transient regime. A phase switching control strategy is also presented by varying the magnetization angle by actuating the upper and lower switches of the Half Bridge asymmetric converter. The design and equation of the Half-Bridge by hysteresis and the implementation was done in SIMULINK environment. The results are presented and discussed throughout the work.

Key words: Switched Reluctance Motor, Current Control, Hysteresis

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Visualização em perspectiva e frontal do motor a relutância chaveado 6x4	21
Figura 2.2 – Perfil de indutância trapezoidal do enrolamento de fase de uma MRV	23
Figura 2.3 – Corte do motor síncrono a relutância	25
Figura 2.4 – Figura em corte do motor de passo à relutância	26
Figura 2.5 – Rotor de uma MRV real com quatro polos.....	26
Figura 2.6 – Motor à relutância variável 6x4	27
Figura 2.7 – Vista em corte de um MRV 6x4 com o rotor em diferentes posições	28
Figura 2.8 – Perfil das indutâncias de fase idealizadas	29
Figura 2.9 – Perfil de indutância e pulso de acionamento de uma fase do Motor a Relutância Variável	30
Figura 2.10 – Conversor <i>Half Bridge</i> aplicado para acionar o MRV	31
Figura 2.11 – Etapas de acionamento de um conversor <i>HB</i> : a) Excitação; b) Roda livre; c) Desmagnetização	31
Figura 3.1 – Fluxo concatenado <i>versus</i> corrente de fase para uma máquina linear	37
Figura 3.2 Circuito equivalente de uma fase do MRV	37
Figura 3.3 – Corte transversal de uma MRV 6x4	40
Figura 3.4 – Produção de conjugado em uma máquina 6x4	42
Figura 4.1 – Diagrama de blocos do acionamento do MRV	43
Figura 4.2 – Protótipo do MRV utilizado	44
Figura 4.3 – Diagrama de blocos da simulação linear no SIMULINK	44
Figura 4.4 – Conversor <i>Half Bridge</i> utilizado	45
Figura 4.5 – MRV 6X4 com três fases	46
Figura 4.6 – (a) Diagrama de bloco do sistema gerador de pulso de disparo das chaves, (b) Interior do bloco lógica para a geração dos pulsos de disparo por fases	46
Figura 4.7 – Cálculo da corrente das fases da MRV	47
Figura 4.8 – Cálculo da indutância e corrente de fase	47

Figura 4.9 – (a) Cálculo da derivada da indutância, (b) Indutância baseada nos máximos e mínimos	48
Figura 4.10 – Cálculo do torque e posição do motor	48
Figura 4.11 – Cálculo do rendimento do motor	49
Figura 4.12 – Cálculo do fluxo do rotor	49
Figura 4.13 – (a) Fluxo nas fases em relação ao tempo, (b) Fluxo na fase A em relação corrente	50
Figura 4.14 – (a) Rendimento para 24° de acionamento, (b) Rendimento para 25° de acionamento, (c) Rendimento para 26° de acionamento, (d) Rendimento para 27° de acionamento, (e) Rendimento para 28° de acionamento, (f) Rendimento para 29° de acionamento, (g) Rendimento para 30° de acionamento	50
Figura 4.15 – Variação de θ em rad/s	52
Figura 4.16 – Variação da indutância, variação de θ e gatilho em uma fase	53
Figura 4.17 – Indutância, corrente e tensão na Fase A	53
Figura 4.18 – Sinais de corrente de fase do MRV	54
Figura 4.19 – Conjugado total do motor	54
Figura 4.20 – Indutância, Pulso de gatilho e Corrente na Fase A	55
Figura 4.21 – Rendimento do motor	55
Figura 4.22 – (a) Conjugado, (b) Rendimento, (c) Correntes e (d) Corrente, Indutância e Gatilho na fase A	56
Figura 4.23 – (a) Conjugado, (b) Rendimento, (c) Correntes e (d) Corrente, Indutância e Gatilho na fase A	56
Figura 4.24 – (a) Conjugado, (b) Rendimento, (c) Correntes e (d) Indutância, Corrente e Tensão na fase A	57
Figura 4.25 – (a) Conjugado, (b) Rendimento, (c) Corrente e (d) Indutância, Corrente e Tensão na fase A	58
Figura 4.26 – (a) Conjugado na Fase A, (b) Rendimento, (c) Corrente e (d) Corrente, Indutância e Gatilho na fase A	59
Figura 4.27 – (a) Conjugado na Fase A, (b) Rendimento, (c) Corrente e (d) Corrente, Indutância e Gatilho na fase A	60
Figura 5.1 – Diagrama de blocos motor com controle de corrente	61
Figura 5.2 – Estrutura básica do controle por histerese	62
Figura 5.3 – Modo de operação por histerese	63

Figura 5.4 – Diagrama do controle por histerese no SIMULINK	63
Figura 5.5 – Diagrama do controle por histerese, para uma fase	64
Figura 5.6 – Conversor <i>Half Bridge</i> após implementação do controle de corrente por histerese	65
Figura 5.7 – Correntes nas fases	66
Figura 5.8 – Conjugado do motor	66
Figura 5.9 – Corrente, indutância e Pulso de gatilho	67
Figura 5.10 – Rendimento	67
Figura 5.11– (a) Corrente na fase A, (b) Conjugado, (c) Rendimento, (d) Indutância, Corrente e tensão na fase A	68
Figura 5.12 – (a) Corrente na fase A, (b) Conjugado, (c) Rendimento, (d) Indutância, Corrente e tensão na fase A	68
Figura 5.13 – (a) Corrente na fase A, (b) Conjugado, (c) Rendimento, (d) Indutância, Corrente e tensão na fase A	69
Figura 5.14 – (a) Corrente na fase A, (b) Conjugado, (c) Rendimento, (d) Indutância, Corrente e tensão na fase A	70
Figura 5.15 – (a) Corrente na fase A, (b) Conjugado, (c) Rendimento, (d) Indutância, Corrente e tensão na fase A	71
Figura 5.16 – (a) Corrente na fase A, (b) Conjugado, (c) Rendimento, (d) Indutância, Corrente e tensão na fase A	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Dados do motor	43
-----------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AIE	Agência Internacional de Energia
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
D	Coeficiente de Atrito dinâmico
e	Força contra eletromotriz
EV	Veículos Elétricos
g	Pulsos de disparo
GRV	Gerador a Relutância Variável
HB	Conversor <i>Half Bridge</i> Assimétrico
HEV	Veículos Elétricos Híbridos
I	Corrente
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
J	Momento de inércia
L	Indutância
$L_{máx}$	Indutância máxima
L_{min}	Indutância mínima
MRV	Máquina/Motor a Relutância Variável
MREC	Motor a Relutância Eletronicamente Chaveado
MSRV	Motor Síncrono a Relutância
m_{xn}	Número de polos do estator x número de polos do rotor
N_s	Número de dentes do estator
N_r	Número de dentes do rotor
PHEV	Veículos Elétricos Híbridos do tipo <i>plug-in</i>
P_{total}	Potência de saída
P_m	Energia mecânica
P_r	Perda resistiva

r	Resistência de fase
sen	Seno
T	Torque produzido
T_{mec}	Conjugado mecânico
T_{re}	Período de Indutância do motor
T_e	Conjugado eletromagnético
v	Tensão induzida
ω	Velocidade angular
γ	Ângulo de passo do Motor de Passo a Relutância
θ	Ângulo de deslocamento do rotor em radianos
θ_{on}	Ângulo de fechamento das fases do conversor
θ_{off}	Ângulo de abertura das chaves do conversor

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	17
INTRODUÇÃO	17
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo Geral	18
1.2.2 Objetivos Específicos.....	19
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
 CAPÍTULO 2	 20
MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL	20
2.1 INTRODUÇÃO.....	20
2.2 MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL	23
2.2.1 Motor Síncrono a Relutância Variável	24
2.2.2 Motor de Passo a Relutância	25
2.2.3 Motor a Relutância Eletronicamente Chaveado	26
2.3 CONVERSOR <i>HALF BRIDGE</i> E ETAPAS DE FUNCIONAMENTO.....	30
2.4 APLICAÇÕES DO MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL	32
2.4.1 Aplicação em carros elétricos	32
2.4.2 Aplicação em geração eólica	34
 CAPÍTULO 3	 37
MODELO MATEMÁTICO DA MRV 6X4	37
 CAPÍTULO 4	 43
SIMULAÇÃO DE UMA MRV 6X4	43
4.1 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO SENOIDAL	43

4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO MODELO LINEAR SENOIDAL	52
4.2.1 Alternando intervalo de acionamento	56
4.2.2 Alternando a excitação	57
4.2.3 Alternando a carga	59
 CAPÍTULO 5	 61
ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE CORRENTE	61
5.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO MODELO LINEAR SENOIDAL COM CONTROLE DE CORRENTE	68
5.2.1 Alternando a corrente de referência	68
5.2.2 Alternando intervalo de acionamento	69
5.2.3 Alternando a excitação	71
 CAPÍTULO 6	 73
CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	73
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 75

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As máquinas elétricas são classificadas de acordo com seu princípio de funcionamento para a produção de conjugado – eletromagneticamente ou por relutância variável.

Na primeira categoria, o movimento é produzido pela interação dos campos gerados pelo estator e pelo rotor, onde esses campos magnéticos, mutuamente acoplados, produzem torque eletromagnético tendendo a alinhar os campos.

Na segunda categoria, o movimento é produzido pela relutância variável no entreferro entre o rotor e o estator. Quando um enrolamento do estator é energizado, o torque é produzido pela tendência do rotor a mover-se para a posição de mínima relutância, caracterizando o nome de Máquinas a Relutância Variável (MRV).

Devido a necessidade de atender a estes requisitos de operação, o seu uso foi propagado apenas nas últimas décadas devido aos avanços nos sistemas de acionamento de máquinas elétricas, que apresentaram consideráveis crescimentos em termos de eficiência, precisão e potência convertida [2].

Suas características construtivas incluem robustez, simplicidade estrutural, boa relação peso/potência, alto conjugado de partida, capacidade de operar com falta de uma das fases (em máquinas polifásicas), não possui enrolamentos no rotor, ímãs permanentes, escovas e comutadores. Além disso, pode funcionar como motor ou gerador, como qualquer outra máquina elétrica. Alguns destes aspectos garantem que a MRV seja mais barata quando comparada com outras máquinas que possuem a mesma potência e rotação [3].

Nas operações como motores não podem ser conectados diretamente ligados a um barramento CC ou a uma linha CA, necessitando de um conversor controlável, requerem

acionamento eletrônico, o conhecimento da posição instantânea do rotor e a rápida comutação de corrente entre as fases da máquina.

O desenvolvimento dos sistemas de acionamento, alinhados com suas vantagens positivas, fizeram com que a MRV fosse amplamente estudada pela comunidade científica, fazendo com que crescesse as publicações que relatasse contribuições para o avanço da sua tecnologia [4].

Os sistemas motrizes são dominados por motores de indução e motores CC, porém a MRV apresenta-se como uma boa opção de aplicação já que é um sistema que apresenta confiabilidade e desempenho similar a estes motores já utilizados, o que o torna competitivo [5].

Considerando que as máquinas elétricas ainda são partes importantes da gestão energética no contexto global, esse trabalho busca o estudo do funcionamento da MRV operando como motor, seus diversos tipos de operação e o desenvolvimento de uma plataforma computacional para seu controle de corrente.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho de conclusão de curso tem cunho interdisciplinar, pois envolve estudos de diversas áreas como: modelagem matemática de sistemas, controle eletroeletrônico, máquinas elétricas especiais e principalmente, aplicação alternativa de Motores a Relutância Variável (MRV), a partir de tecnologias em desenvolvimento e em amplo estudo no meio científico.

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo estudar o funcionamento da Máquina à Relutância Variável, seus métodos de acionamento e controle. Objetiva ainda o desenvolvimento de uma plataforma computacional para o controle de corrente da Máquina a Relutância Variável acionada como motor.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudo da Máquina a Relutância Variável operando como motor.
- Estudo das formas de acionamento e estratégias de controle de máquinas de relutância.

- Desenvolver uma plataforma computacional para o controle do corrente da máquina, simulando todos os elementos necessários para seu controle.
- Estudar o comportamento da Máquina a Relutância frente a oscilação e variação de alguns parâmetros como ângulos de magnetização e tensão de excitação.
- Contribuir cientificamente.
- Propor novas pesquisas a partir do trabalho proposto.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para alcançar os objetivos propostos, este trabalho foi organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2 é apresentado um estudo da Máquina à Relutância, a partir de investigações realizadas na literatura científica sobre seu processo evolutivo e as características que a torna particular em relação as outras máquinas. Nesse capítulo ainda é debatido sobre o acionamento da MRV como motor.

O Capítulo 3 mostra o modelo matemático da máquina levando em consideração as equações elétricas e mecânicas.

O Capítulo 4 descreve a simulação de um Motor à Relutância 6x4 e a validação do modelo apresentado, considerando a alteração dos ângulos de desmagnetização, tensão de excitação e da carga.

O Capítulo 5 apresenta a estratégia de controle em malha fechada. O controle de corrente por laço de histerese é apresentado e discutido. São abordados os detalhes da construção dos principais componentes e o desenvolvimento do controle no SIMULINK.

CAPÍTULO 2

MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

2.1 INTRODUÇÃO

Uma Máquina a Relutância Variável (MRV) tem seu funcionamento baseado na comutação de corrente nas diferentes fases, combinado com a posição do rotor e apesar de possuir sua origem em meados de 1942, estas máquinas não se desenvolveram por não existirem sistemas de acionamento capazes de atender de maneira eficiente a esses requisitos de operação. Devido ao desenvolvimento e ao barateamento de sistemas microprocessados, permitiu-se o avanço dos estudos e aplicações da MRV [4].

Além disso, os avanços da eletrônica de potência e do microprocessamento fizeram com que essas máquinas se tornassem viáveis, confiáveis e eficientes [5,6,7] em aplicações que necessitam de alto conjugado de partida [5] e tolerância a falta de fase [8].

A MRV é constituída de polos salientes do estator e no rotor, ou seja, dupla saliência, sendo que as bobinas das fases consistem em enrolamentos concentrados nos polos do estator [9,10]. As configurações construtivas desta máquina são conhecidas como $m \times n$, onde m é o número de polos do estator e n o número de polos do rotor, ou também conhecida como configuração polifásica.

No arranjo polifásico, o número de polos do rotor deve ser diferente do número de polos do estator. Dentre as geometrias conhecidas, a mais usual no meio científico é a 6×4 , apresentada na Figura 2.1. Considerando que cada par de polos no estator constitui apenas uma fase, esta é uma Máquina a Relutância Variável de três fases, sendo que estas podem ser energizadas separadamente ou simultaneamente.

Também na Figura 2.1 é possível contatar a ligação em série das bobinas de cada par de polos diametralmente opostos, que constituía uma fase, por exemplo, A e A'. Dessa maneira, a corrente que passa por essas bobinas será a mesma.

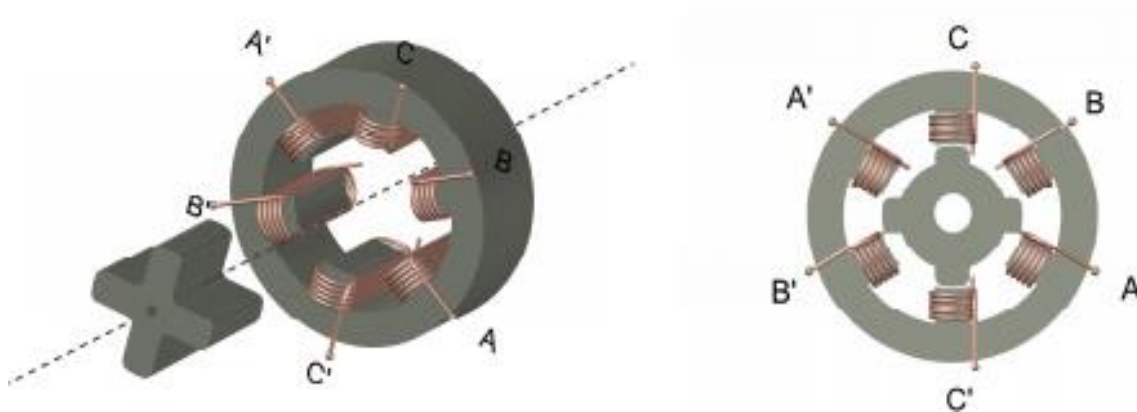


Figura 2.1 – Visualização em perspectiva e frontal do motor a relutância chaveado 6x4. [11]

A construção da MRV, não requer utilização de ímãs permanentes, consistindo apenas de lâminas de material ferromagnético acoplado a um eixo. A presença de bobinas somente no estator proporciona menores custos com cobre, bem como a redução de perdas por Efeito Joule [12]. O menor custo com material ferromagnético e cobre faz com que o custo de fabricação da MRV seja uma vantagem.

A ausência de ímãs permanentes e escovas, juntamente com a solidez do rotor reduzem o custo de manutenção [9] e aumentam a robustez [12], além disso permite uma operação em uma ampla faixa de variação de velocidade, com a possibilidade de aplicação em variadas áreas [11].

Quando a máquina é acionada como motor, uma carga pode ser acoplada. Para o funcionamento como gerador, é necessária uma máquina primária para fornecer potência mecânica. No caso do acionamento como gerador, quando a energia mecânica é aplicada no eixo da máquina, a magnetização das fases oferece torque resultando em força contra eletromotriz, o que gera energia elétrica [11].

O torque em uma MRV é produzido pelos pulsos de corrente nas fases sincronizados com a posição do rotor, ou seja, operando a partir da tendência do rotor se movimentar para a posição em que indutância do enrolamento energizado seja máxima (ou a relutância seja mínima) [7]. O movimento do rotor, e consequentemente, a produção de torque e potência dependem do chaveamento das correntes nas fases do estator quando há uma variação de indutância.

A comutação deve garantir que a corrente no enrolamento de fase atinja seu valor de referência no momento desejado de indutância e seja zero quando a indutância atingir seu valor máximo. Por conta do atraso do crescimento e decrescimento causado pela

indutância da fase, o chaveamento deve acontecer em um ângulo de ativação θ_{on} e um ângulo de desligamento θ_{off} .

Quando uma das fases é alimentada, o par de polos do estator em que estão energizados atrai o polo mais próximo, com o intuito de minimizar a indutância do caminho magnético. O rotor da máquina acompanha sincronamente a sequência de energização das fases, caracterizando operação motora. Assim, a direção do torque gerado é uma função da posição do rotor em relação à fase energizada, e é independente do sentido da corrente através do enrolamento da fase. Essas características mostram que é possível alterar o sentido de rotação, alterando a sequência de chaveamento da excitação do estator [13].

O eixo da máquina deve possuir sensores que indicam a posição instantânea do rotor, de forma que possa operar como motor ou como gerador a partir desta informação. Quando operando como motor o torque produzido é dado pela equação 2.1.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2.1)$$

Na equação 2.1, i é a corrente aplicada no enrolamento da fase, L é a indutância de fase e θ é a posição do rotor. Assim sendo, observamos que o torque positivo ocorre quando a fase é energizada durante o crescimento da indutância, caracterizando operação motora.

Se um motor primário oferece torque ao eixo da máquina e acontece a energização da fase durante o decrescimento da indutância, surge um torque de restauração que é convertido em energia elétrica que pode ser enviada para a carga. Nessa segunda condição, a máquina opera como gerador.

A partir da equação 2.1 verificamos que o torque é proporcional ao quadrado da corrente, portanto a corrente pode ser unipolar para produzir um torque unidirecional, ao contrário das máquinas CA, porém se assemelham quanto ao conjugado de partida, que é alto.

O fato da corrente circular em um único sentido se torna uma vantagem, sendo necessário somente um sistema de chaveamento para controlar a corrente na fase da MRV.

O momento de acionamento da chave do conversor é de fundamental importância para determinar se a operação da máquina vai ser motora ou geradora. A Figura 2.2 mostra

um perfil de indutância trapezoidal para ilustrar os momentos de variação da indutância. Para que o funcionamento seja como motor, as chaves do conversor devem ser acionadas em $\theta_{on\ mot}$, já para a operação como gerador, devem ser acionadas em $\theta_{on\ ger}$.

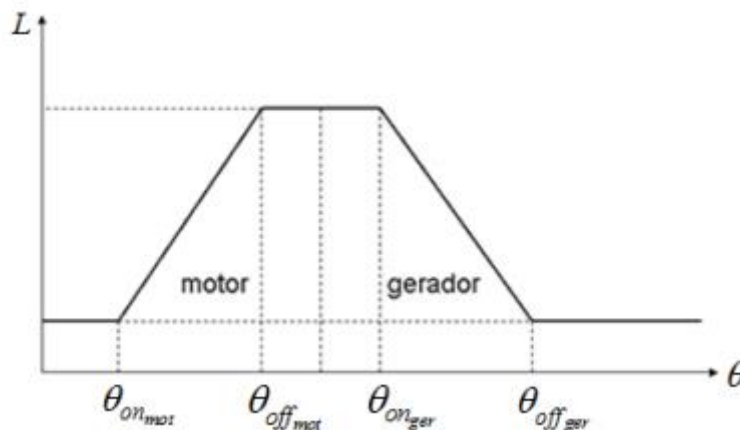


Figura 2.2 – Perfil de indutância trapezoidal do enrolamento de fase de uma MRV [14]

De acordo com as informações apresentadas, constatamos a necessidade da posição exata do rotor para um funcionamento adequado, seja como motor ou como gerador, sendo substancial o uso de sensores de posição e/ou velocidade [5, 6], ou a utilização da técnica de estimativa da posição rotórica [15].

2.2 MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

O motor à relutância variável é um motor elétrico no qual o conjugado é produzido pela tendência do rotor se mover para a posição onde a indutância do enrolamento excitado seja máxima, ou seja, quando uma fase do motor é energizada, os polos da parte móvel tendem a se alinhar com os polos do estator que está mais próximo [16].

Os enrolamentos são circuitos elétricos independentes (fases), que podem ser energizados simultaneamente ou separadamente, dependendo do esquema de controle ou conversor, a partir de pulsos unidirecionais de corrente [16].

Variando o número de polos no rotor, no estator e o número de fases, diversas geometrias podem ser construídas. Geralmente, aumentar o número de fases reduz a oscilação do torque, porém é preciso mais recursos eletrônicos [1]. Para garantir partida são necessárias no mínimo duas fases, e para garantir direção da partida, são necessárias pelo menos três fases.

Existem alguns motores que utilizam o princípio de variação da relutância do circuito magnético: Motor Síncrono a Relutância (MSRV), Motor de Passo à Relutância e Motor a Relutância Eletronicamente Chaveado (MREC). Eles se diferem em excitação, acionamento e configuração do estator.

2.2.1 Motor Síncrono a Relutância Variável

Estruturalmente, o motor síncrono a relutância variável é semelhante ao motor síncrono de polo saliente, porém não possui enrolamento de campo no rotor.

O estator possui uma superfície lisa, com uma série de ranhuras para o alojamento das fases, que estão posicionadas no mesmo ângulo onde o enrolamento do estator são excitados por correntes senoidais. Dessa forma, cria-se polos magnéticos, gerando um campo magnético girante de amplitude constante que se movimenta de acordo com a velocidade síncrona definida pela frequência da fonte de alimentação e o número de polos do rotor [16].

O campo rotacional no entreferro, criado pelos enrolamentos do estator, faz com que haja torque de relutância no rotor pelo princípio que o campo girante do rotor tenderá a ficar alinhado com o campo do estator na posição em que a relutância é mínima. Esta posição é alcançada quando o rotor gira em sincronismo com o eixo do fluxo magnético.

O rotor é anisotrópico, ou seja, possui direções preferenciais para o caminho do fluxo magnético. Sua constituição de ferro permite o que o rotor alcance velocidades elevadas, como em motores de ímã permanente [16].

Análises realizadas mostram que este tipo de máquina possui vantagem sobre os motores de indução em alguns fatores como mais eficiência, capacidade de operação em sobrecarga, densidade de torque, simplicidade e custo menor na produção e baixa temperatura. Porém algumas desvantagens estão ligadas ao fato desse tipo de motor necessitar de mais material em sua estrutura, o deixando mais pesado e tendo um fator de potência menor [16].

A Figura 2.3 mostra um motor síncrono à relutância variável de dois polos.

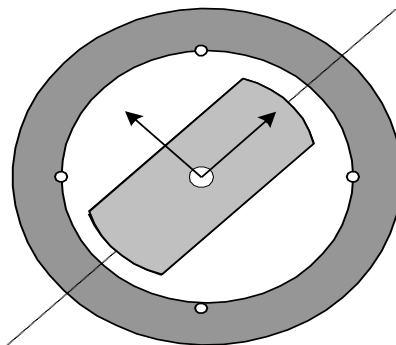


Figura 2.3 – Corte do motor síncrono a relutância [16]

2.2.2 Motor de Passo a Relutância

Construtivamente, o motor de passo à relutância é idêntico ao motor de relutância eletronicamente chaveado, sendo que o motor de passo não dispõe de dispositivos de detecção da posição do rotor, pois não necessita de realimentação de posição.

Estes motores estão disponíveis com estator simples e estatores múltiplos. O estator e o rotor são, normalmente, constituídos de aço laminado de silício, porém rotores de aço sólido de silício também são bastante usuais. Os materiais de ambas as partes devem possuir alta permeabilidade e ser capaz de permitir a passagem de um alto fluxo magnético, mesmo se uma baixa força magneto motriz for aplicada. [16]

O ângulo de passo é relacionado com o número de dentes do estator e do rotor. Em uma volta completa, o ângulo de passo é obtido pela Equação 2.2.

$$\theta = \frac{360}{Nr * Ns} \quad (2.2)$$

Os motores de múltiplos estatores possuem três ou mais estatores idênticos magneticamente independentes, sendo que o rotor é fabricado em uma única unidade, que é apoiada em cada extremidade da máquina por enrolamentos, tornando possível obter diferentes ângulos de passo. Cada estator corresponde a uma fase e o número de dentes do rotor é igual ao número de dentes do estator. A Figura 2.4 (b) mostra a seção transversal de um motor a relutância variável de três estatores. [16]

No motor de estator simples, quando uma fonte CC é aplicada a fase do estator com a ajuda de um interruptor semicondutor, um campo magnético é produzido e o eixo do rotor alinha-se com o eixo do estator. A Figura 2.4 (a) mostra um corte do motor de passo à relutância, de estator simples com ângulo de passo $\gamma = 30^\circ$.

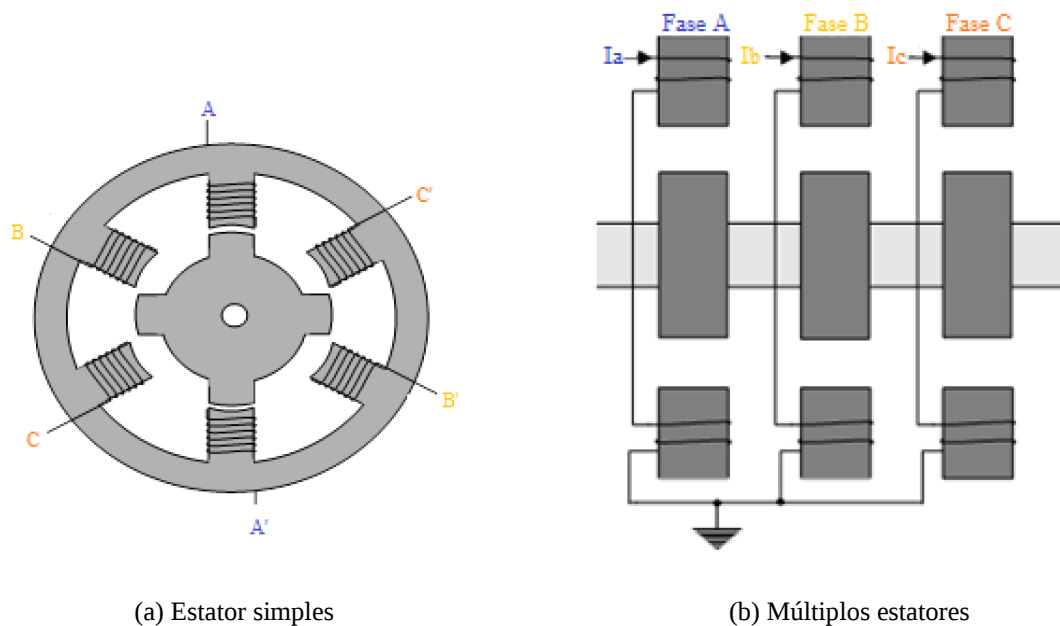


Figura 2.4 – Corte do motor de passo à relutância [16]

2.2.3 Motor a Relutância Eletronicamente Chaveado

No motor a relutância variável eletronicamente chaveado ou motor a relutância chaveado, o rotor e o estator possui polos salientes, o que contribui para um alto torque de saída.

O estator é constituído de fases independentes, sendo que cada fase possui dois enrolamentos localizados em locais opostos ao longo do diâmetro e conectados em série de forma que o fluxo produzido seja aditivo.

O rotor é basicamente uma peça de aço laminado, feito de material magnético, moldada para formar os polos salientes, como apresentado na Figura 2.5. Como resultado, estas características garantem robustez, bom desempenho em velocidades elevadas e a redução de perdas Joules, já que elas ocorrem somente no estator, o que facilita também a ventilação da máquina.



Figura 2.5 – Rotor de uma MRV real com quatro polos [17]

O número de polos do estator deve ser desigual ao número de polos do rotor, para evitar a possibilidade de o rotor estar num estado em que não produza torque inicial, o que ocorre quando todos os polos do rotor estão alinhados com os polos do estator. Algumas combinações $m \times n$ possíveis são: 6x4, 8x6, 10x6, 12x8. A Figura 2.6 ilustra a geometria 6x4 que é o objeto de estudo deste trabalho.

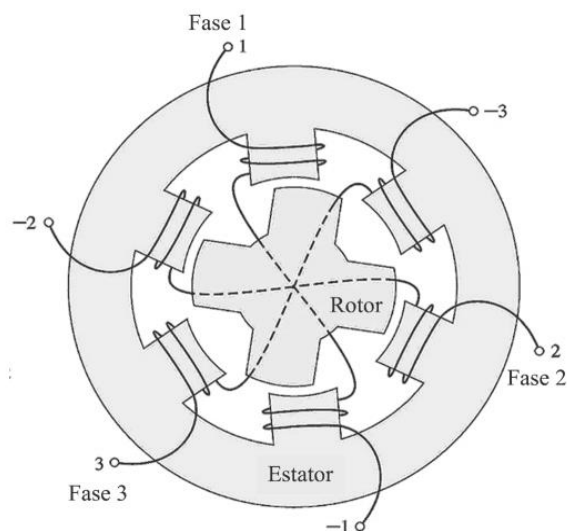


Figura 2.6 – Motor à relutância variável 6x4 [18]

A posição alinhada de uma fase é definida pela situação em que os polos estator e do rotor estão completamente alinhados uns com os outros, atingindo a posição em que a relutância é mínima e a indutância máxima, conforme a Figura 2.7 (a). Mesmo com a presença de corrente neste intervalo, não há produção de conjugado que favoreça o movimento do rotor, pois a tendência é que o rotor permaneça nessa posição de mínima relutância.

No caso da configuração 6x4, quando o rotor desloca 45° no sentido horário em relação à posição alinhada, os polos do estator ficarão simetricamente desalinhados com polos do rotor, como mostrado na Figura 2.7 (b). Essa posição é dita como sendo a posição desalinhada onde o fluxo é predominantemente determinado pelo ar, portanto, a indutância é mínima e constante. Essa região não contribui com a produção de torque [19].

O posicionamento desalinhado é instável porque quando a fase está energizada e ocorre um pequeno deslocamento do rotor, o eixo se movimentará para a próxima posição de alinhamento.

Nas posições intermediárias, mostradas na Figura 2.7 (c) e (d) a curva de magnetização também é intermediária entre as posições de alinhamento de desalinhamento.

Na Figura 2.7 (c) os polos estão sobrepostos, então o caminho do fluxo é em grande parte pelas laminações do rotor e do estator. A posição do rotor aumenta a indutância e a corrente aplicada na fase nesta região produz um torque positivo (ação motora). A próxima saliência do rotor deve ser magnetizada para atrair o motor a continuar seu movimento. [19]

A Figura 2.7 (d) mostra o rotor se movimentando para longe do alinhamento com o estator. A indutância está decrescendo e a operação nessa região resulta em um torque negativo (ação geradora).

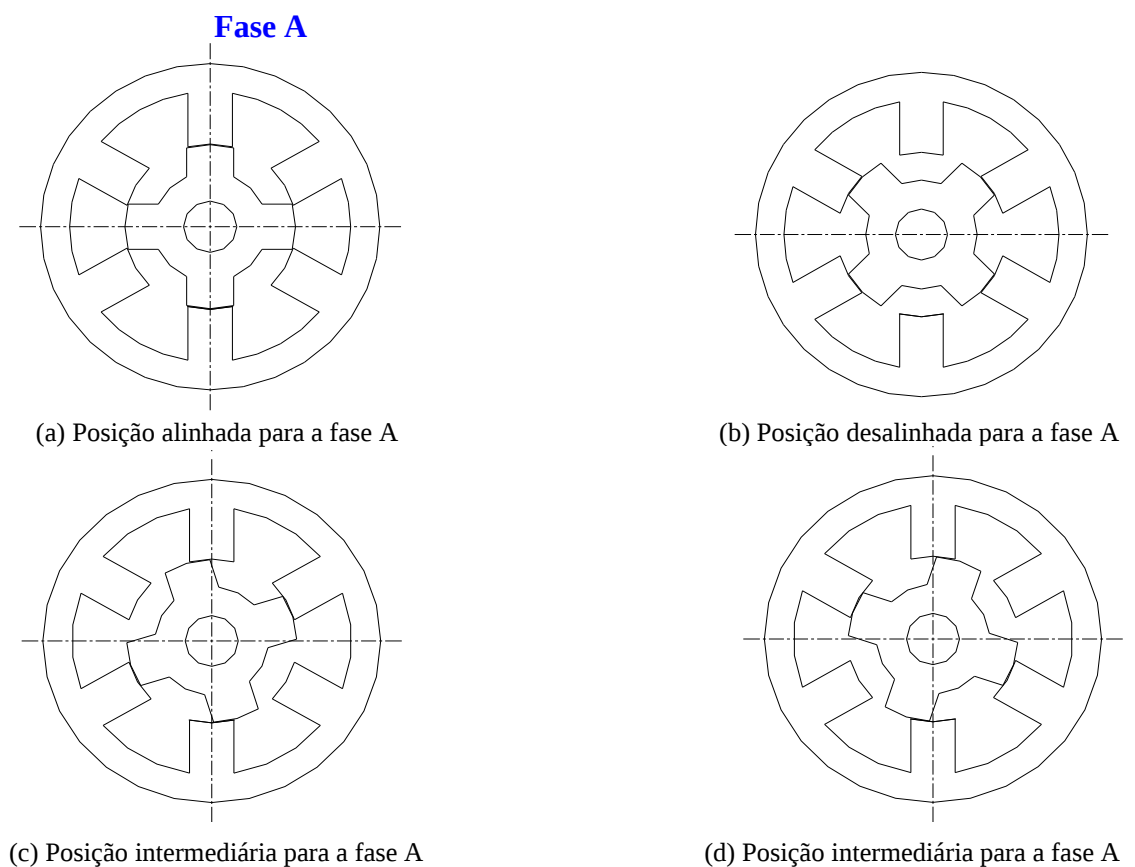


Figura 2.7 – Vista em corte de um MRV 6x4 com o rotor em diferentes posições [16]

A figura 2.8 mostra o perfil de indutância trapezoidal idealizado do motor 6x4. É possível observar que as indutâncias possuem período de 90° , que é o passo polar do

motor. Entre as fases o deslocamento é de 60° , que surge a partir da divisão de 360° por seis (quantidade de polos no estator).

A indutância da fase A é máxima em $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ e 270° , posições em que o rotor se alinha com o polo do estator. Com o movimento do rotor no sentido horário, os polos se desalinham e a indutância decresce linearmente ($dL/d\theta$ é constante e negativo). Dando continuidade a fase B começa a sobrepor os polos e a indutância cresce linearmente ($dL/d\theta$ é constante e positivo).

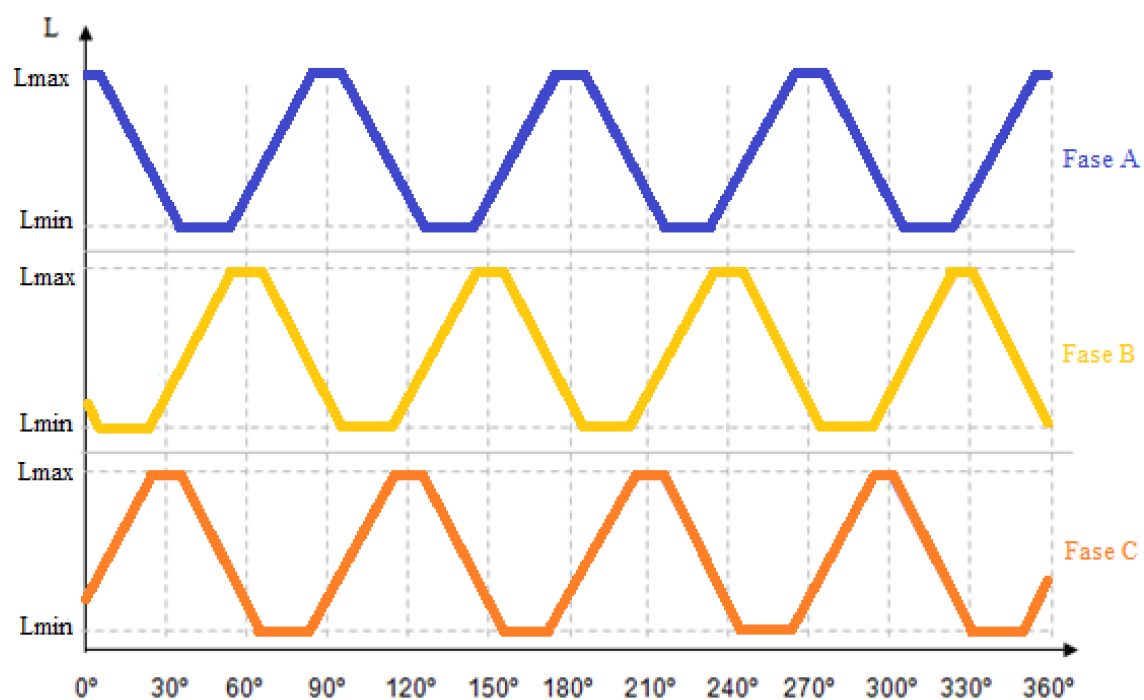


Figura 2.8 – Perfil das indutâncias de fase idealizadas [13]

Para que a Máquina a Relutância Variável opere como motor, é necessário que a magnetização das fases da máquina aconteça durante o crescimento da indutância como indicado na Figura 2.9, onde o ângulo θ_{on} representa a posição onde as chaves são acionadas e a fase magnetizada. O ângulo θ_{off} representa a posição final de magnetização das fases.

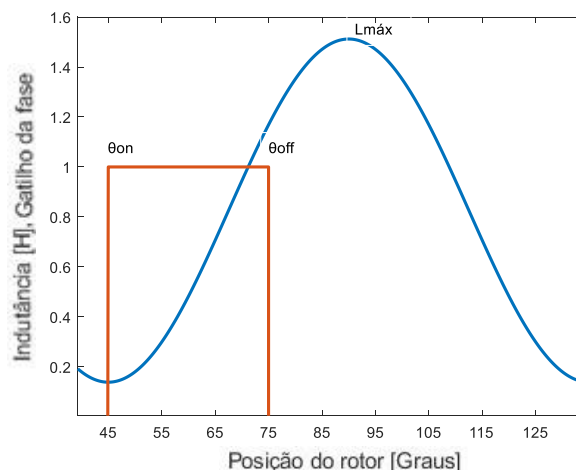


Figura 2.9 – Perfil de indutância e pulso de acionamento de uma fase do Motor a Relutância Variável

2.3 CONVERSOR *HALF BRIDGE* E ETAPAS DE FUNCIONAMENTO

Na operação como motor ou gerador, a máquina a relutância necessita de um conversor estático de potência. A capacidade de excitar cada uma das fases individualmente e no momento correto evidencia a necessidade conhecer a posição do rotor, seja por sensores mecânicos ou através de técnicas de estimação. O conversor deve ser capaz também de criar um caminho para a transferência de energia para a carga, ou para a fonte de energia.

Como mostrado na Figura 2.9, a ação motora de uma MRV requer que a corrente seja pulsada quando a indutância de fase está crescendo e que a corrente seja zero quando a indutância de fase está caindo.

Existem diversas configurações de conversores para a energização de Máquinas à Relutância e se distinguem pelo número de semicondutores e elementos passivos. Estas estruturas também dependem do número de fases do motor e de como as bobinas do estator estão conectadas.

A topologia mais utilizada para o acionamento das MRV de duas e três fases é a meia ponte assimétrica ou *half bridge* assimétrico (*HB*) [9]. Como visto na Figura 2.10, o conversor consiste em um par de diodos e de duas chaves por fase.

Um conversor assimétrico possui a capacidade de aplicar tensão positiva, negativa ou nula à uma fase. Quando uma fase atinge o ângulo de desligamento, a corrente deve ser reduzida a zero, caso não aconteça torque negativo seria gerado.

As chaves são comutadas para controlar as formas de onda de corrente ou de tensão nas máquinas em geral. Já que as MRV são controladas por corrente, a estratégia de controle dela é aplicada. Isso permite que uma fase seja energizada individualmente, enquanto a outra está sendo desmagnetizada com qualquer nível de sobreposição de correntes.

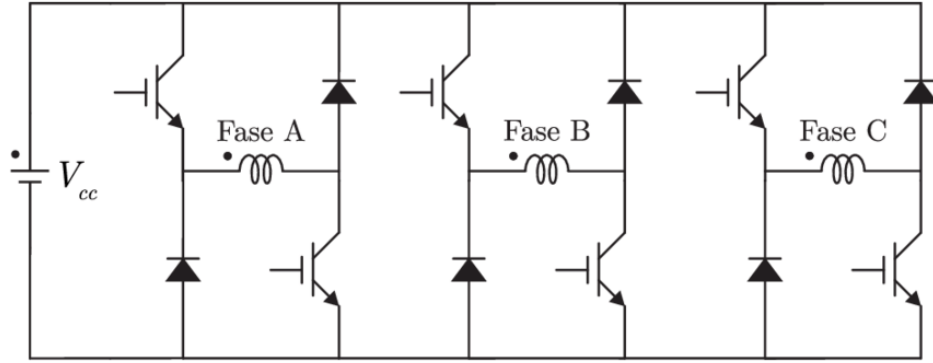


Figura 2.10 – Conversor *half bridge* aplicado para acionar o MRV [20]

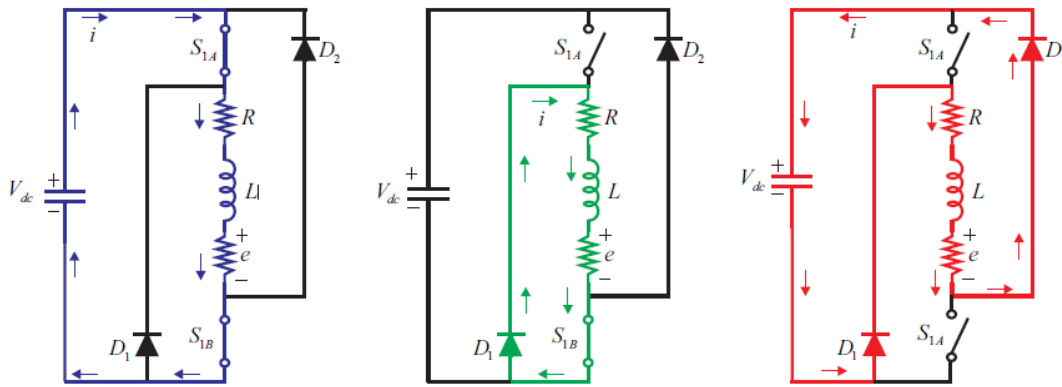


Figura 2.11 – Etapas de acionamento de um conversor *HB*: a) Excitação; b) Roda livre; c) Desmagnetização [21]

Cada conversor *HB* possui três modos de operação, como mostrado na Figura 2.11. O primeiro, durante o ciclo de positivo de tensão, ocorre quando as duas chaves, que estão associadas à fase da máquina, estão ligadas. A fonte de tensão é conectada no enrolamento de fase e a corrente elétrica cresce rapidamente, circulando pelo caminho positivo do barramento, fornecendo energia para o motor. Esta etapa de magnetização é dada pela Equação 2.3:

$$V_{dc} - e = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2.3)$$

A segunda fase é quando a tensão é nula, ocorre se uma das duas chaves está desligada, denominada de etapa em roda livre (*freewheeling*). Neste caso, a corrente

continua a circular por uma chave e um diodo. A energia não é retirada e nem fornecida à fonte de tensão. A tensão da fase durante esse ciclo é igual à soma da tensão inicial dos dois dispositivos semicondutores, portanto o valor é extremamente baixo quando comparado ao valor da fonte, fazendo que a corrente diminua lentamente. A Equação 2.4 que descreve esse modo de operação é:

$$-e = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2.4)$$

O último modo de operação é durante ao ciclo de tensão negativo, onde ambas as chaves estão desligadas. A corrente é forçada a circular pelos diodos de roda livre, decaindo rapidamente enquanto a energia armazenada no circuito magnético retorna do motor para o barramento. A etapa de desmagnetização é dada pela Equação 2.5:

$$-V_{dc} - e = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2.5)$$

2.4 APLICAÇÕES DO MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

A concentração dos estudos das MRV estão aplicados velocidades variáveis. Para estas aplicações, são necessários conversores eletrônicos para as MRVs, como também para as máquinas de indução, tornando essa máquina competitiva.

Ao longo das últimas décadas a sociedade tem buscado alternativas para solucionar alguns problemas como mudanças climáticas, poluição do ar, das águas entre outros. Novas tecnologias, novos comportamentos governamentais vêm sendo introduzidos para incentivar a economia, consequentemente a inovação.

Neste âmbito, duas aplicações conhecidas das Máquinas à Relutância Variável são em geração de energia eólica e em carros elétricos. Estas aplicações são motivadas por conta do crescente custo na geração de energia e na exaustão das fontes de combustíveis de carbono tradicionais. Estas mudanças promovem o estudo de fontes alternativas de energia, o que podem ser viabilizadas pelas MRVs.

2.4.1 Aplicação em carros elétricos

Em meio às necessidades de redução dos gases de efeito estufa bem como a redução do uso de combustíveis fósseis, a busca pelo desenvolvimento de novos modelos

energéticos para a mobilidade aumenta, visando diminuição do uso de fontes não renováveis e melhoria da qualidade de vida das populações.

Ao longo das últimas duas décadas, muitos países estão lidando com escassez de energia e problemas ambientais elevados causados pelos carros a combustão, sendo que o setor de transporte vem sendo o vilão das emissões de gases de efeito estufa. No último ano este setor contribuiu com 25% das emissões globais, onde os carros leves lideram, com 45% do volume emitido [22].

No presente existem tecnologias para que veículos não tenham nenhuma ou pouca emissão de gases de efeito estufa, são eles: carros elétricos/híbridos, veículos a célula de hidrogênio e veículos de combustão de hidrogênio. Contudo, os veículos elétricos são dominantes em relação aos demais devido a sua eficiência energética, térmica e a viabilidade econômica.

Os veículos elétricos se dividem em veículos elétricos (EVs), híbridos (HEVs) e os híbridos do tipo *plug-in* (PHEVs). Os elétricos são propulsados por motores elétricos, sendo que sua energia proveniente da rede de abastecimento de energia elétrica é armazenada em baterias.

Os híbridos combinam motores elétricos com motores a combustão interna sendo que podem ter motores a combustão destinados a apenas carregar as baterias ou ser responsáveis pela tração dos veículos, dividindo a tarefa de propulsão com os motores elétricos ao mesmo tempo que carregam as baterias. Já os híbridos do tipo *plug-in* são os que além de possuírem motores a combustão, também podem ser ligados à rede elétrica para carregar suas baterias, podendo assim rejeitar, de dependendo do uso, do acionamento do motor a combustão [23].

Diversos motores elétricos vêm sendo estudados e comparados por pesquisadores para a utilização nestes casos, porém os motores a relutância variável têm tomado a atenção devido a sua simplicidade estrutural, alta eficiência, baixo custo e flexibilidade de controle. Sua estrutura sem fontes magnéticas permitem um amplo range de velocidade e ser compatível com condições ambientais árduas.

Os Motores a Relutância Variável com design e controle apropriado são compatíveis com as exigências que envolvem ter alta densidade de torque, entregar uma potência elevada por um tempo relativamente longo quando operando como motor e ter um custo baixo [24].

As MRVs são de baixo custo pois seu rotor é construído de um empilhamento de lâminas, formando uma superfície áspera e de baixo valor. O rotor é capaz de operar em velocidades muito altas, sem problemas associados as fases no rotor ou imãs permanentes. As fases concentradas no estator se associam com os polos salientes do rotor fazem com que o processo de construção do estator seja simples e barato [25].

Além disso, as Máquinas à Relutância Variável possuem o potencial de funcionarem em ambientes de alta temperatura. A máxima temperatura de operação é delimitada pela isolamento do sistema, já que não possui imãs permanentes. Alguns designs destas máquinas foram explorados para ambientes de temperatura de 400°C [25].

As fases do motor são fisicamente e eletromagneticamente isoladas uma das outras, o que minimiza a possibilidade de uma falha fase-a-fase e permite que a fase problemática seja isolada do resto do sistema, o que não diminui o torque quando a máquina está operando como motor.

Como desvantagens do uso dessa máquina podemos citar a oscilação do conjugado, vibração e o ruído. Os ruídos são causados pelas forças radiais que aumentam inversamente ao entreferro e quando a frequência está próxima a frequência de ressonância do estator [26].

As oscilações mecânicas são causadas pelo movimento relativo entre as partes das máquinas e dos enrolamentos. Já as vibrações magnéticas são produzidas pelos *gaps* com ar no estator devido os gradientes de permeabilidade. Todas fontes de produção de ruído contribuem para vibrações mecânicas [26].

Alguns estudos visam reduzir as oscilações de torque através de modelos matemáticos como modificações na função de distribuição de torque, otimização da curva de corrente e adaptação da lógica fuzzy [27, 28, 29].

Portanto, se as características inerentes a Máquina à Relutância Variável forem propriamente exploradas, os sistemas podem ser construídos para aumentar a capacidade dos motores ou diminuir falhas nos inversores para aplicação em carros elétricos.

2.4.2 Aplicação em geração eólica

O crescimento de energias limpas é constante, como um reflexo, em 2015, as estatísticas da Agência Internacional de Energia (AIE) apresentaram que elas representam

quase que a metade da capacidade de geração instalada em 2014, sendo a segunda maior fonte de energia mundialmente atrás do carvão. No Brasil, a matriz elétrica de grande parte renovável, já que a maioria da energia gerada vem de usinas hidrelétricas. [30].

A energia eólica vem crescendo bastante, contribuindo para este número. Na última década, o uso de turbinas eólicas cresceu mais de 25% ao ano [31]

O vento é a fonte de energia das turbinas eólicas e como é de conhecimento, a velocidade dos ventos varia ao longo do dia, como consequência, a energia gerada nas turbinas mudam com isto. Atualmente, são estudados diversos tipos de geradores para esta aplicação, sendo os Geradores a Relutância Variável (GRV) como uma das opções por conta do decréscimo do preço dos geradores de energia eólica quando empregado essas máquinas [32].

O baixo custo se sustenta no fato destas máquinas não possuírem escovas, o rotor não possuir fases e de não ser constituído de ímãs prementes, dado que é construído de aço laminado.

As características de saída dos GRVs podem ser controladas em um amplo âmbito, devido ao controle dos ângulos de comutação. Para um design escolhido da máquina, a amplitude da velocidade correspondente de operação pode ser determinada através da seleção dos parâmetros dos enrolamentos e o tipo de conversor eletrônico.

Os enrolamentos podem ser selecionados de modo a levar em conta a faixa de tensão na qual a máquina deve operar. Ao mesmo tempo, para um determinado parâmetro das fases, é possível obter uma variedade de parâmetros de saída da máquina, dependendo dos ângulos de comutação, o que pode proporcionar um potencial considerável em termos de adaptação de valores instantâneos de torque. Isto se aplica a casos particulares em que flutuações consideráveis de torque e velocidade sejam necessárias, como é o caso de turbinas eólicas [33].

Para que a MRV funcione como gerador, é preciso que seja feita magnetização das fases durante a diminuição da indutância em relação a posição do rotor. A força eletromotriz surge com a soma da magnetização da fase com a entrada do conjugado mecânico no eixo. Esse surgimento da força faz com que aumente a taxa de crescimento da curva de corrente, o que podemos definir como geração de energia elétrica [11].

Durante a fase de processo de design envolvendo a cooperação do gerador de da turbina eólica, é adicionalmente necessário para levar em consideração o impacto de

outros subconjuntos como o rotor, a engrenagem e a localização do gerador, já que a velocidade média do vento e as suas variações anuais diferem dependendo da localização.

As características de um gerador devem depender do terreno e da localização em que foi projetado para operar. As velocidades médias anuais dos ventos são consideravelmente maiores ao longo da costa que no interior, além disso, variam de acordo com a altura acima do solo do gerador instalado. Sendo assim, a adoção de premissas inadequadas pode levar a um design de alto desempenho que poderá ser ineficiente em um determinado local [33].

CAPÍTULO 3

MODELO MATEMÁTICO DA MRV 6X4

O perfil de indutância definido para análise é o linear, são desprezados os efeitos da magnitude da corrente sobre o fluxo magnético concatenado para uma posição angular específica. A Figura 3.1 ilustra perfis de fluxo magnético linear *versus* corrente para determinadas posições angulares do rotor de uma MRV.

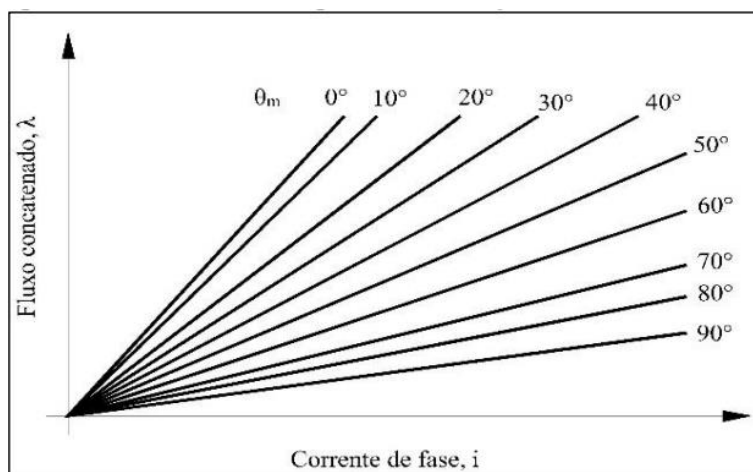


Figura 3.1 – Fluxo concatenado *versus* corrente de fase para uma máquina linear [34]

Nos motores, a produção de conjugado eletromagnético exerce a rotação em uma direção de funcionamento. A existência de conjugados contrários a essa direção adotada faz com que o rendimento da máquina reduza. Por isso, a necessidade de conhecer a equação que rege a produção de conjugado dessas máquinas. Baseado no diagrama elétrico do motor, representado na Figura 3.2, podemos desenvolver o modelo matemático do MRV, incluindo a resistência e a indutância de fase.

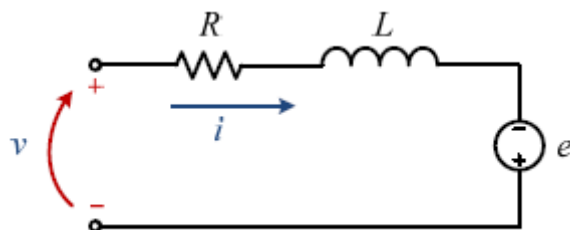


Figura 3.2 Circuito equivalente de uma fase do MRV [11]

A tensão aplicada na fase do MRV pode ser descrita como a soma da diferença de potencial na resistência e da tensão induzida na indutância de fase:

$$v = Ri + \frac{d\lambda(\theta)}{dt} \quad (3.1)$$

Considerando que as indutâncias mútuas entre as fases são muito pequenas e podem ser desprezadas [16], temos que $\lambda(\theta) = i * L(\theta)$, λ é o fluxo concatenado, i é a corrente no enrolamento, θ é a posição do rotor e L é a indutância incremental de fase. Como a indutância depende da corrente e da posição angular do rotor, a equação 3.1 se torna:

$$v = Ri + L(\theta) * \frac{di}{dt} - e \quad (3.2)$$

O valor da indutância em função da posição é denominado de indutância neste trabalho e a variação dessa mesma indutância em relação à posição e a corrente é denominada de indutância incremental.

Na equação 3.2, o termo e representa a força contra eletromotriz, que pode ser descrita como:

$$e = i\omega \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (3.3)$$

Onde: $\omega = d\theta/dt$ é a velocidade angular do rotor.

Portanto, a equação 3.1 pode ser reescrita por:

$$v = ri + \frac{Ldi}{dt} + \frac{idL(\theta)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (3.4)$$

Multiplicando a equação 3.2 pela corrente, obtemos a potência de saída:

$$P_{total} = vi = Ri^2 + iL(\theta) \frac{di}{dt} + i^2\omega \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (3.5)$$

A energia que entra no sistema gera um conjugado eletromagnético T_e , e como consequência dessa entrada, é produzido um conjugado mecânico T_{mec} na saída do sistema. Deve-se considerar também que, para que seja encontrada uma equação que descreva a máquina mecanicamente, é necessário considerar que a inércia do sistema será vencida $\left(J \frac{d\omega}{dt}\right)$, assim como o atrito dinâmico dos mancais $(D\omega)$, como descrito na equação 3.5:

$$T_e = T_{mec} + D\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.6)$$

Matematicamente a energia mecânica é dada por:

$$P_m = \omega_r T_e \quad (3.7)$$

Onde: T_e é o conjugado eletromagnético instantâneo.

Por definição, a energia mecânica é o que permanece da potência total de entrada depois subtração da perda resistiva ($P_r = Ri^2$) e da derivada da energia armazenada magnética. A derivada da energia magnética armazenada é obtida aplicando a regra da cadeia:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Li^2 \right) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{dt} + Li \frac{di}{dt} = L(\theta) \frac{di}{dt} + i^2 \omega \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (3.8)$$

Uma característica importante da MRV, constatada pela equação 3.8 é que o sentido do conjugado não depende do sentido da corrente aplicada.

Por fim, subtraindo a perda resistiva ($P_r = Ri^2$) e a derivada da energia magnética armazenada da potência total de entrada e isolando o torque eletromagnético temos:

$$T_e = \frac{1}{2} * i^2 * \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (3.9)$$

Conforme a equação acima, o conjugado é proporcional ao quadrado da corrente na fase e a derivada da indutância em relação à posição do rotor e a corrente. Ao aplicar corrente na fase no intervalo de posição que a relação $dL/d\theta$ é positiva, ou seja, se o fluxo de corrente no enrolamento de fase assim como a indutância está aumentando, o conjugado produzido é positivo. Quando aplicada corrente quando $dL/d\theta$ é negativo, o conjugado produzido é negativo.

Mesmo que as equações acima representam somente uma fase da máquina, elas podem expandidas para qualquer combinação de estator e rotor.

Particularmente, o MRV 6x4 mostrado na Figura 3.3, possui três fases denominadas de A, B e C. As equações individuais de cada fase são idênticas às mostradas acima, porém o que mostra sua individualidade é o período de indutância devido à quantidade de polos, como é mostrado a seguir. O período de indutância no motor 6x4 é dado por $T_{re} = \frac{360}{Nr} = \frac{360}{4} = 90^\circ$, onde Nr é o número de polos do rotor.

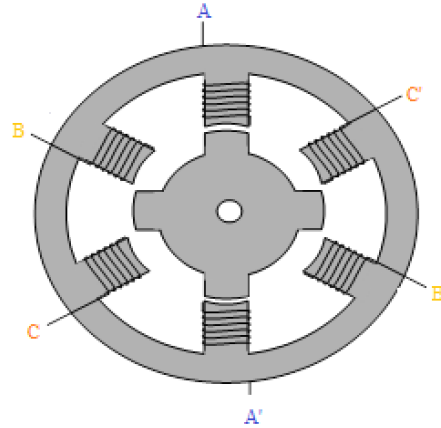


Figura 3.3 – Corte transversal de uma MRV 6x4 [16]

Utilizando a aproximação da indutância à uma senóide em todas as fases, a equação fica como apresentado em 3.10:

$$\begin{aligned} L_a &= A + B \cos(\theta) \\ L_b &= A + B \cos(4(\theta - 60^\circ)) \\ L_c &= A + B \cos(4(\theta + 60^\circ)) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Onde: $A = (L_{m\acute{a}x} + L_{m\acute{i}n})/2$ e $B = (L_{m\acute{a}x} - L_{m\acute{i}n})/2$, que são constantes obtidas a partir dos valores máximo e mínimo da indutância do motor.

A derivada da indutância em relação a posição das três fases fica:

$$\begin{aligned} \frac{dL_a(\theta)}{d\theta} &= -4B \sin(4\theta) \\ \frac{dL_b(\theta)}{d\theta} &= -4B \sin(4(\theta - 60^\circ)) \\ \frac{dL_c(\theta)}{d\theta} &= -4B \sin(4(\theta + 60^\circ)) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Considerando a equação 3.9 para todas as fases:

$$T_e = -2Bi_a^2 \sin(4\theta) - 2Bi_b^2 \sin(4(\theta - 60^\circ)) - 2Bi_c^2 \sin(4(\theta + 60^\circ)) \quad (3.12)$$

A partir das equações desenvolvidas acima, descrevem um MRV elétrica e mecanicamente. Portanto, é possível montar a matriz de estado da máquina, apresentada na equação 3.14:

$$[v] = [r] * [i] + [L] * \dot{[i]} \quad (3.13)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ C \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 & 0 \\ r_a & r_b & r_c & -B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & 0 & 0 & 0 & i_a \frac{dL(\theta)}{d\theta} \\ 0 & L_b & 0 & 0 & i_b \frac{dL(\theta)}{d\theta} \\ 0 & 0 & L_c & 0 & i_c \frac{dL(\theta)}{d\theta} \\ 0 & 0 & 0 & -J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Onde: $r_a = -2Bi_a \sin(4\theta)$; $r_b = -2Bi_b \sin(4(\theta - 60))$; $r_c = -2Bi_c \sin(4(\theta + 60))$

A potência de entrada é resultado da tensão de entrada vezes a corrente de entrada, grandezas medidas na entrada do conversor *Half-Bridge*.

$$P_e = V_e * I_e$$

A potência de saída é obtida através da multiplicação entre o torque mecânico e a velocidade angular.

$$P_s = T_m * w$$

O rendimento obtido a partir da potência de entrada dividida pela potência de saída, como mostrado da equação 3.15:

$$\eta = \frac{P_e}{P_s}$$

(3.15)

A Figura 3.4 mostra o conjugado em função da posição do rotor para cada uma das fases do motor 6x4.

Considerando a fase A, no momento inicial em que θ é igual a 0, a sua contribuição de conjugado é nula pois não há variação da indutância. Posteriormente, o momento de decrescimento da indutância apresenta um conjugado negativo, caso seja aplicado uma corrente de fase. No instante em que a indutância é mínima, a contribuição da fase também é nula. Por fim, durante o crescimento da indutância, o conjugado produzido é positivo.

Observa-se que conhecer a posição instantânea do rotor em relação aos polos do estator é importante para que possa ser feita a sincronização da energização das fases com a posição angular do rotor. Essa coordenação é necessária para a obtenção do conjugado com características específicas. Além disso, escolher os ângulos de chaveamento é importante para a definição do perfil e do nível de conjugado que a máquina irá desenvolver;

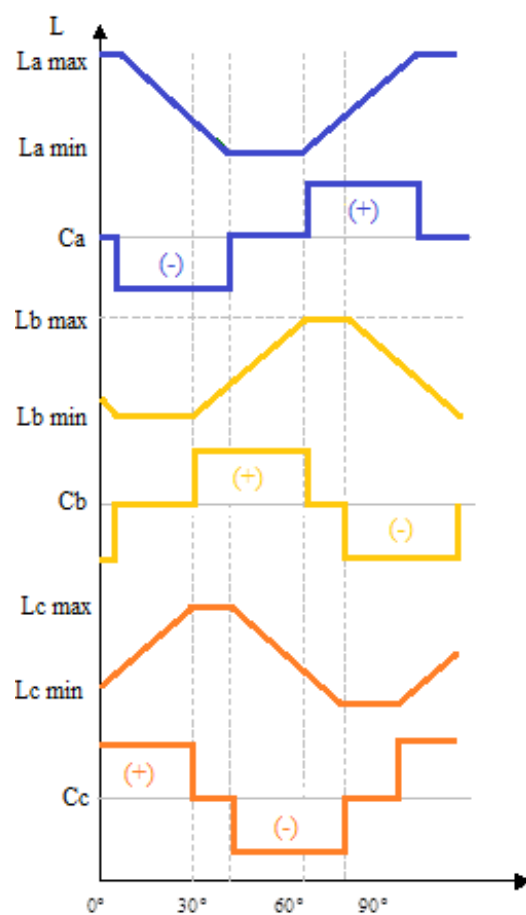


Figura 3.4 – Produção de conjugado em uma máquina 6x4 [16]

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÃO DE UMA MRV 6X4

4.1 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO SENOIDAL

A partir da matriz de estado do motor, implementou-se o modelo senoidal utilizando o software SIMULINK. O modelo apresentado representa a simulação em malha aberta. O diagrama de blocos com as principais estruturas pode ser visto na Figura 4.1.

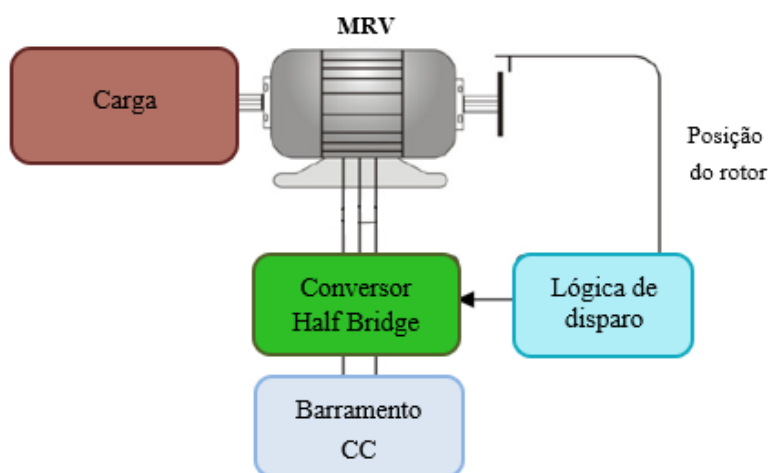


Figura 4.1 – Diagrama de blocos do acionamento do MRV [Adaptado de 11]

O motor foi simulado utilizando a interface gráfica do MatLab. A construção da MRV foi feita em uma carcaça de um motor de indução, que apresenta carga nominal de 1,5 CV e 2.000 rpm. A partir dos ensaios experimentais, estimou-se os parâmetros indicados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Dados do motor

Parâmetros do motor	
$J = 2,8 \times 10^{-3} \text{ Kg.m}^2$	$L_{\text{máx}} = 0,0360 \text{ H}$
$D = 2,6 \times 10^{-4} \text{ Kg.m}^2/\text{s}$	$L_{\text{mín}} = 0,0033 \text{ H}$
$R_a, R_b \text{ e } R_c = 0,32 \text{ ohms}$	

A Figura 4.2 mostra o protótipo do motor referência de dados, desenvolvido na Universidade Federal de Uberlândia (UFU), por [34].



Figura 4.2 – Protótipo do MRV utilizado [16]

Na Figura 4.3 é possível observar três subsistemas principais, quais sejam: “Conversor *Half Bridge*” onde está presente o conversor utilizado para a alimentação do motor, “Lógica de Disparos das Chaves”, onde está o algoritmo para a lógica de chaveamento do conversor *Half Bridge* e o “Motor a Relutância Variável 6X4” que possui a modelagem matemática do motor.

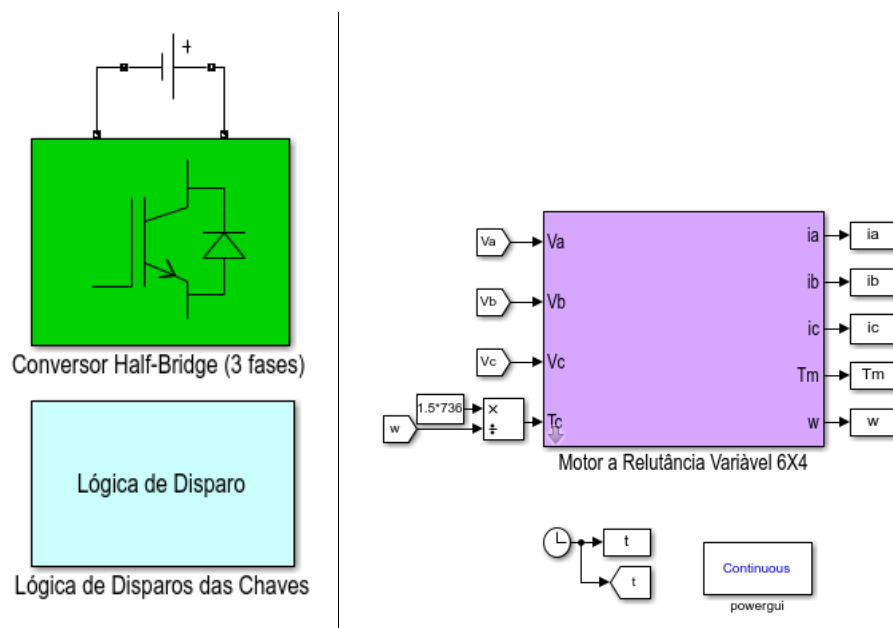


Figura 4.3 – Diagrama de blocos da simulação linear no SIMULINK

A Figura 4.4 apresenta com detalhes o interior do bloco “Conversor Half-Bridge (3 fases)”. O conversor é constituído de 6 (seis) chaves semicondutoras tipo IGBT’s, sendo 2 por fase. Há ainda a presença de diodos de roda livre.

Para emular as bobinas que constituem cada uma das fases de uma MRV, foi utilizada uma fonte de corrente controlada. O sinal de controle desse bloco é a corrente oriunda da saída da máquina. As chaves usadas na simulação foram IGBT's que assim como os diodos e a fonte de tensão, são blocos disponibilizados na biblioteca Simscape Power Systems. Uma fonte CC foi utilizada como sistema de excitação das bobinas de fase

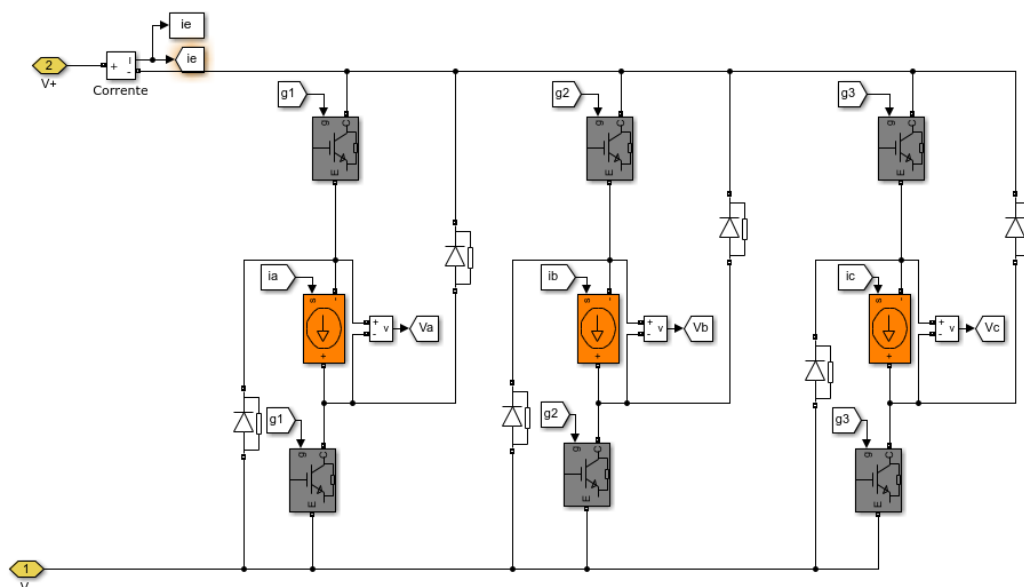


Figura 4.4 – Conversor *Half Bridge* utilizado

Neste bloco representativo, são utilizados medidores de tensão que permitem visualizar os valores de tensão nas fases (V_a , V_b e V_c), que são dados de entrada da matriz de estados do MRV. As grandezas g_1 , g_2 e g_3 são os sinais de disparo para as chaves do conversor. Estes sinais foram adequadamente gerados com lógica determinante pelo início e pelo término da excitação em cada uma das fases. O disparo das chaves é definido pela posição angular instantânea do rotor.

Foi desenvolvida uma rotina que gera os pulsos de gatilho para acionar as chaves, sendo necessário conhecer as características físicas da máquina acionada. A máquina utilizada como modelo possui 6 polos no estator, deslocados entre si de 60 graus mecânicos e 4 polos no rotor defasados de 90 graus conforme a Figura 4.5.

Para tanto, foi construída uma lógica tendo como entrada a posição angular do rotor e os parâmetros de saída são os pulsos nas chaves de cada fase. A lógica de controle e geração dos pulsos de disparo do conversor HB é mostrada nas figuras 4.6 (a) e 4.6 (b). Para o desenvolvimento da lógica de chaveamento é necessário conhecer a posição

angular do rotor, que é a entrada do bloco da Figura 4.5 (a). Após elaborada a lógica, a saída deste bloco fornece os pulsos de disparo para as chaves semicondutoras.

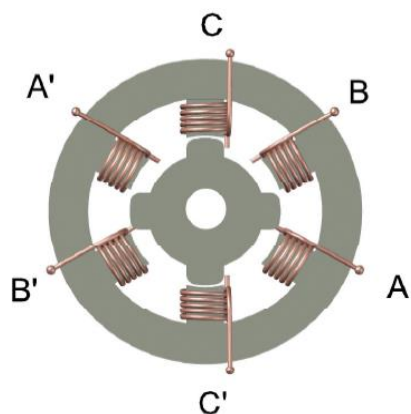
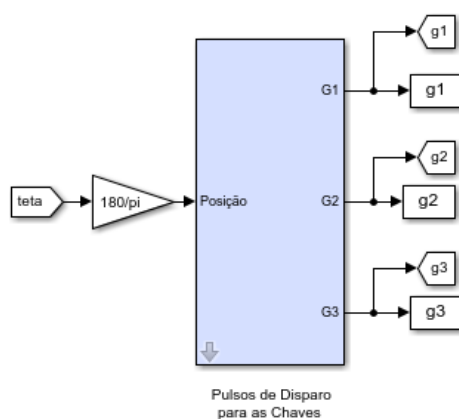
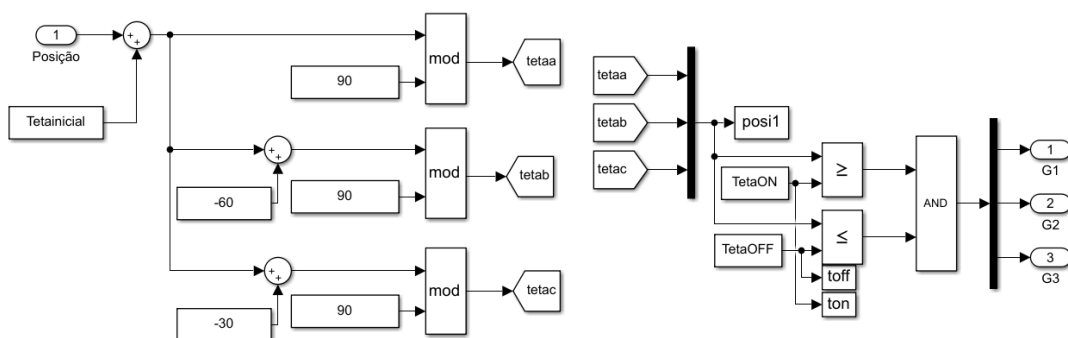


Figura 4.5 – MRV 6X4 com três fases

No interior do bloco denominado “Pulso de Disparo para as Chaves” encontra-se o arranjo demonstrado na Figura 4.6 (b), responsável pela lógica de controle e geração dos pulsos de disparo das seis chaves que compõe o conversor *HB*.



(a)



(b)

Figura 4.6 – (a) Diagrama de bloco do sistema gerador de pulso de disparo das chaves, (b) Interior do bloco lógico para a geração dos pulsos de disparo por fases

O subsistema “Motor a Relutância Variável 6X4” faz a solução das equações diferenciais apresentadas de 3.1 a 3.17. As Figuras 4.7 apresenta o cálculo da corrente de fase do motor, considerando as equações desenvolvidas no Capítulo 3.

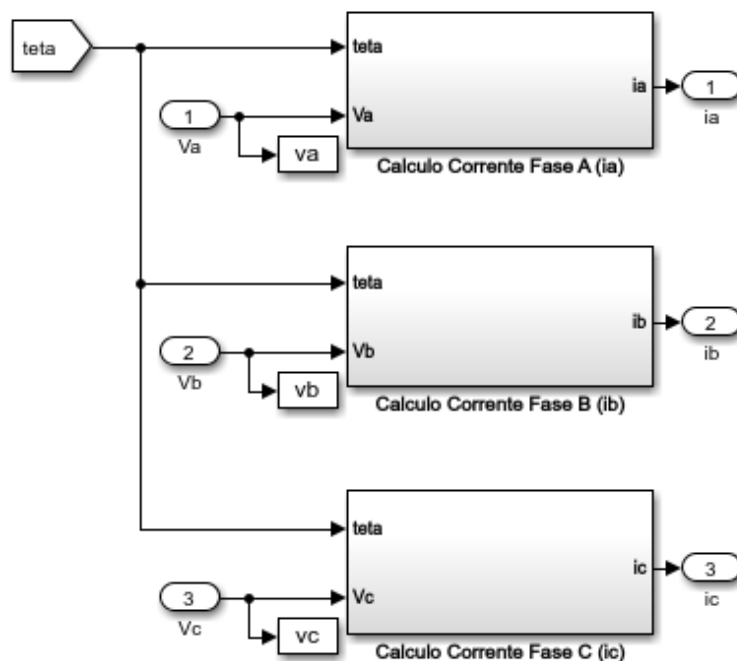


Figura 4.7 – Cálculo da corrente das fases da MRV

Dentro das máscaras apresentadas na Figura 4.8, está a Figura 4.9, que recebe a posição do rotor e a tensão da fase, entregando a indutância.

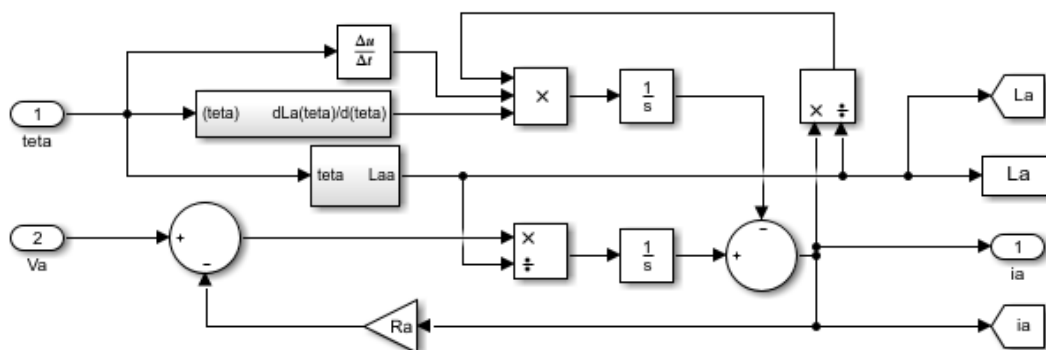
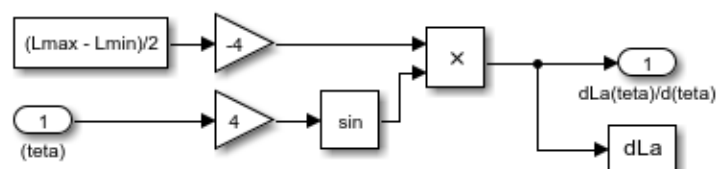
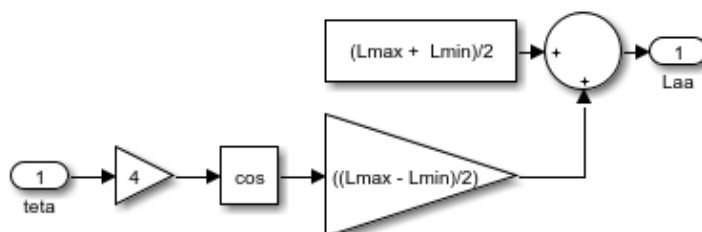


Figura 4.8 – Cálculo da indutância e corrente de fase

A Figuras 4.9 (a) apresenta o cálculo da derivada da indutância de acordo com a equação 3.11 e a Figura 4.9 (b) exibe a indutância pré-definida, baseado nas indutâncias máximas e mínimas.



(a)



(b)

Figura 4.9 – (a) Cálculo da derivada da indutância, (b) Indutância baseada nos máximos e mínimos

A Figura 4.10 apresenta o cálculo do torque e posição do rotor, baseado no modelo matemático apresentado no Capítulo 3. Como mostrado abaixo, a velocidade mecânica foi fixada em 2.000 rpm durante toda a simulação.

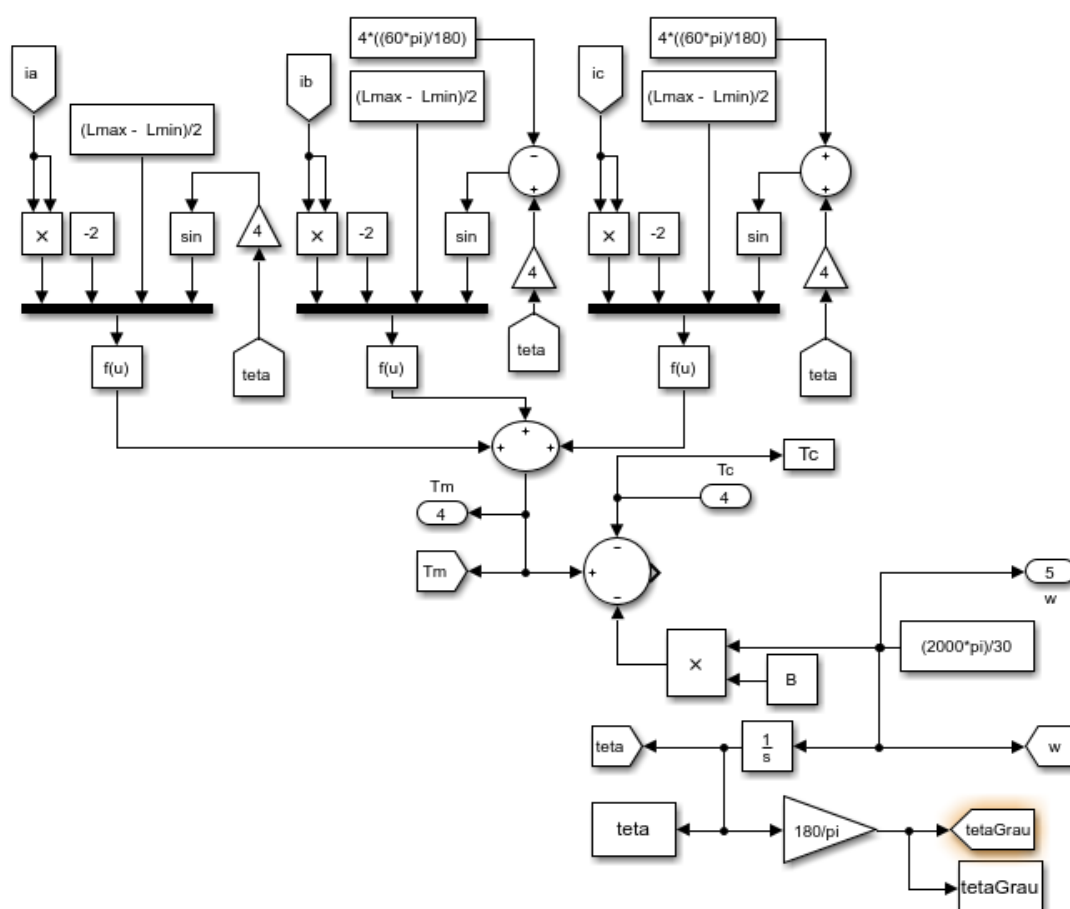


Figura 4.10 – Cálculo do torque e posição do motor

O cálculo do rendimento do motor é exposto na Figura 4.11. Calculado a partir da potência de entrada com a potência de saída.

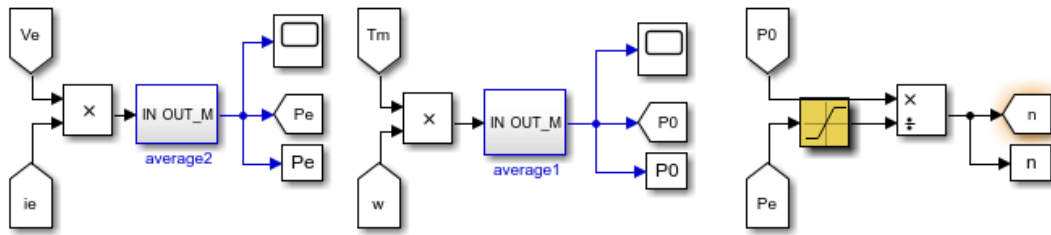


Figura 4.11 – Cálculo do rendimento do motor

Os cálculos de fluxos das fases apresentado na Figura 4.12.

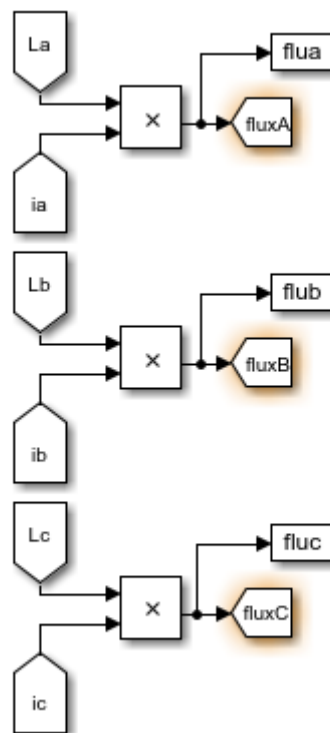


Figura 4.12 – Cálculo do fluxo do rotor

Os fluxos concatenados obtidos são apresentados na Figuras 4.13 (a) e (b). A Figura 4.13 (a) apresenta o perfil triangular nas fases A, B e C. Já a Figura 4.13 (b) apresenta o laço de fluxo em relação à corrente da fase A.

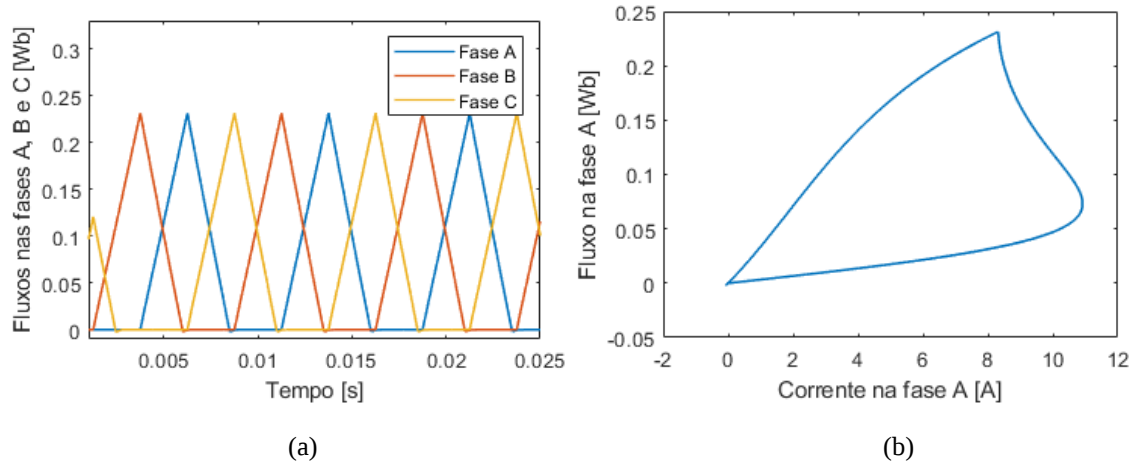
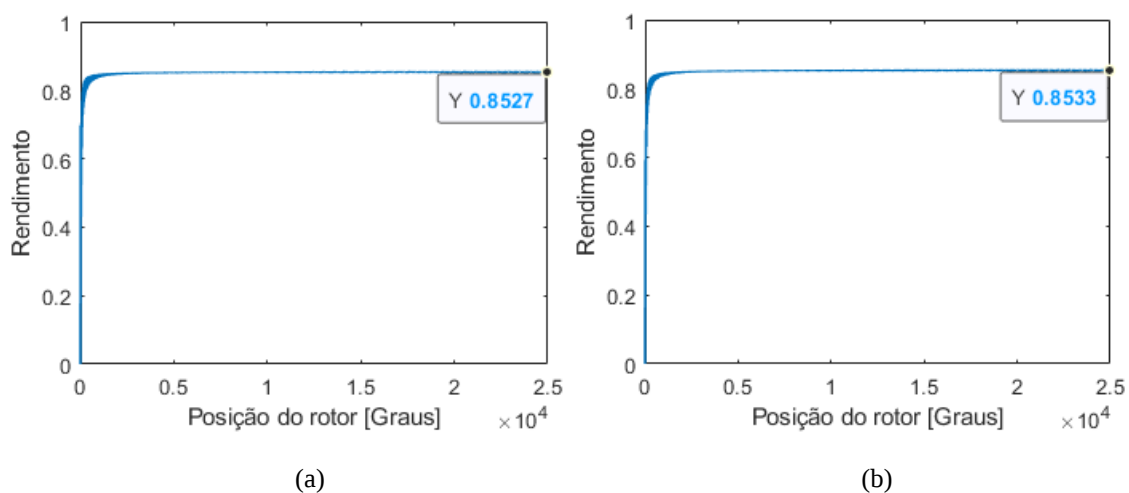
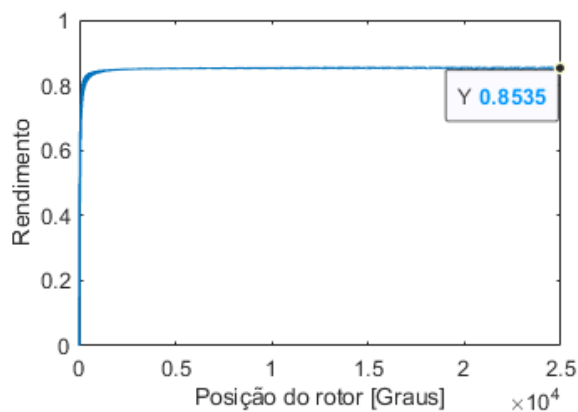


Figura 4.13 – (a) Fluxo nas fases em relação ao tempo, (b) Fluxo na fase A em relação A corrente

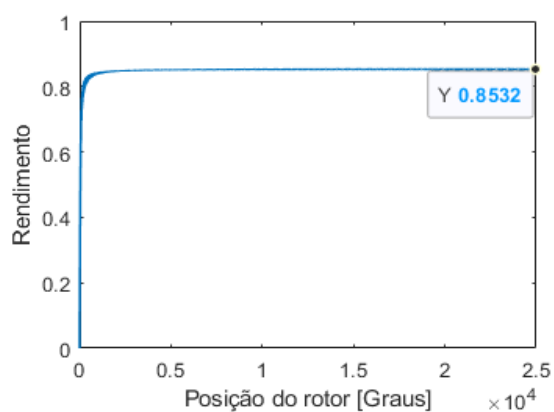
Na tentativa de encontrar o melhor rendimento do motor a partir do ângulo de desmagnetização, foram realizadas simulações com variados ângulos θ_{off} . Considerando 30° como período de referência, foram feitas simulações a partir do decréscimo deste ângulo. Os valores simulados foram de 24° a 30° de acionamento, como mostradas na Figura 4.14.

Com base nos resultados obtidos das simulações com diversos ângulos de desmagnetização, percebeu-se que o melhor rendimento alcançado foi considerando o intervalo de acionamento de 26° . Portanto, os valores utilizados para as simulações foram de $\theta_{on} = 45^\circ$ e $\theta_{off} = 71^\circ$.

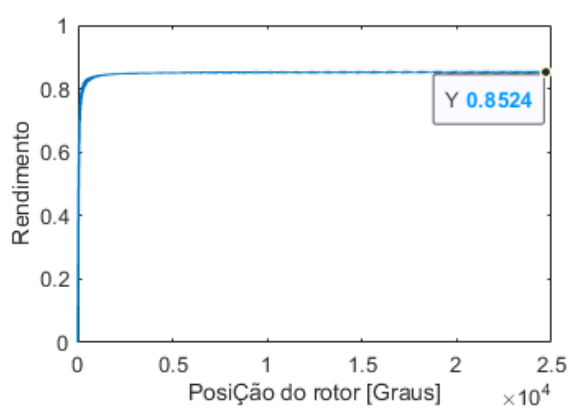




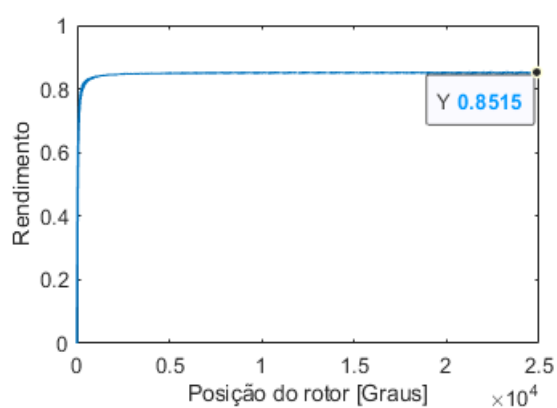
(c)



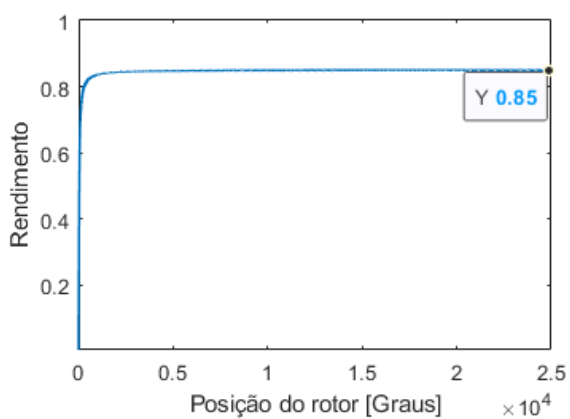
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 4.14 – (a) Rendimento para 24° de acionamento, (b) Rendimento para 25° de acionamento, (c) Rendimento para 26° de acionamento, (d) Rendimento para 27° de acionamento, (e) Rendimento para 28° de acionamento, (f) Rendimento para 29° de acionamento (g) Rendimento para 30° de acionamento

Para as simulações de validação do modelo, a tensão do barramento CC foi mantida a 100 V e a velocidade constante de 2.000 rpm. Cada fase da MRV fica ativada de 45° (totalmente desalinhado) até 71°.

4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

As ondas “dente de serra” mostradas na Figura 4.15 representam as posições do rotor para as fases A, B e C apropriadamente defasadas de 60 graus entre si. Observa-se que a cada 90 graus, a posição do rotor é reinicializada e a saída final são as posições nomeadas de tetaa, tetab e tetac. Posteriormente, estas posições são comparadas com os ângulos previamente estipulados θ_{on} e θ_{off} .

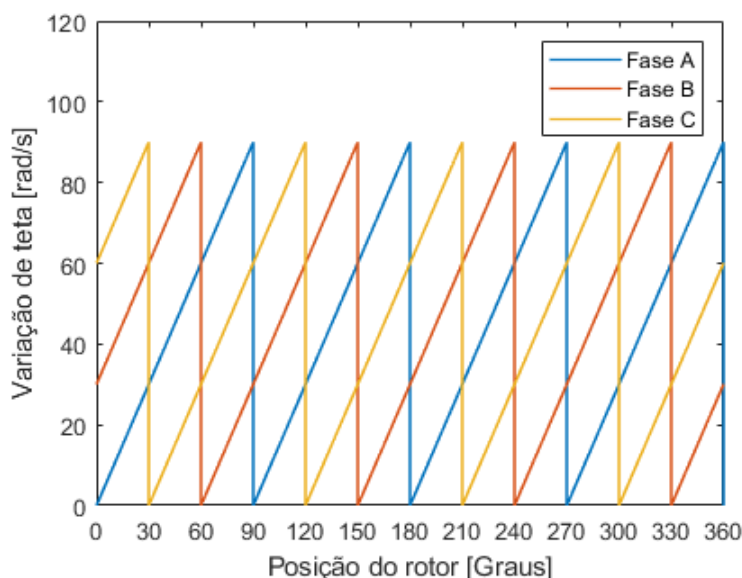


Figura 4.15 – Variação de θ em rad/s

A Figura 4.16 mostra a indutância para a fase A em amarelo e o pulso de gatilho em azul para o respectivo segmento do conversor. Para operação da máquina a relutância variável como motor, as chaves do conversor devem ser acionadas na região de crescimento da indutância.

A situação em que o pulso de gatilho é aplicado na região de crescimento da indutância durante 26° é apresentado na Figura 4.16. Vale ressaltar que a estratégia computacional implementada possibilita a variação dos ângulos de ligamento de desligamento dos IGBT's.

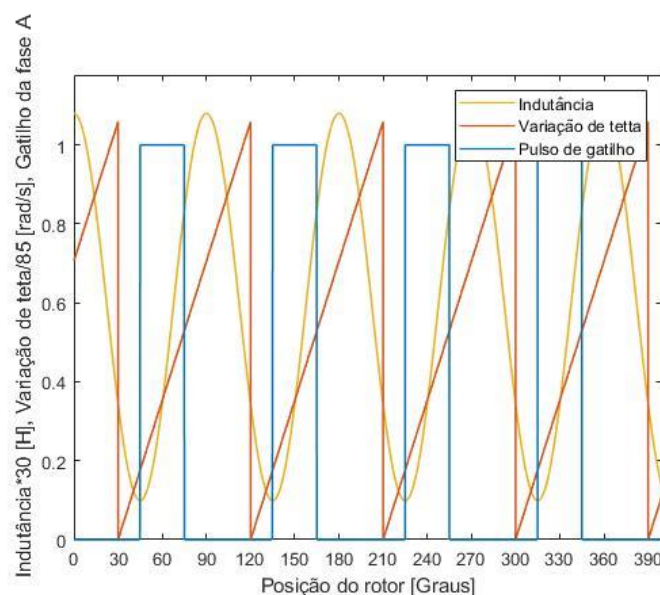


Figura 4.16 – Variação da indutância, variação de θ e gatilho em uma fase

A Figura 4.17 ilustra as curvas de corrente, tensão e indutância em uma das fases. É perceptível que a corrente cresce rapidamente no momento de aplicação de tensão, pois nesse momento $dL/d\theta$ é positivo. A corrente atinge o valor de pico e começa a decrescer devido à mudança da taxa de variação da indutância em relação à posição do rotor. Antes da indutância atingir o valor máximo, uma tensão negativa é aplicada à fase, forçando o decrescimento da corrente, até que atinja o valor zero.

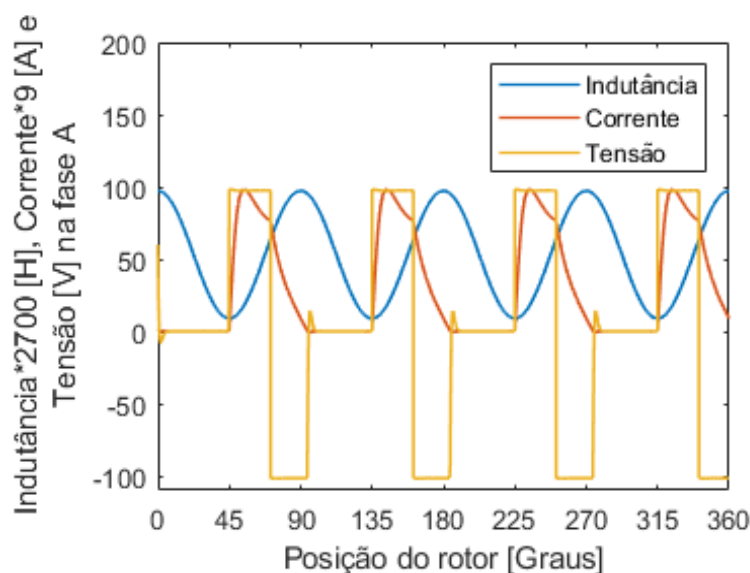


Figura 4.17 – Indutância, corrente e tensão na Fase A

A Figura 4.18 detalha a amplitude da corrente nas fases A, B e C para toda a simulação. Ainda é possível visualizar que existe uma intercessão entre os sinais de

corrente das fases. Esta intercessão acontece entre os períodos de desmagnetização de uma fase e magnetização da fase seguinte.

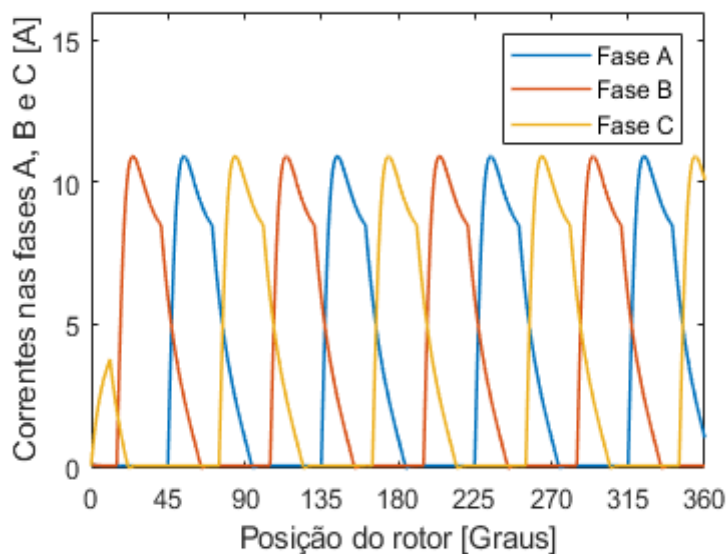


Figura 4.18 – Sinais de corrente de fase do MRV

A curva de conjugado mecânico produzido pela máquina operando como motor é apresentado na Figura 4.19. Pode-se observar sua oscilação devido à característica construtiva da máquina, com polos salientes e à alimentação por chaveamento. A amplitude da ondulação encontrada nesse caso varia entre 0,75 à 3 N.m.

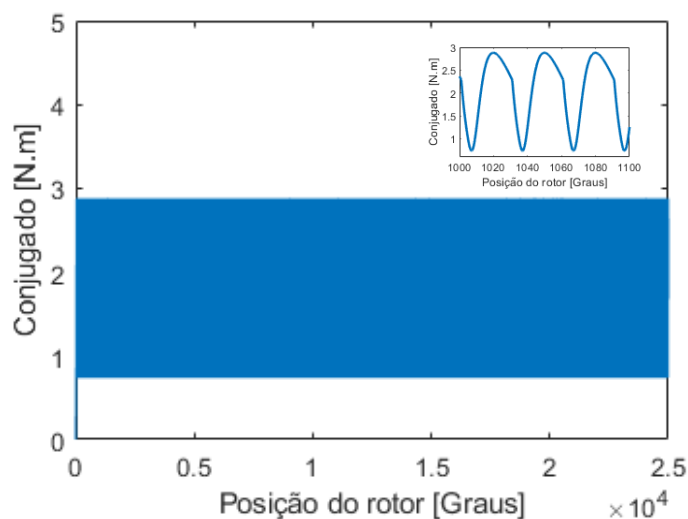


Figura 4.19 – Conjugado total do motor

A Figura 4.20 mostra a indutância, a corrente e os pulsos de gatilho. Esta figura mostra a dinâmica de funcionamento de uma fase da máquina, onde durante o crescimento

da indutância, o pulso de gatilho é acionado, fazendo com que a corrente atinja seu pico rapidamente.

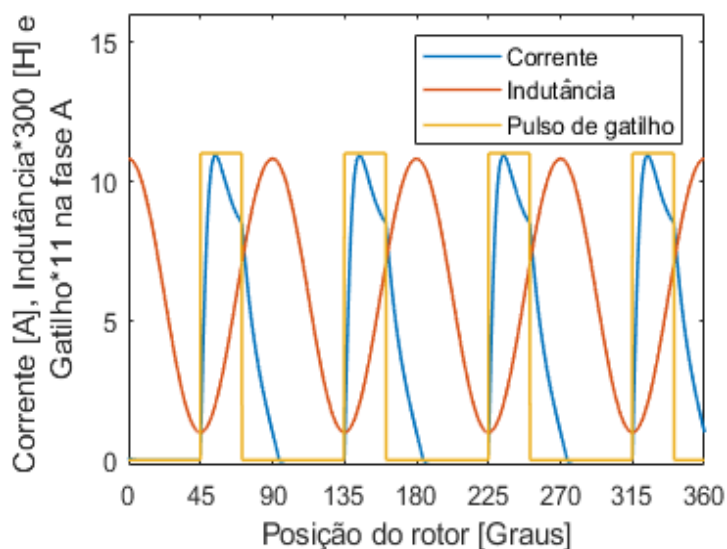


Figura 4.20 – Indutância, Pulso de gatilho e Corrente na Fase A

O rendimento apresentado na Figura 4.21 indica a rápida subida do rendimento e se mantém em 85,35% com a variação da posição rotor.

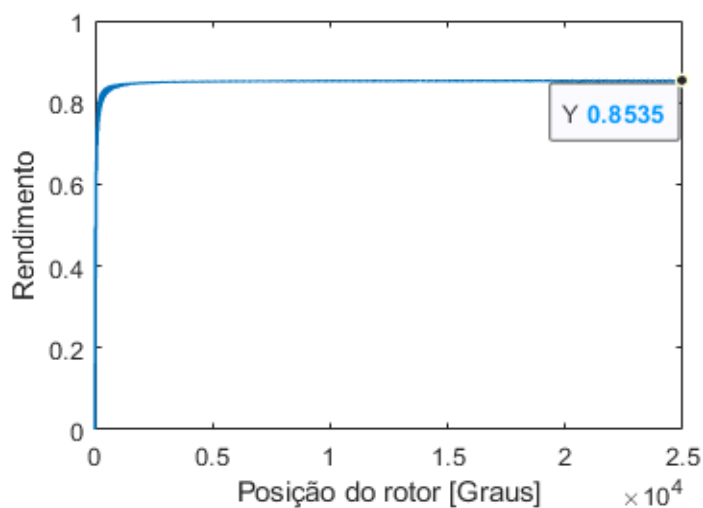


Figura 4.21 – Rendimento do motor

A fim de verificar o comportamento da MRV em função da excitação, dos ângulos de magnetização e da carga, foram realizadas algumas simulações: tensão de excitação de 50 V e 100 V e variando ângulo de magnetização $\theta_{off} = 73^\circ$ e $\theta_{off} = 69^\circ$ mantendo a carga nominal. Além disso, foi variado a carga entre 1.5 CV e 0.5 CV.

4.2.1 Variando o ângulo de acionamento

- Acionamento de 24°; 100V; Carga de 1.5 CV

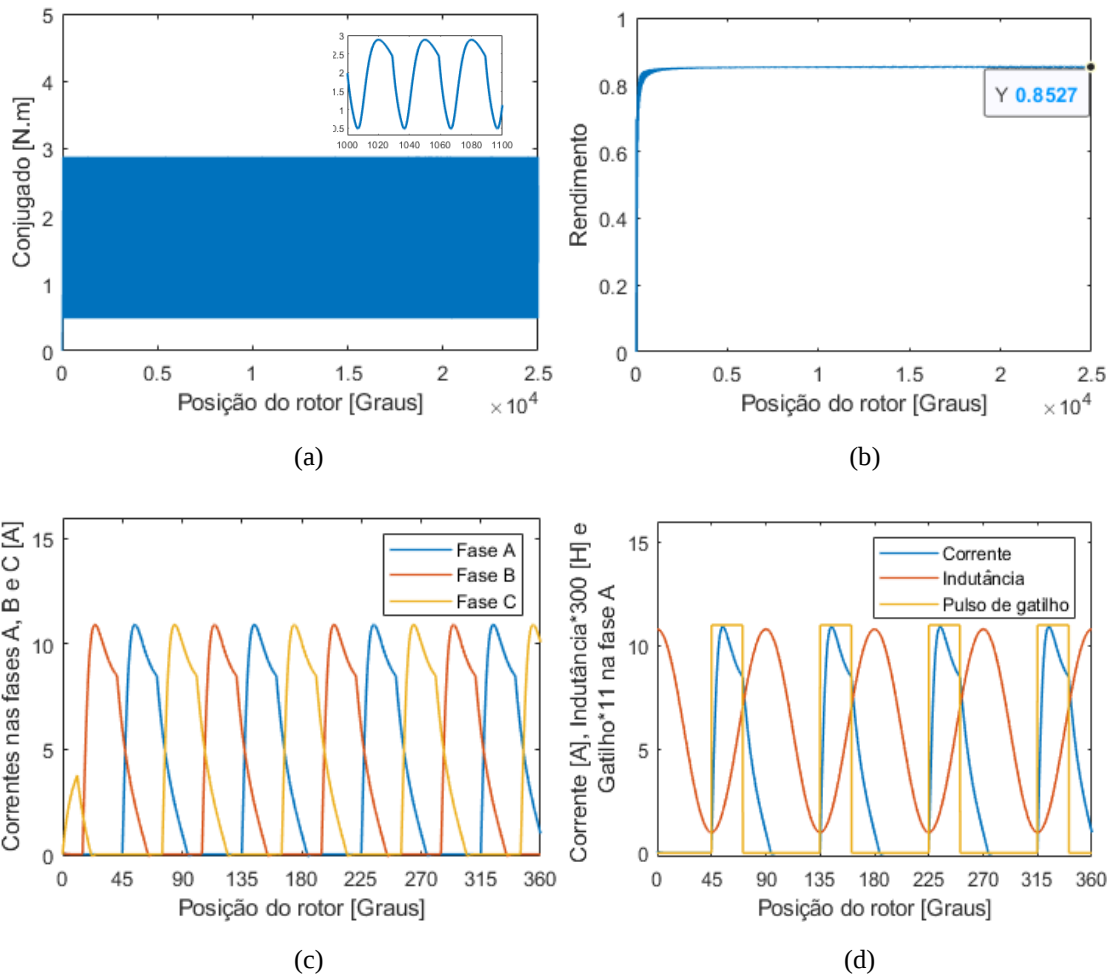
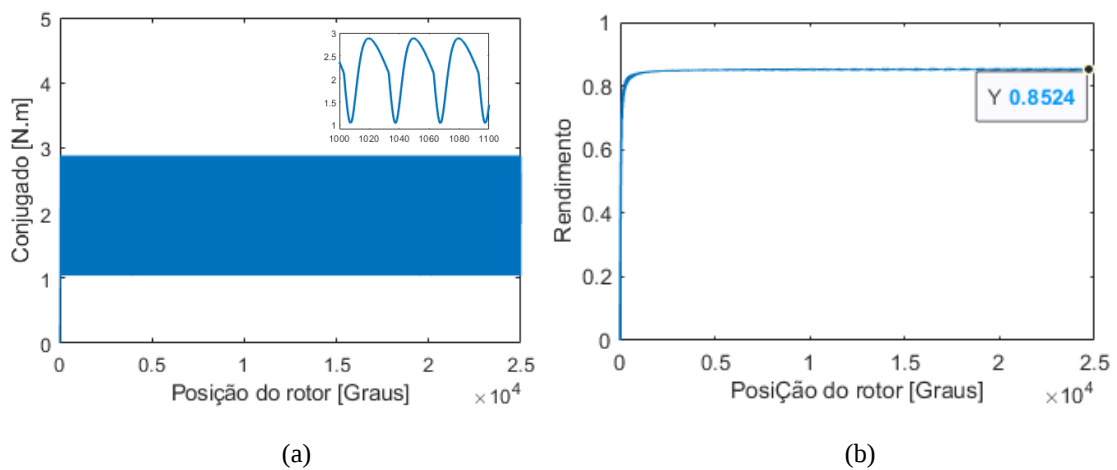


Figura 4.22 – (a) Conjugado, (b) Rendimento, (c) Correntes, (d) Corrente, Indutância e Gatilho na fase A

- Acionamento de 28°; 100V; Carga de 1.5 CV



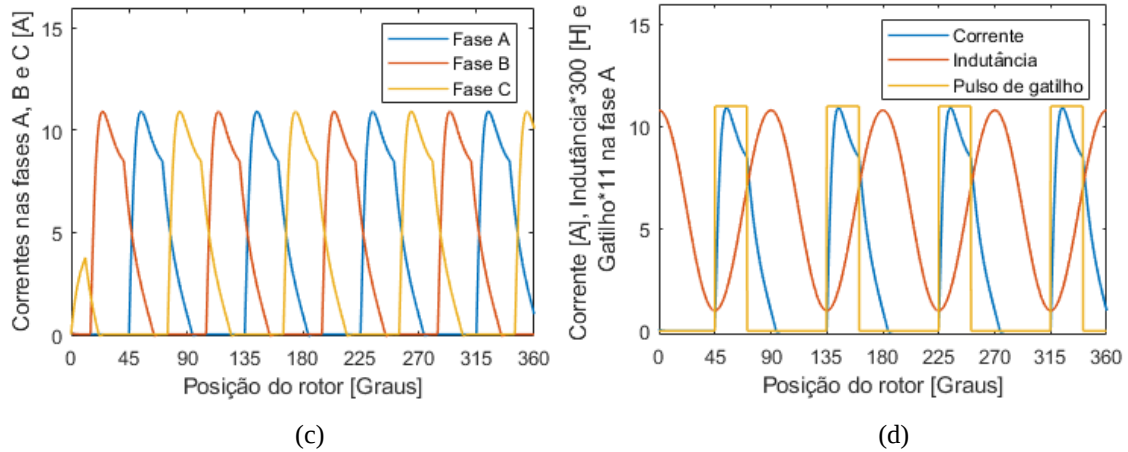


Figura 4.23 – (a) Conjugado, (b) Rendimento, (c) Correntes, (d) Corrente, Indutância e Gatilho na fase A

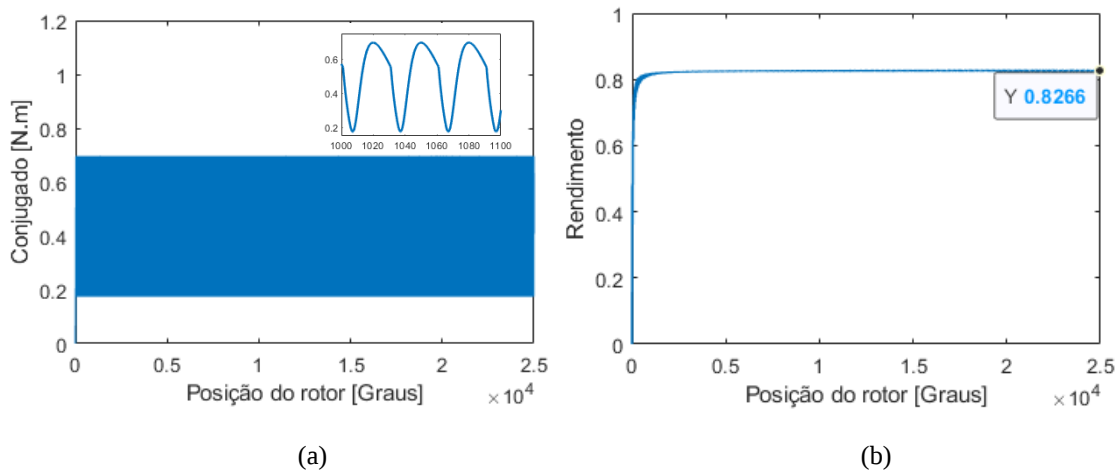
Considerando os dois valores de θ_{off} , podemos observar a influência direta no funcionamento do motor. Apesar das duas propostas de acionamento estarem na zona de crescimento da indutância, e com apenas 4° de diferença de uma simulação para a outra, o rendimento e o conjugado são alterados por esta modificação.

Em ambos os casos, os valores de pico de corrente não são atingidos rapidamente logo após do acionamento θ_{on} , como o esperado.

O conjugado possui uma área de oscilação maior quando a magnetização acontece entre 45° e 69° . O rendimento também apresenta melhores resultados neste intervalo de magnetização.

4.2.2 Variando a tensão de excitação

- Acionamento de 26° ; 50V; Carga de 1.5 CV



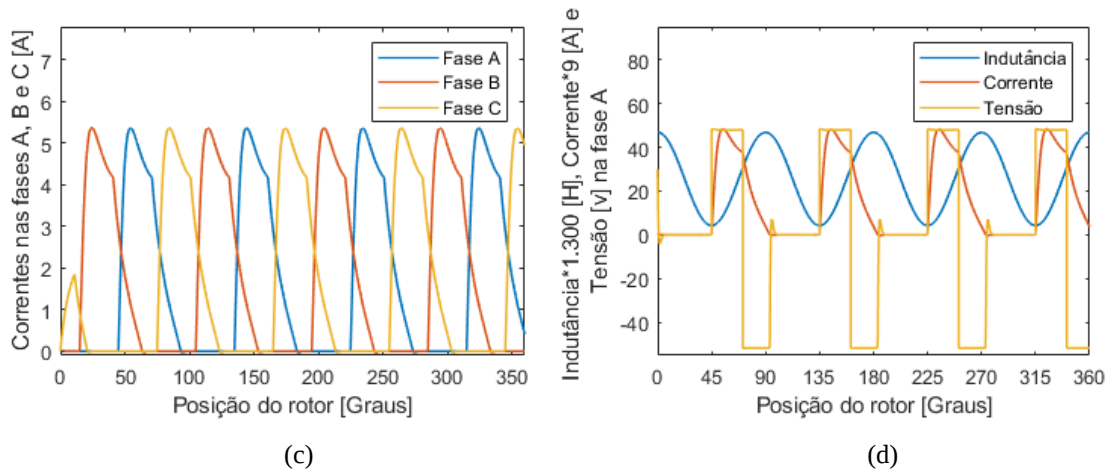


Figura 4.24 – (a) Conjugado, (b) Rendimento, (c) Correntes, (d) Indutância, Corrente e Tensão na fase A

- Acionamento de 26°; 200V; Carga de 1.5 CV

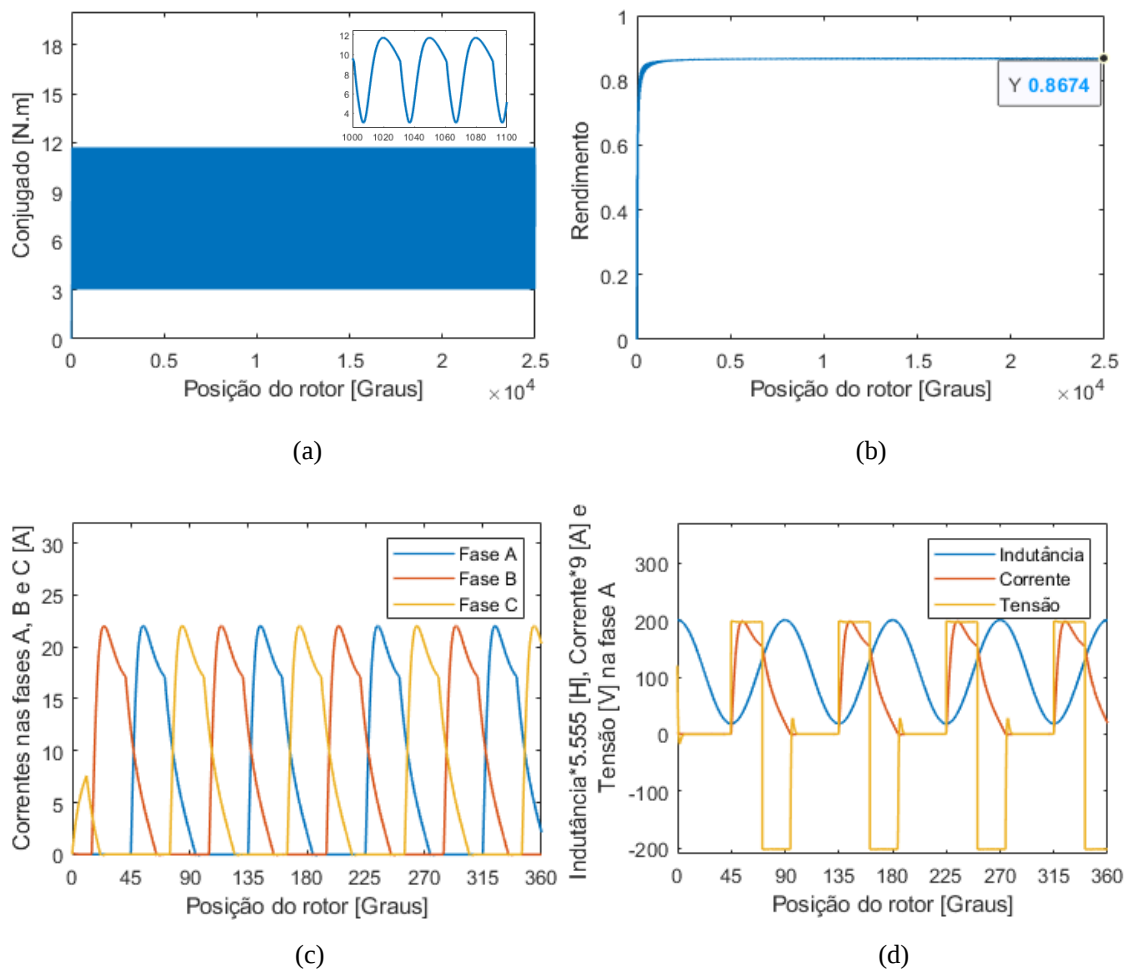


Figura 4.25 – (a) Conjugado, (b) Rendimento, (c) Corrente, (d) Indutância, Corrente e Tensão na fase A

Considerando as duas simulações variando a tensão de excitação do motor, observamos o aumento do pico de corrente a partir do aumento da tensão. Nas Figuras 4.24 (d) e 4.25 (d) ilustra as formas de tensão para a mesma fase, onde evidencia-se que durante a energização de uma fase a tensão é positiva e durante a etapa de roda livre, tem-se o ciclo negativo para o decrescimento da corrente.

4.2.3 Variando a carga

- Acionamento de 26°; 100V; Carga de 2 CV

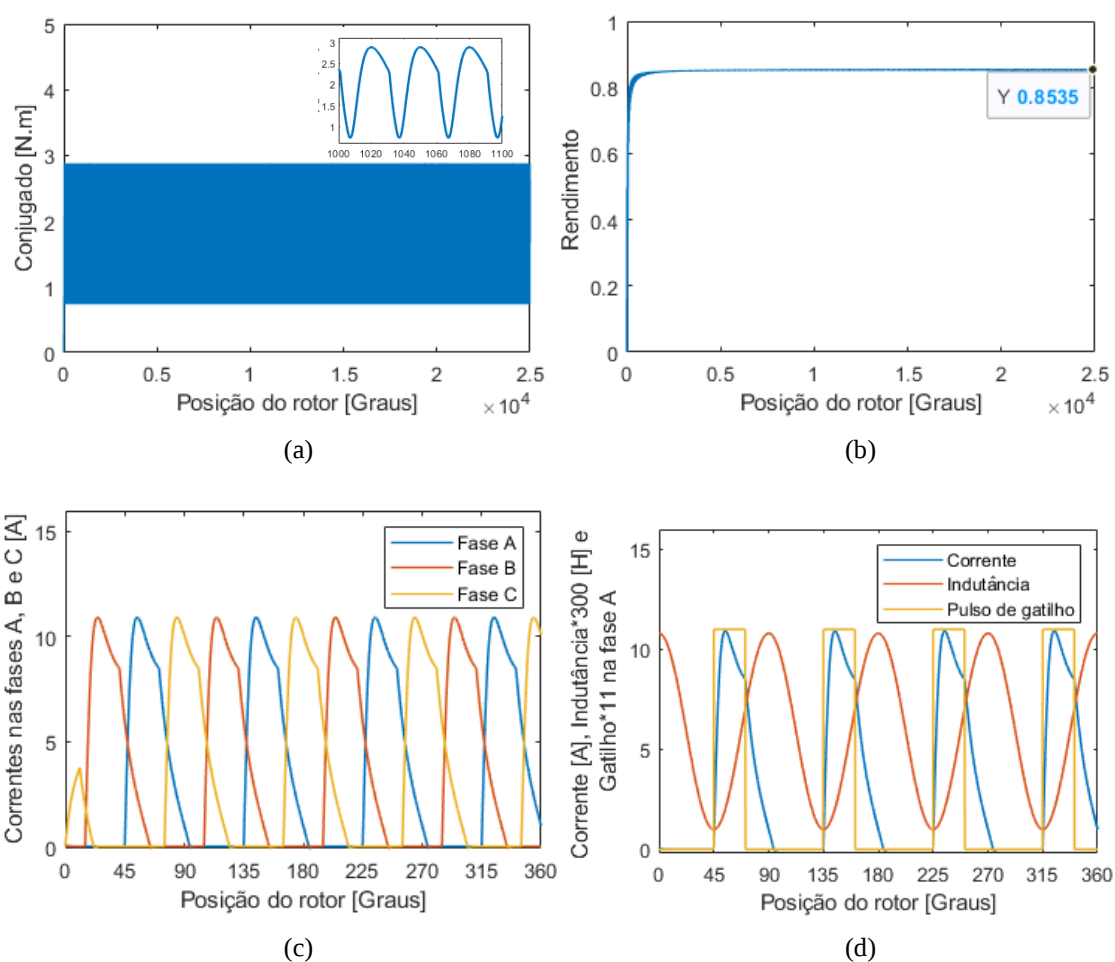


Figura 4.26 – (a) Conjugado na Fase A, (b) Rendimento, (c) Corrente, (d) Corrente, Indutância e Gatilho na fase A

- Acionamento de 26°; 100V; Carga de 0.5 CV

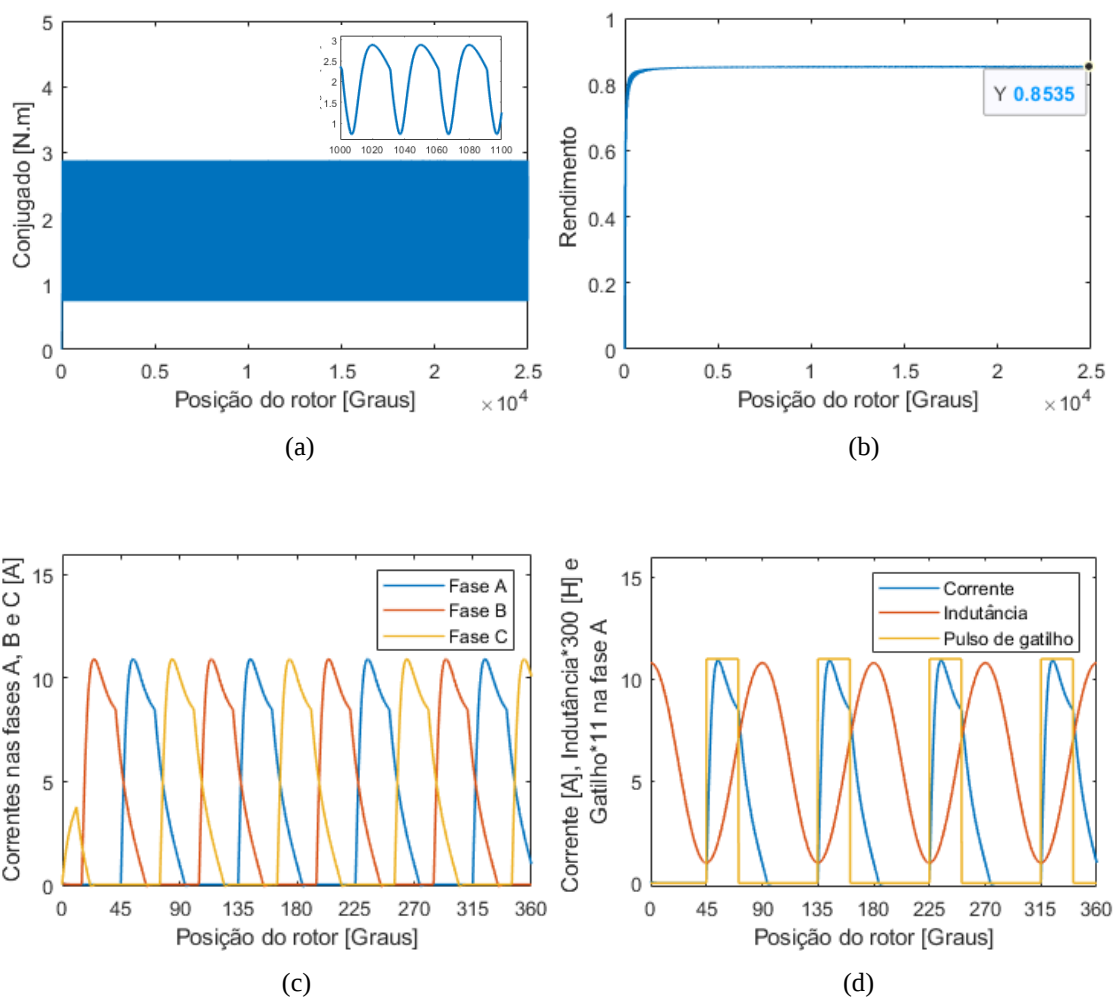


Figura 4.27 – (a) Conjugado na Fase A, (b) Rendimento, (c) Corrente, (d) Corrente, Indutância e Gatilho na fase A

Nas imagens 9 (a) das Figuras 4.26 e 4.27 pode-se visualizar a oscilações da corrente previamente mencionadas, variando seus valores de pico entre 4 e 8 A.

CAPÍTULO 5

ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE CORRENTE

O diagrama de blocos da Figura 5.1 mostra o esquema da estratégia utilizada para o controle de corrente nas fases da MRV. O método aplicado utiliza das informações da posição rotórica disponibilizadas para a lógica de disparo, posteriormente os pulsos de gatilho serão comparados com a corrente de referência e enviados para o conversor *Half-Bridge*.

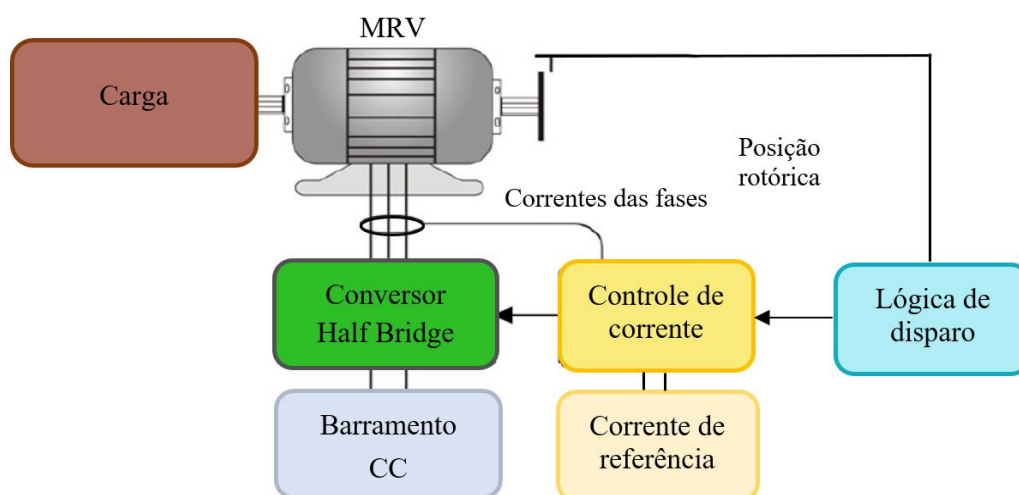


Figura 5.1 – Diagrama de blocos motor com controle de corrente

A operação em baixa velocidade nas MRVs requer o controle da corrente para limitá-la nos valores desejados. Comumente são utilizados os métodos de controle de controle por histerese e por PWM. O controle via histerese possui algumas vantagens como simplicidade e resposta rápida [5].

A técnica de acionamento via regulador de histerese de corrente altera a magnetização da máquina a partir de controle de corrente e é relativamente simples de implementar, apesar de necessitar de um *feedback* de corrente.

Neste controle de corrente, uma banda de histerese é estabelecida e comparando o erro da corrente aos limites da banda, o que define o estado dos interruptores do

conversor. O limite superior ao de referência é maior que o i_{ref} e o inferior é menor que o i_{ref} . O controlador compara continuamente a corrente entre estes dois limites.

Se a corrente medida está abaixo do valor máximo definido na banda, as chaves do conversor são fechadas para aplicar tensão, o que aumenta a corrente. Se a corrente está acima do erro máximo, as chaves deixam de entregar tensão. Como resultado, esta estratégia restringe a corrente no espaço entre as bandas de erro, denominada banda de histerese. A estrutura do sistema é apresentada na figura 5.2.

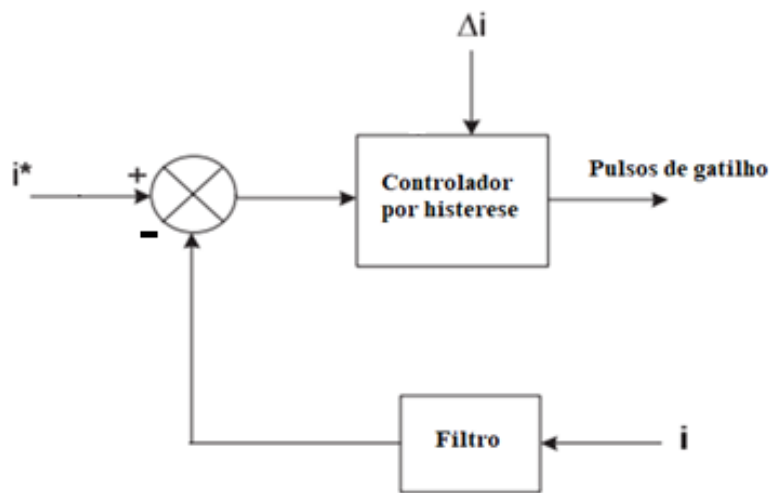


Figura 5.2 – Estrutura básica do controle por histerese

A tensão aplicada é calculada através da comparação da corrente de referência com a corrente medida nas fases do motor, segundo as seguintes equações:

$$\text{Se } i \leq (I_{ref} + \Delta i), \text{ então } V = V_{dc}$$

$$\text{Se } i \geq (I_{ref} - \Delta i), \text{ então } V = -V_{dc}$$

As equações acima levam em consideração que os conversores são ideais, assim como as variações de tensão e o tempo de chaveamento é desconsiderado. A aplicação de tensão igual à zero ou a $-V_{dc}$ depende da configuração do conversor e da estratégia de chaveamento para correntes negativas. O controle de corrente utilizado aplica tensão igual a $-V_{dc}$ no momento de desmagnetização.

Para exemplificar o processo de motorização com regulação por histerese, a Figura 5.3 apresenta a forma senoidal da indutância, tensão da fase e a corrente de fase. O comportamento da corrente durante a histerese é mostrado no canto superior da figura,

onde verificamos que ela oscila entre $+\Delta i$ e $-\Delta i$. Verifica-se também que, desprezando as perdas, as fases da máquina estão sujeitas a uma variação de tensão igual ao dobro da tensão do barramento, assumindo seu valor e hora seu oposto.

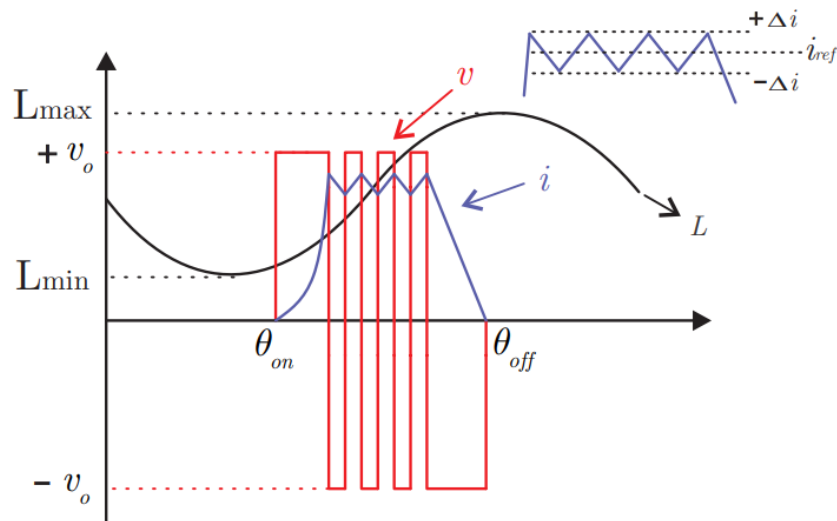


Figura 5.3 – Modo de operação por histerese [35]

A construção do controle de corrente foi desenvolvida complementando a simulação já realizada no Capítulo 4, como apresentado na Figura 5.4.

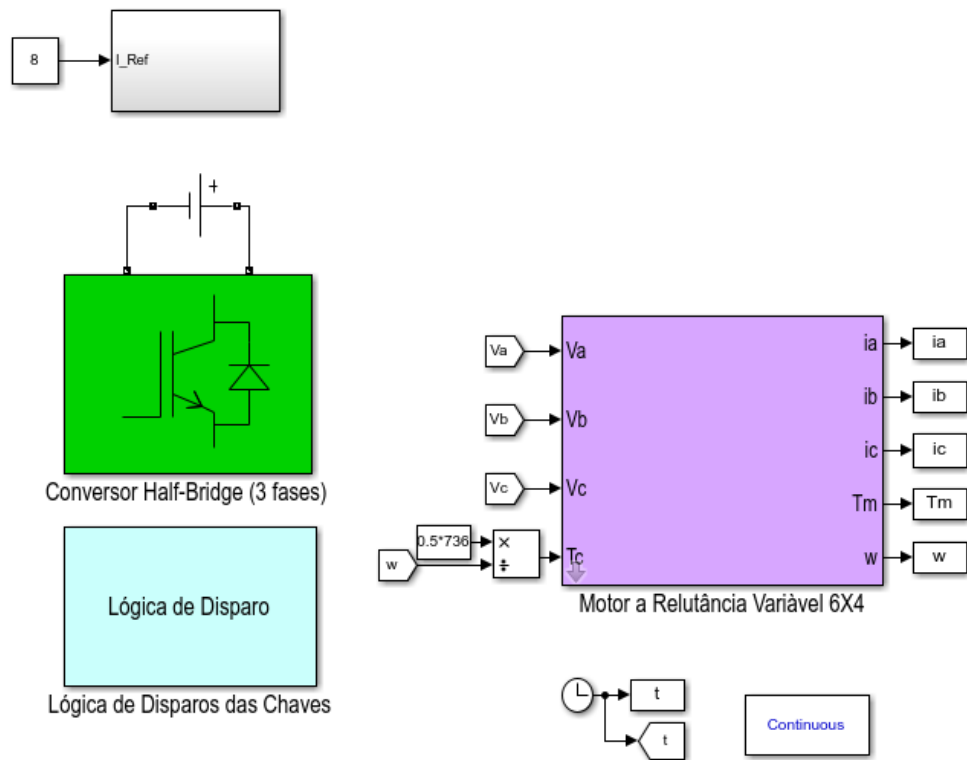


Figura 5.4 – Diagrama do controle por histerese no SIMULINK

Na Figura 5.5 é ilustrado o diagrama responsável por determinar o período em que a máquina será excitada. Logo, os pulsos de gatilho enviados pela lógica de disparo (g1, g2 e g3) são comparados com o acionamento fornecido pela histerese.

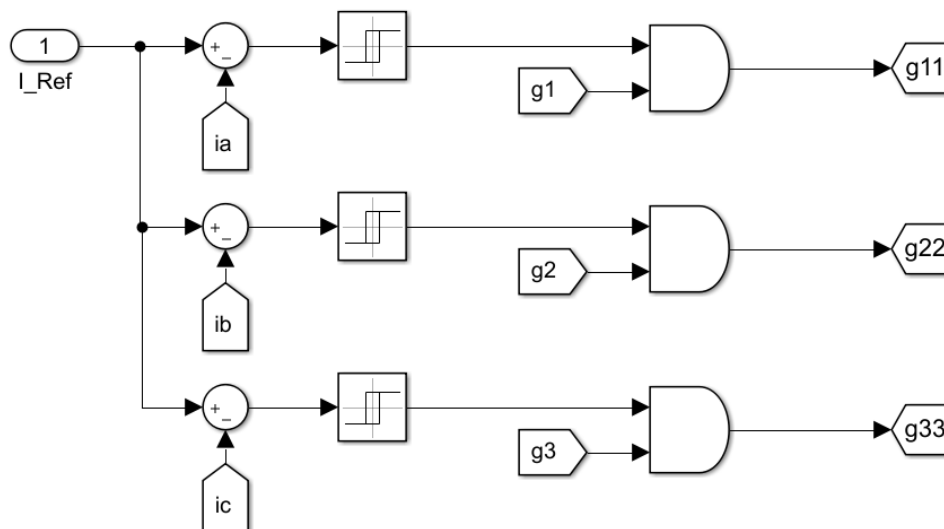


Figura 5.5 – Diagrama do controle por histerese, para uma fase

No início do período de excitação, quando a condição relativa à porta *and* é satisfeita, as chaves S1 e S2 (vide Figura 4.3) entram em condução e a corrente da fase começa a crescer. Quando o erro de corrente excede o limite superior da banda de histerese, os interruptores S1 e S2 são bloqueados simultaneamente e os diodos começam a conduzir, criando um caminho para a corrente de fase até a fonte. A corrente decresce até que atinge o limite inferior, momento em que as chaves entram em condução novamente. Esse ciclo se repete até que a posição do rotor ultrapasse o valor inicial de g1, término da etapa de excitação, a partir do qual os interruptores permanecerão bloqueados até que a próxima excitação ocorra.

Este controle possui como vantagem uma rápida resposta dinâmica e ser de simples implementação. Entretanto, o controlador de histerese possui a desvantagem de frequência de comutação variável. Além disso é necessário um custo adicional para conversores analógicos para digitais de alta velocidade, caso contrário a frequência de comutação é reduzida e a oscilação de corrente será alta [17].

Existem dois tipos de comutação que podem ser aplicadas ao controle de corrente: comutação suave (também conhecida como *soft chopping*) e comutação brusca (ou *hard chopping*). Os dois métodos se diferem em como eles desativam a fase.

Na comutação suave, uma das chaves sempre permanece ligada, mesmo depois que o período de condução termine, sendo denominada de chave de comutação devido à sua função de apenas conduzir durante o início e o fim do período de condução da fase [36].

Sendo assim, acionando apenas uma das chaves nos ciclos determinados, as perdas por chaveamento são menores quando comparadas ao método de comutação brusca [36]. Outra característica importante deste método de comutação é a aplicação de tensão nula à fase, deixando com que a corrente diminua naturalmente.

O método de comutação brusca, as chaves são acionadas de acordo com a energização de cada fase. Os modos de operação desde controle são o de magnetização e de desmagnetização. O modo de magnetização acontece quando a fase é excitada e ambas as chaves do braço são acionadas e o modo de desmagnetização ocorre quando as chaves são desenergizadas. Assim, a tensão da bobina varia de $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$, para a redução da corrente na bobina, aumentando a ondulação da corrente e produzindo mais ruído acústico e elétrico durante a operação [36].

Neste trabalho, é utilizado o controle *hard chopping*, como é ilustrado na Figura 5.6, onde tanto as chaves superiores e inferiores são controladas pelos pulsos de gatilho advindos da comparação feita no controle de histerese. A banda de histerese foi definida entre -0.1 e 0.1. Porém ela pode ser ajustada, dependendo da necessidade, em uma banda menor ou maior, considerando a variação de corrente desejada.

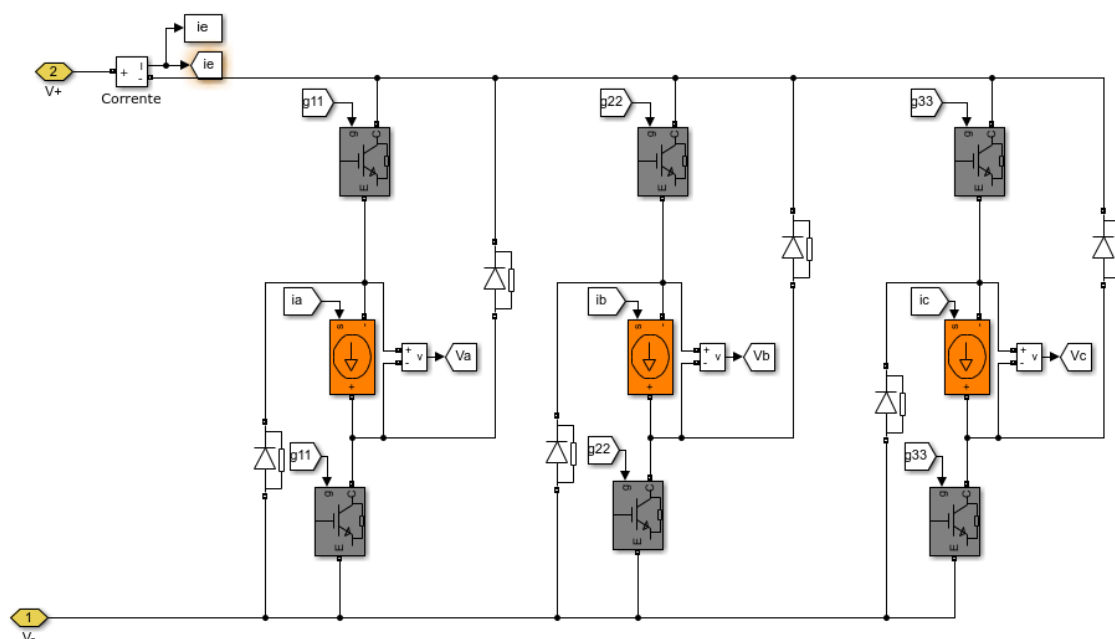


Figura 5.6 – Conversor *Half Bridge* após implementação do controle de corrente por histerese

A velocidade rotórica é capaz de seguir a referência de maneira satisfatória. O controlador por histerese é capaz de regular as correntes de fase, uma vez que permanecem internas à banda definida, como mostrado na Figura 5.7.

A ação do controle de corrente nas três fases pode ser observada na Figura 5.7 (a), mantendo a corrente máxima próximo a 6A. Na Figura 5.7 (b), é visto um zoom do chaveamento da fase A, evidenciando a fidelidade a banda de histerese definida de -0.1 a 0.1.

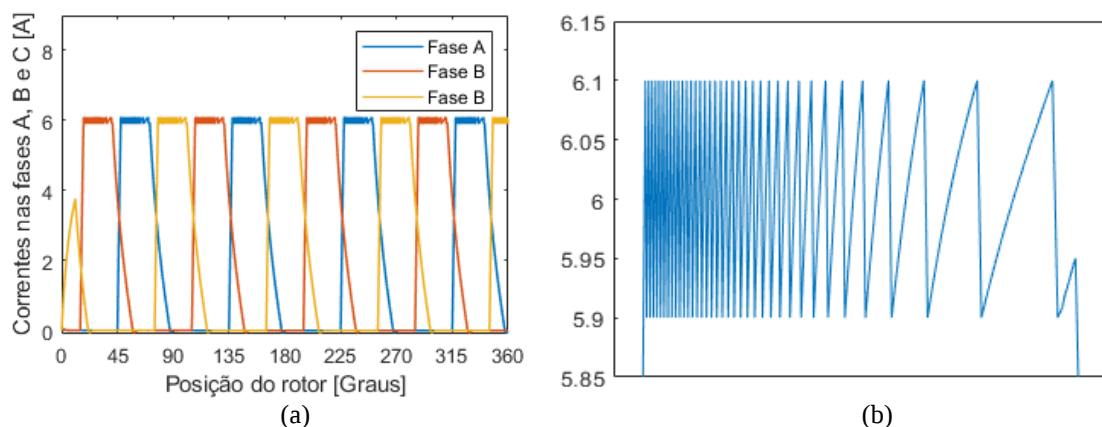


Figura 5.7 – Correntes nas fases

O torque eletromagnético da máquina, como esperado, apresentado na Figura 5.8 possui característica pulsada, aspecto indesejável na operação, mas intrínseca à máquina.

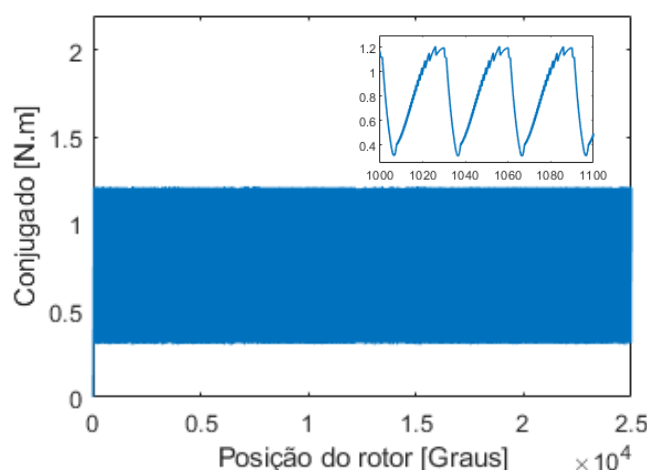


Figura 5.8 – Conjugado do motor

A Figura 5.9 ilustra como a corrente se comporta durante a aplicação do pulso de gatilho, aplicado durante o crescimento da indutância.

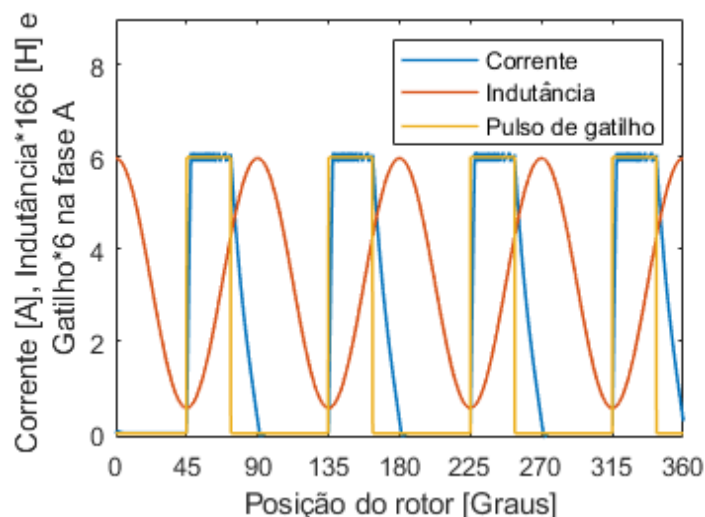


Figura 5.9 – Corrente, indutância e Pulso de gatilho

O rendimento do motor nas condições decididas como base é apresentado na Figura 5.10.

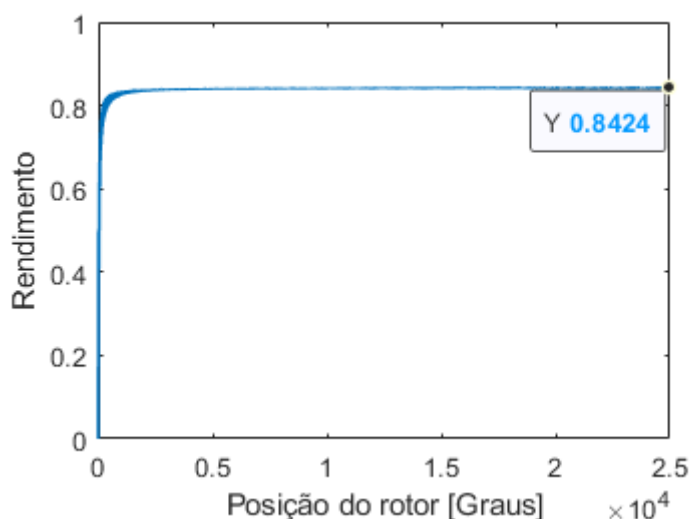


Figura 5.10 – Rendimento

5.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO MODELO LINEAR SENOIDAL COM CONTROLE DE CORRENTE

A fim de verificar o comportamento da MRV em função da excitação, dos ângulos de magnetização e da corrente de referência, foram realizadas algumas simulações: tensão de excitação de 150 V e 200 V e variando ângulo de magnetização $\theta_{off} = 73^\circ$ e $\theta_{off} = 69^\circ$ mantendo a carga nominal. Além disso, foi variado a corrente de referência nos valores de 4A e 8A.

5.2.1 Variando a corrente de referência

- Corrente de referência 4A; Acionamento de 26°; 100V; Carga de 1.5 CV

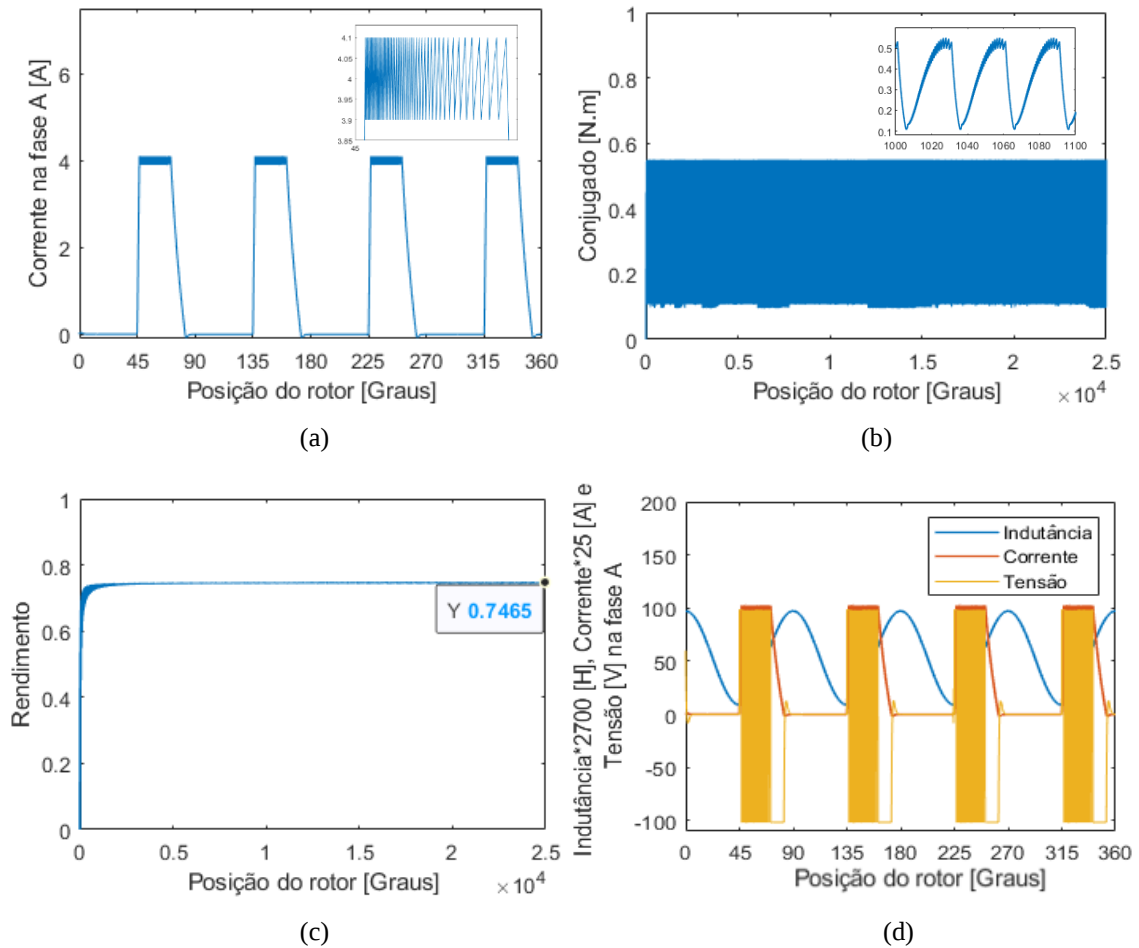
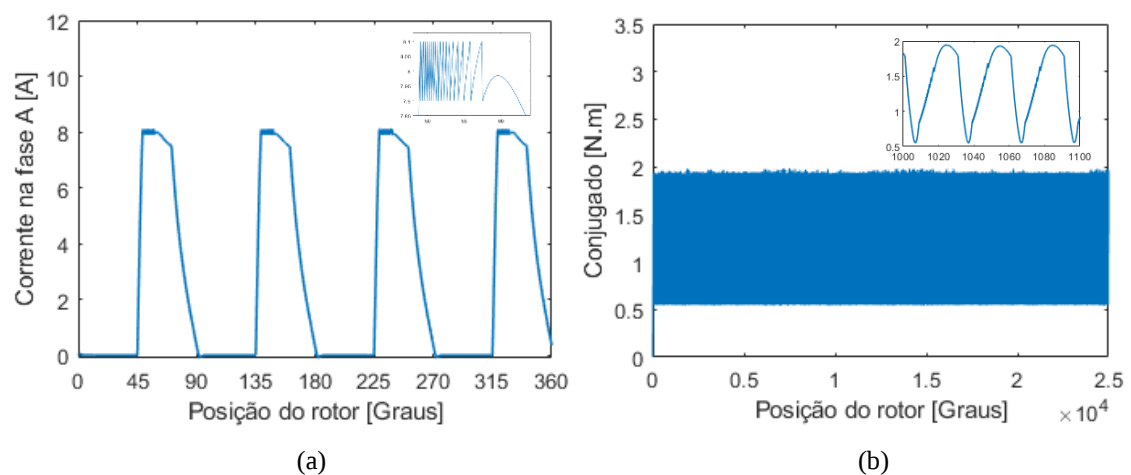


Figura 5.11 – (a) Corrente na fase A, (b) Conjugado, (c) Rendimento, (d) Indutância, Corrente e tensão na fase A

- Corrente de referência 8A; Acionamento de 26°; 100V; Carga de 1.5 cv.



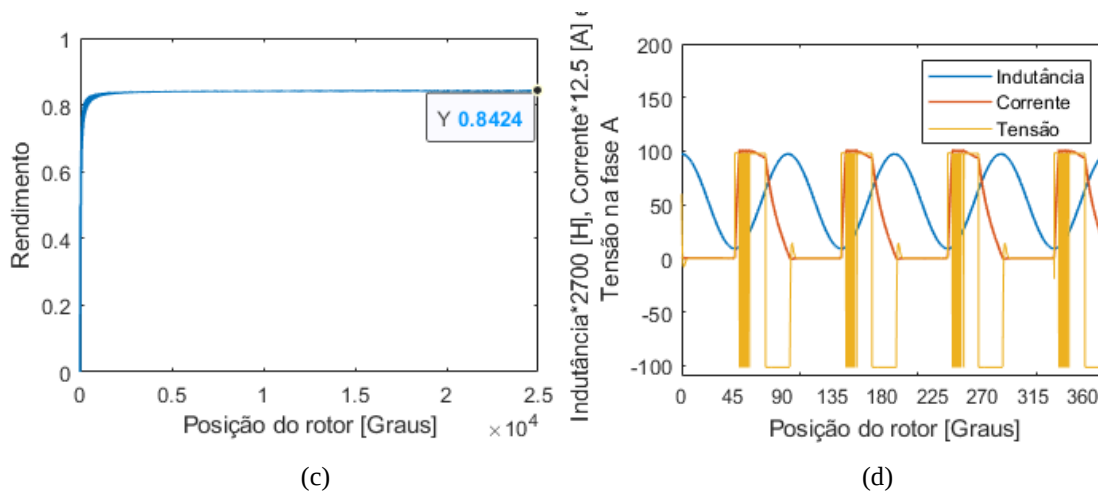


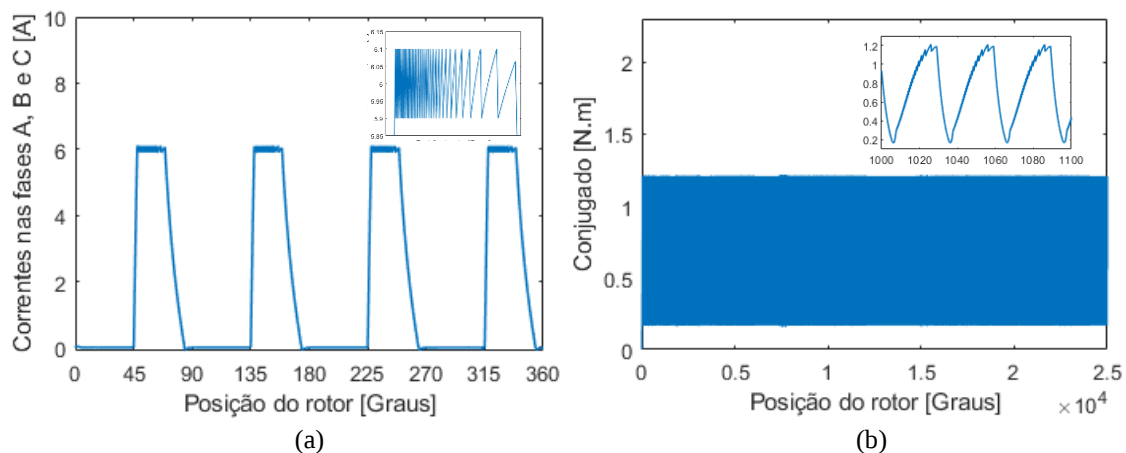
Figura 5.12 – (a) Corrente na fase A, (b) Conjugado, (c) Rendimento, (d) Indutância, Corrente e tensão na fase A

As curvas 5.11 (a) e (d) e 5.12 (a) e (d) comprovam a eficácia do controlador proposto. No primeiro caso, a corrente permanece por volta 8 A, variando somente dentro de sua banda de histerese, atingindo valores entre 7,9 e 8,1 A. O mesmo ocorre no segundo caso, com o controle de 4 A.

Os conjugados oscilantes reduzem rapidamente quando a corrente é deixada de ser aplicada, de acordo com o ângulo θ_{off} , como mostrados nas Figura 5.11 (b) e 5.12 (b). Ainda assim, a redução de oscilação não é uma tarefa fácil pois outros parâmetros como o valor da carga e da velocidade do motor, influenciam diretamente na magnitude de variação. Já o rendimento diminui drasticamente com a diminuição da corrente de referência de 8 para 4 A.

5.2.2 Variando intervalo de acionamento

- Corrente de referência 6A; Acionamento de 24°; 100V; Carga de 1.5 CV



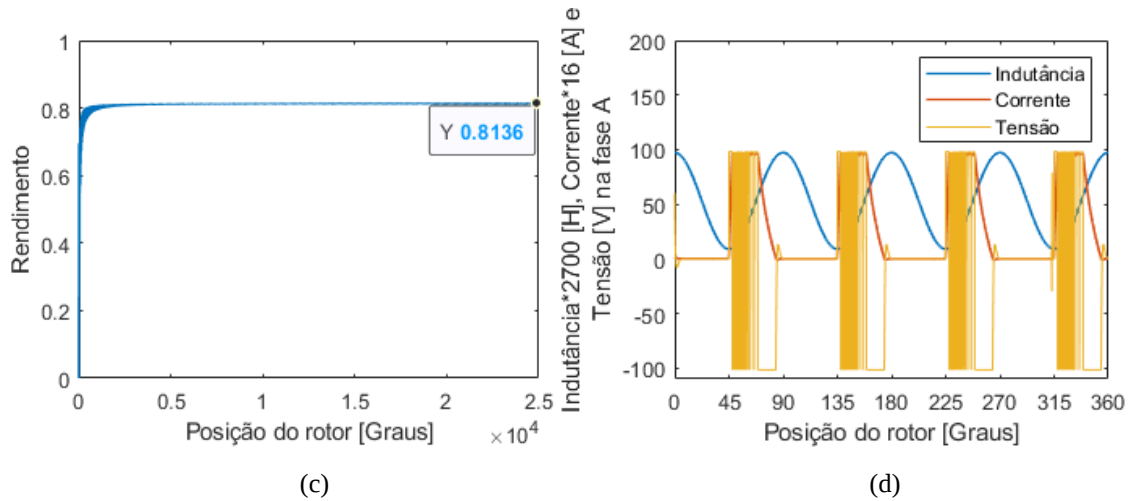


Figura 5.13 – (a) Corrente na fase A, (b) Conjugado, (c) Rendimento, (d) Indutância, Corrente e tensão na fase A

- Corrente de referência de 6A; Acionamento de 28°; 100V; Carga de 1.5 CV

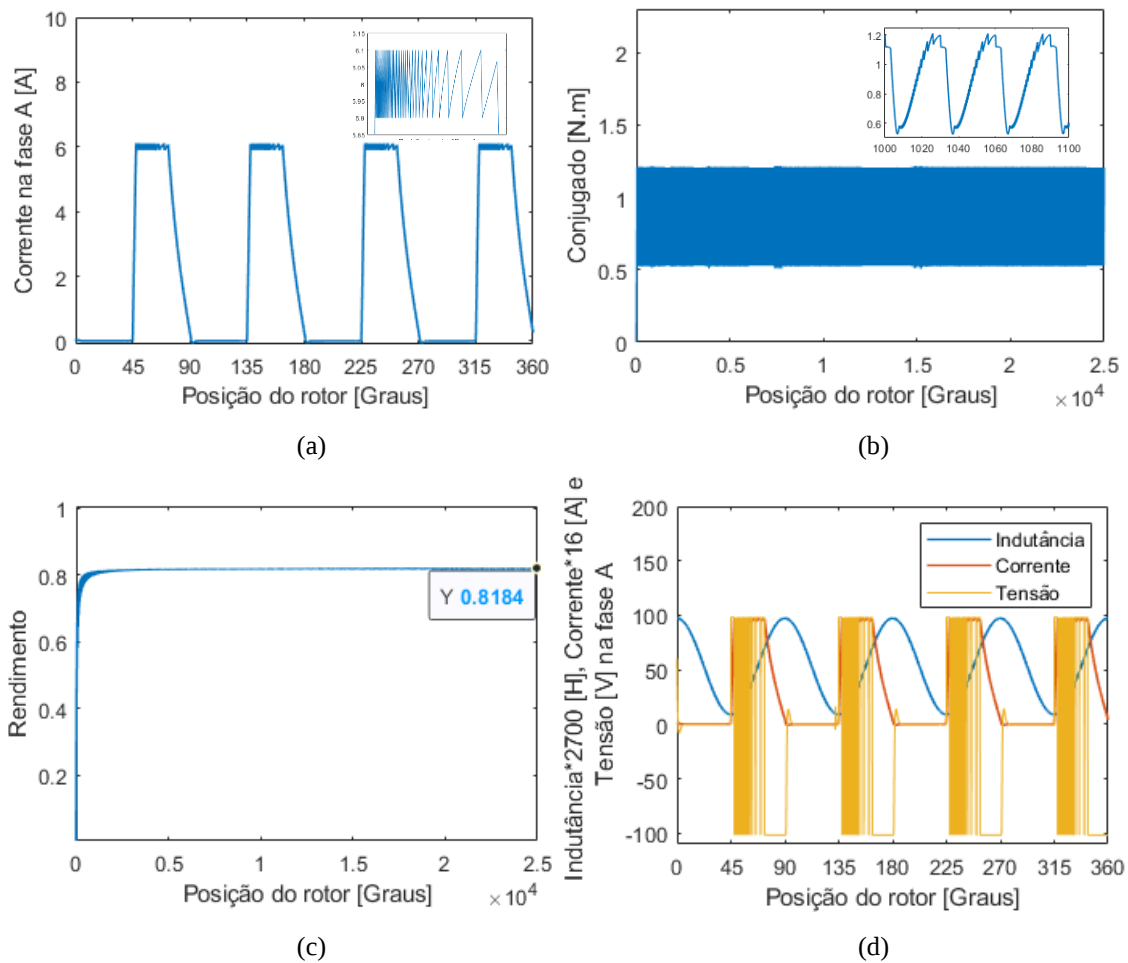


Figura 5.14 – (a) Corrente na fase A, (b) Conjugado, (c) Rendimento, (d) Indutância, Corrente e tensão na fase A

Constata-se a influência do controle de corrente no conjugado de saída. A oscilação de torque apresenta certa magnitude para os valores utilizados de θ_{on} e θ_{off} , como visto na Figura 5.13 (b) e Figura 5.14 (b).

Mantendo a corrente de referência em 6A, o comportamento do rendimento é oposto à operação em malha aberta, o rendimento se mostra melhor com a operação de 28°.

5.2.3 Variando a excitação

- Acionamento de 24°; 150V; Carga de 1.5 CV

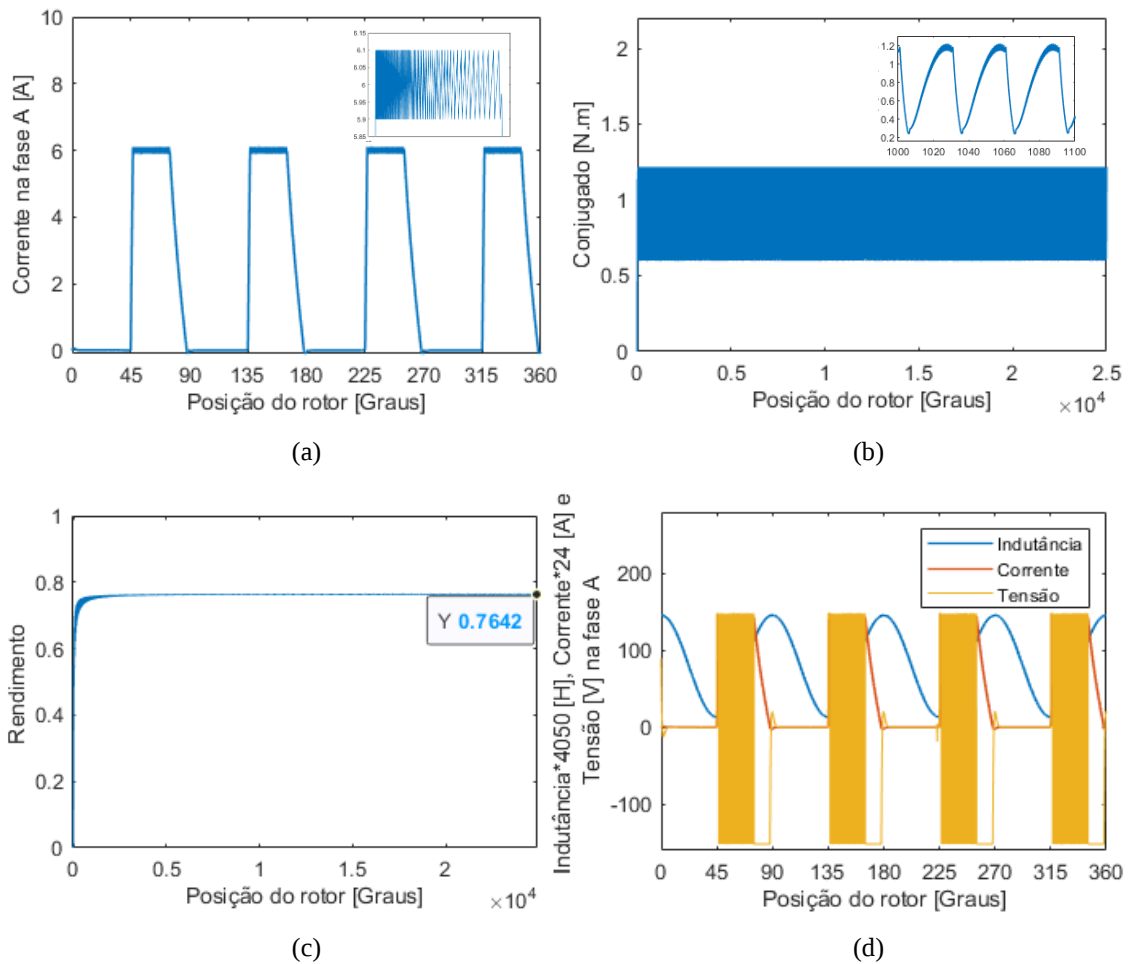


Figura 5.15 – (a) Corrente na fase A, (b) Conjugado, (c) Rendimento, (d) Indutância, Corrente e tensão na fase A

- Acionamento de 24°; 200V; Carga de 1.5 CV

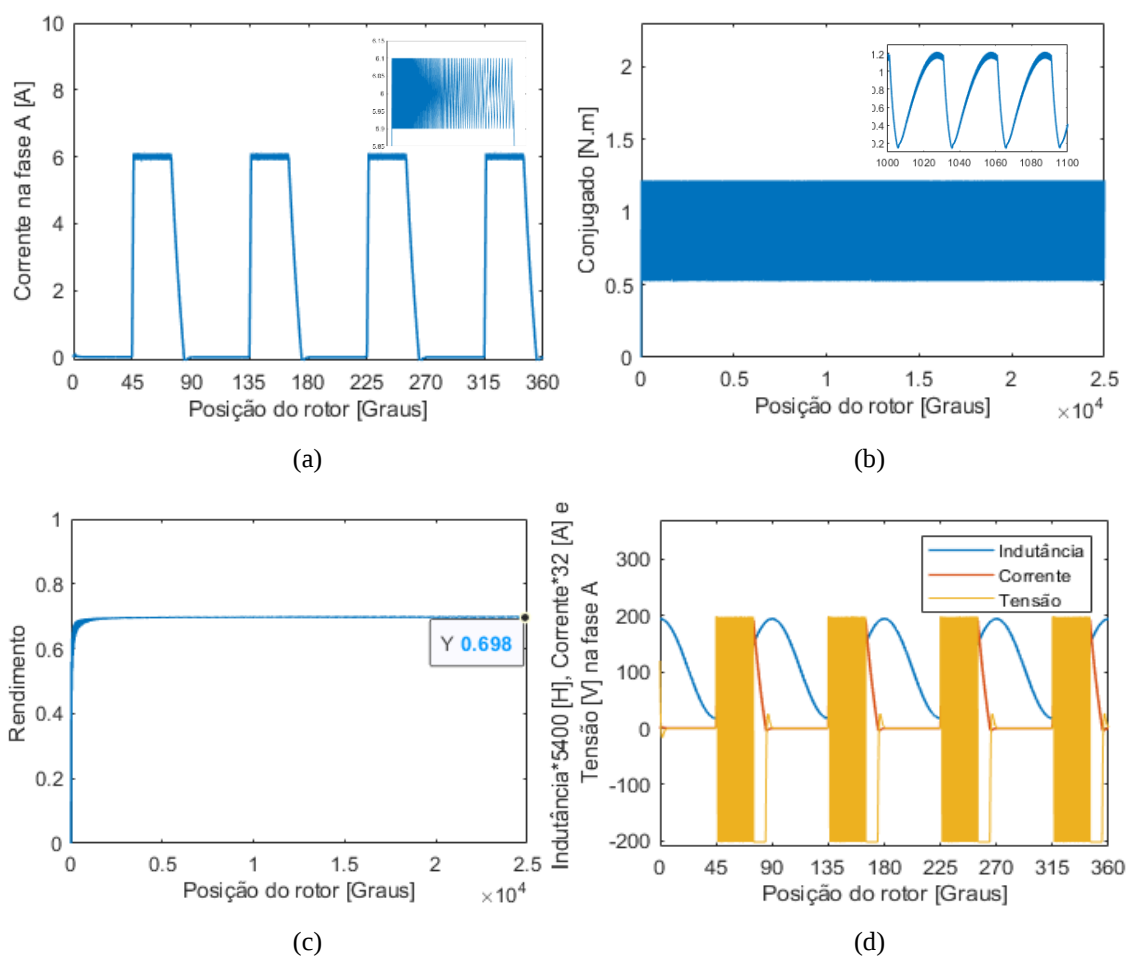


Figura 5.16 – (a) Corrente na fase A, (b) Conjugado, (c) Rendimento, (d) Indutância, Corrente e tensão na fase A

Ao observar as Figuras 5.15 e 5.16, constata-se que a variação notável acontece com o rendimento. Quando a tensão de excitação é aumentada de 150 para 200V, o rendimento cai de 76,4% para 69,8%, evidenciando que o melhor rendimento com a tensão igual a 100V.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento da plataforma de controle de corrente da MRV, foram abordados diversos assuntos pertinentes ao tema.

Foi realizado um estudo sobre o funcionamento da MRV e suas diversas áreas de aplicação. Foi feito ainda um estudo sobre as suas vantagens em relação às outras máquinas elétricas disponíveis atualmente.

O modelo matemático e o modelo computacional desenvolvido mostram-se capazes de prever, com precisão aceitável, o comportamento dinâmico do Motor a Relutância Variável em diversos regimes de operação como: variação da tensão de excitação, variação da carga, ângulos de magnetização, em malha aberta e corrente de referência, em malha fechada.

Foram identificados e interligados todos os elementos necessários ao funcionamento da MRV com controle de corrente no SIMULINK.

Os resultados do controle foram apresentados e discutidos, demonstrando o bom funcionamento da simulação e sua flexibilidade para diversas alterações possíveis a serem realizados.

As dificuldades encontradas no desenvolvimento deste projeto devem-se à quantidade de assuntos envolvidos, dada a natureza multidisciplinar do funcionamento do motor.

Espera-se que a partir deste trabalho, possam surgir outros projetos nesta área de conhecimento, que poderão investigar diversos assuntos que não foram englobados neste trabalho.

Baseado nos estudos realizados, apresenta-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Estudo de conversores alternativos que maximizem o rendimento desta máquina;
- Estudo do modelo não linear com a variação dos parâmetros apresentados, considerando o controle de corrente;

- Estudo comparativo entre controle de corrente utilizando os métodos *soft chopping* e *hard chopping*;
- Projeto de outros controladores ex: PWM, PID;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Miller, T. J. E., **Switched Reluctance Motors and their Control**, Magna Physics Publishing, Oxford, 1993.
- [2] Bernadeli, V. R. **Controle de conjugado em motores a relutância variável**. Uberlândia – MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- [3] BARTOS, F. J. **Forward to the Past with SR technology**, Control Engineering, Barrington; v.46, n.11, p.66-76, November, 1999.
- [4] Ramu, K. **Switched Reluctance Motor Drives**. Modeling, simulation, Analysis, Design, and Applications. New York: Boca Raton. ISBN 0-8493-0838-0.
- [5] Silvera, A. W. F. V. **Controle de tensão na carga para motor/gerador a relutância variável de três fases**, Tese de doutorado, LAcE – UFU, 2011.
- [6] Borges, T. T., - **Motor a relutância chaveado com controle Fuzzy e detecção indireta de posição**. Tese, Universidade Federal de Uberlândia, 2002, 183 pp.
- [7] Teixeira, R. S. – **Estudo de topologia de conversores estáticos para acionamento de motores a relutância chaveada – Simulação e implementação**. Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia, 2005, 130 pp.
- [8] Chen, H.; Shao, Z. – **Fault tolerant control for switched reluctance machine system**. Industrial Electronics Society, 2004, IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE, pag. 2526 – 2529, Vol. 3, 2-6 Nov, 2004.
- [9] Fleury, A., **Modelagem, construção, testes e análise de desempenho de um gerador a relutância chaveado**, Tese de doutorado, LAcE – UFU, 2008.

- [10] Oliveira, A. C. – **Acionamento de Máquinas a Relutância Variável** – Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande – Setembro, 2003.
- [11] Viajante, G. P. **Gerador a Relutância Variável em Conexão com a Rede elétrica para Injeção de Potência Ativa**. Uberlândia – MG: Universidade Federal de Uberlândia, 2013. CDU: 621.3.
- [12] Radimov, N; Bem-Hail, N. e Rabinovici, R. **Simple model of switched-reluctance machine based only on aligned and unaligned position data**. IEEE Transactions on Magnetism, Issue 3, Maio de 2004, Vol. Volume 40, pp. 1562-1572.
- [13] Carvalho, C. F.; Signorelli, M.H.A. **Princípio de funcionamento e acionamento do motor a relutância variável**. IV Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica – CEEL, Uberlândia – MG: Universidade Federal de Uberlândia, Novembro, 2005.
- [14] Coelho, Alexandre. **Simulação, projeto e teste de um gerador a relutância chaveado trifásico 6 x 4**, Dissertação de Mestrado, São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2011
- [15] Andrade, A.A, Costa, R.S., Fleury, A., **Energy efficiency for fractional power loads, Industry Applications Magazine**, Vol. 2 No. 6, Nov – Dec 2006, pp. 12-20
- [16] Hwang, R.G. **Modelagem da Máquina à Relutância Chaveada Incluindo Saturação Magnética**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Outubro, 2002.
- [17] Peng, F. **Three-Level Switched Reluctance Motor Drive and Control**. Tese de Doutorado, McMaster University, 2016.
- [18] Silva, F.R.A.S; Alvarenga, B; Calixto, W.P – **Modelo do motor a relutância variável com base na energia armazenada**. IV simpósio brasileiro de sistemas elétricos – SBSE, Maio 2012

- [19] Ramu, K. **Switched Reluctance Motor Drives, Motor Drives, Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications**. New York: Boca Raton, 2001. ISBN 0-8493-0838-0.
- [20] Scalcon, F. P. **Contribuições ao acionamento e controle dos motores de relutância variável e síncrono de relutância**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Fevereiro, 2015.
- [21] Neto, P. J. S. **Otimização de desempenho do gerador de relutância variável aplicado em sistemas eólicos: uma abordagem via planejamento de experimento computacional**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, 2017.
- [22] Agência Brasil. **Efeito estufa: Transporte responde por 25% das emissões globais**. [online] [Citado em 17 de Agosto de 2019] <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2018-12/efeito-estufa-transporte-responde-por-25-das-emissoes-globais>
- [23] Instituto Nacional de eficiência energética. **Sobre veículos elétricos**. [online] [Citado em 20 de Agosto de 2019] http://www.inee.org.br/veh_sobre.asp?Cat=veh
- [24] Fahimi B., **A switched reluctance machine-based starter/alternator for more electric cars**. Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, no. 1, Março, 2004.
- [25] MacMinn, S., Jones, W., G. Co, and Schenectady, N. **A very high speed switched-reluctance starter-generator for aircraft engine applications**. IEEE National Aerospace and Electron. Conf., NAECON, pp. 1758-1764, 1989.
- [26] Ojeda, X., Mininger, X., Gabsi, M. and Lecrivain, M.. **Noise cancellation of 6 /4 switched reluctance machine by piezoelectric actuators: Optimal design and placement using genetic algorithm**. IET Power Electronics, Machines and Drives 4th conference, pp.611-615, 2008
- [27] Derdiyok, A., Inanc, N., Ozbulu, V., Pastaci, H., Bilgic, M.O. **Fuzzy logic based control of switched reluctance motors to reduce torque ripples**. IEEE Electric Machines and Drives Conf. pp.18-21, 2003

- [28] Chapman, P.L., Sudhoff, S.D. **Design and concise realization of optimized current waveform for an 8/6 switched reluctance drive.** IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 17, no.1, pp.76-83, 2002
- [29] Husain, **Minimization of torque ripples in SRM drives.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, no. 1, pp. 28-39, 2002
- [30] Acciona. [online] [Citado em 26 de Agosto de 2019] <https://www.acciona.com/renewable-energy/>
- [31] National Geographic. **Wind Power.** [online] [Citado em 25 de Agosto de 2019] <https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/wind-power/>
- [32] Ivanov, A.; Kalanchin, I. **Application of maximum power point tracker method in wind energy conversion system based on the switched reluctance generator.** International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), 2017
- [33] Sliwinski, A.; Wrobel, K.; Tomczewski, K.; Tomczewski, A. **Impact of Winding Parameters of a Switched Reluctance Generator on Energy Efficiency of a Wind Turbine.** International Symposium on Electrical Machines (SME), 2018.
- [34] Borges, T. T.; **Controle de Velocidade de Motor à Relutância, baseado em Lógica Nebulosa,** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 111 p., Fevereiro, 1995.
- [35] Scalcon, F.P., Gabbi, T.S., Vieira, R.P., Gründling, H.A. **Controle de velocidade do motor de relutância varável via controlador por modos deslizantes,** Universidade Federal de Santa Catarina, CBA 2018
- [36] Miller, T. **Electronic Control of Switched Reluctance Machines.** Woburn: Newnes Power Engineering Series, 2001. 272 p. ISBN 978-0750650731