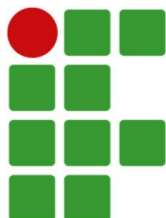


INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA COMPUTACIONAL
PARA O ACIONAMENTO DA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL
6/4 OPERANDO COMO GERADOR**

GEOVANE DONIZETE DE SOUZA

DEZEMBRO

2022



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: **Geovane Donizete de Souza**

Matrícula: **20122040070065**

Título do Trabalho: **DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA COMPUTACIONAL PARA O
ACIONAMENTO DA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 6/4 OPERANDO COMO GERADOR**

Autorização - Marque uma das opções

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

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

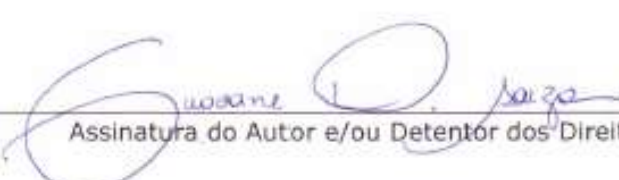
- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

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

- i. 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;
- ii. 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;
- iii. 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-GO, 18 / 05 / 2023.


Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA COMPUTACIONAL
PARA O ACIONAMENTO DA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL
6/4 OPERANDO COMO GERADOR**

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

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

Prof. Josemar Alves dos Santos Junior, Dr. (IFG)

Prof. Marcelo Escobar de Oliveira, Dr. (IFG)

DEZEMBRO

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S729d Souza, Geovane Donizete de.
Desenvolvimento de uma plataforma computacional para o
acionamento da máquina a relutância variável 6/4 operando como
gerador. / Geovane Donizete de Souza. -- Itumbiara, 2023.
103p. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia
Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Ghunter Paulo Viajante.

1. Engenharia elétrica. 2. Máquinas elétricas. 3.
Modelagem matemática. 4. Controladores elétricos. I. Título.
II. Viajante, Ghunter Paulo. III. Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.313



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

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

Termo de Aprovação

GEOVANE DONIZETE DE SOUZA

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA COMPUTACIONAL PARA O ACIONAMENTO DA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 6/4 OPERANDO COMO GERADOR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 15 de Dezembro de 2022, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ghunter Paulo Viajante - Orientador

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Marcelo Escobar de Oliveira - Membro Interno

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Josemar Alves dos Santos Júnior - Membro interno

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Itumbiara – GO

2022

Documento assinado eletronicamente por:

- **Marcelo Escobar de Oliveira**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 17/02/2023 17:06:59.
- **Josemar Alves dos Santos Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 16/12/2022 10:46:34.
- **Ghunter Paulo Viajante**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/12/2022 21:37:20.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 13/12/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 356141

Código de Autenticação: ec1bd4c899



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Furnas, nº 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5612 (ramal: 5612)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família e amigos que me apoiaram durante esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

Primeiramente a Deus pela possibilidade de realizar o sonho de me tornar um profissional da área de engenharia elétrica.

A minha mãe **Maria Aparecida Gonçalves**, e o meu irmão **Donizete Márcio Souza** que sempre fizeram de tudo possível para concluir mais esta etapa em minha vida.

A minha esposa **Mônica Rodrigues de Souza**, por ter sempre estado ao meu lado, sendo amiga companheira nesta trajetória.

Ao amigo, professor e orientador **Ghunter Paulo Viajante**, que sempre me apoiaram e acreditaram em meu potencial para desenvolver as pesquisas e este trabalho, sendo amigos e profissionais que servem de referência para a minha vida pessoal e profissional.

A todos os professores e servidores do IFG que sempre tiveram paciência e disponibilidade para transmitir suas experiências e conhecimentos. Agradeço em especial os professores **Ghunter Paulo Viajante, Marcos Antônio Arantes de Freitas, Marcelo Escobar de Oliveira, Josemar Alves dos Santos Junior, Victor Régis Bernadeli, Olivio Carlos Nascimento Souto, Sergio Batista da Silva, Eric Nery Chaves, Rui Vagner Rodrigues da Silva (in memoriam)** e **Hugo Xavier Rocha** por contribuírem para minha formação não apenas profissional, mas também na formação do meu caráter e postura, servindo de referências a serem seguidos.

A **Usina Rio Dourado (SJC Bioenergia)**, por ter acreditado em meu potencial e incentivado a minha formação profissional, especialmente os colegas de trabalho **Danilo Ferreira Campos, Gustavo Venaciano Bosco, Aryel Alves Guimarães e Marcus Lajes**, que contribuíram muito para a minha formação

A todos amigos e colegas que tive o prazer de conhecer durante a faculdade. Em especial a **Augusto Angelo Pereira Campos, Raphael Carrijo, Samuel Bressani e Luiz Carlos Lourenço** pelos apoios nos momentos difíceis.

Agradeço a **Universidade Federal de Uberlândia (UFU)** por ter disponibilizado a Máquina a Relutância Variável utilizada durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao **Instituto Federal de Goiás (IFG)**, por dar oportunidade para a minha formação em nível técnico e superior.

“Faça o teu melhor, na condição que você tem,
enquanto você não tem condições melhores, para
fazer melhor ainda!”

Mário Sérgio Cortella.

RESUMO

Este trabalho almeja mostrar não apenas a estrutura, mas a sua contribuição ao estudo da Máquina a Relutância Variável (MRV), sendo o principal objetivo realizar o acionamento da Máquina a Relutância Variável como gerador em ambiente de simulação computacional e desenvolveu um modelo matemático da MRV considerando as não linearidades do seu material magnético. Sendo assim, através do desenvolvimento matemático foi projetado um modelo computacional em ambiente Matlab/Simulink sendo capaz de representar com fidelidade o comportamento dinâmico da MRV. E com esta simulação foi possível mostrar uma forma de controle de tensão baseada no controle PI, utilizando conversor em ponte assimétrica *Half- Bridge* por dois métodos, método convencional e método *Flux Boosting*

Palavras-chave: Máquina a Relutância Variável, Gerador, Controle de tensão.

ABSTRACT

This work aims to show not only the structure, but its contribution to the study of the Variable Reluctance Machine (VRM), being the main objective to carry out the activation of the Variable Reluctance Machine as a generator in a computer simulation environment and to develop a mathematical model of the MRV considering the non-linearities of its magnetic material. Thus, through mathematical development, a computational model was designed in Matlab/Simulink environment, being able to faithfully represent the dynamic behavior of the MRV. And with this simulation it was possible to show a form of voltage control based on PI control, using a half-bridge asymmetric bridge converter by two methods, conventional method and flux boosting method.

Keywords: Variable Reluctance Machine, Generator, Voltage Control.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - ESTRUTURA DE MVR 8x6.....	25
FIGURA 2.2 - LIGAÇÃO SÉRIE DA BOBINA FASE A.....	25
FIGURA 2.3 - ESTRUTURA MÁQUINA MVR.....	26
FIGURA 2.4 - CURVAS DE INDUTÂNCIA DE UMA FASE EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO E DA CORRENTE	29
FIGURA 2.5 - PERFIL DA INDUTÂNCIA 3D.....	30
FIGURA 2.6 - CARACTERÍSTICA DE SOLENOIDE	32
FIGURA 2.7 - DEMONSTRAÇÃO DE FLUXO MAGNÉTICO INTERNO MVR.....	32
FIGURA 2.8 - MOMENTO DE ACIONAMENTO DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL.....	34
FIGURA 2.9 - (A) ETAPA INICIAL, (B) ETAPA DE EXCITAÇÃO, (C) ETAPA DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA PARA A CARGA.....	35
FIGURA 2.10 - FASE A CONVERSOR <i>HALF – BRIDGE</i>	36
FIGURA 2.11 - CIRCUITO EQUIVALENTE MOMENTO DE EXCITAÇÃO	36
FIGURA 2.12 - CIRCUITO EQUIVALENTE MOMENTO DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA	37
FIGURA 2.13 - MOMENTO DE ACIONAMENTO DO MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL	38
FIGURA 2.14 - (A) ETAPA INICIAL, (B) ETAPA DE EXCITAÇÃO, (C) ETAPA DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA PARA A CARGA.....	38
FIGURA 2.15 - EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE DE ENERGIA EÓLICA INSTALADA	40
FIGURA 2.16 - FUNCIONAMENTO ENCODER ROTATIVO	42
FIGURA 2.17 - POSIÇÃO ROTÓRICA DO ENCODER.....	44
FIGURA 2.18 - LOCAL DE INTERLIGAÇÃO DO ENCODER COM A MVR	44
FIGURA 2.19 - CIRCUITO ELÉTRICO REFERENTE A UMA FASE MRV	45
FIGURA 2.20 - CURVA DE MAGNETIZAÇÃO TÍPICA PARA UMA FASE DO MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL	47
FIGURA 2.21 - DIAGRAMA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	51
FIGURA 2.22 - MVR 6/4 BASE DA SIMULAÇÃO	52
FIGURA 2.23 - CIRCUITO DO CONVERSOR HALF-BRIDGE (HB)	53
FIGURA 2.24 - ESTADA DE ACIONAMENTO DO MVR.....	54
FIGURA 2.25 - ESTADA DE ACIONAMENTO DO GVR	55
FIGURA 2.26 - (A) BLOCO GERAL DA GERAÇÃO DOS PULSOS DE DISPARO DAS CHAVES ESTÁTICAS, (B) VISÃO EXPLODIDA DO BLOCO DE GERAÇÃO DOS PULSOS DE DISPARO.....	56
FIGURA 2.27 - VARIAÇÃO DE TETA EM RAD/S.....	57
FIGURA 2.28 - VARIAÇÃO DE INDUTÂNCIA, VARIAÇÃO DE TETA E PONTO DE ACIONAMENTO	58
FIGURA 2.29 - ESQUEMA DE BLOCO HALF BRIDGE (HB).....	58
FIGURA 2.30 - PROGRAMADA EM LINHAS DE CÓDIGO ATRAVÉS DA FUNÇÃO <i>FUNCTION_GRV</i>	59
FIGURA 2.31 - MODELO COMPUTACIONAL PARA ACIONAMENTO DA MVR.....	60
FIGURA 2.32 - SIMULAÇÃO DO VALOR DE TENSÃO GRV MALHA ABERTA	61
FIGURA 2.33 - SIMULAÇÃO DE CORRENTE EM MALHA ABERTA GRV	61
FIGURA 2.34 - PICO DE CORRENTE POR FASE.....	62
FIGURA 2.35 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA ABERTA COM TENSÃO DE EXCITAÇÃO DE 50 VCC - (A) TENSÃO GERADA (B) TENSÃO NA CARGA (C) CORRENTE GERADA (D) CORRENTE NA CARGA	63

FIGURA 2.36 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA ABERTA COM TENSÃO DE EXCITAÇÃO DE 75 VCC (A) TENSÃO GERADA (B) TENSÃO NA CARGA (C) CORRENTE GERADA (D) CORRENTE NA CARGA	64
FIGURA 2.37 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA ABERTA COM TENSÃO DE EXCITAÇÃO DE 100 VCC (A) TENSÃO GERADA (B) TENSÃO NA CARGA (C) CORRENTE GERADA (D) CORRENTE NA CARGA	65
FIGURA 2.38 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA ABERTA COM TENSÃO DE EXCITAÇÃO DE 200 VCC (A) TENSÃO GERADA (B) TENSÃO NA CARGA (C) CORRENTE GERADA (D) CORRENTE NA CARGA	66
FIGURA 2.39 - GRÁFICO GERAL DAS TENSÕES DE SAÍDA EM RELAÇÃO À TENSÃO DE EXCITAÇÃO	67
FIGURA 2.40 - DIAGRAMA DE SIMULAÇÃO DO CONTROLE DE TENSÃO	71
FIGURA 2.41 - ESTRATÉGIA PARA VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE MAGNETIZAÇÃO DAS CHAVES DO HB.....	72
FIGURA 2.42 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO CONVERSOR H.....	72
FIGURA 2.43 - INDUTÂNCIA E PULSO DE DISPARO DE UMA FASE EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO DO ROTOR.....	73
FIGURA 2.44 - ETAPA I – EXCITAÇÃO	74
FIGURA 2.45 - ETAPA II – GERAÇÃO POR FASE	74
FIGURA 2.46 - ETAPA II – EXCITAÇÃO	75
FIGURA 2.47 - DIAGRAMA COMPLETO DE SIMULAÇÃO	76
FIGURA 2.48 - DIAGRAMA DE CONTROLE DE TENSÃO GERADO.....	77
FIGURA 2.49 - DETALHAMENTO DO CONTROLE GERADO DENTRO DO SIMULINK.....	77
FIGURA 2.50 - DIAGRAMA DE VARIAÇÃO DA INDUTÂNCIA, CORRENTE EM RELAÇÃO AO ACIONAMENTO	79
FIGURA 2.51 - CORRENTE POR FASE	79
FIGURA 2.52 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA MÉTODO CLÁSSICO COM TENSÃO DE EXCITAÇÃO DE 200 VCC (A) TENSÃO GERADA (B) CORRENTE CARGA (C) DISPARO DAS CHAVES (D) CORRENTE NA CARGA	80
FIGURA 2.53 - TENSÃO FASE A MÉTODO CONVENCIONAL.....	80
FIGURA 2.54 - RENDIMENTO DA MVR OPERADOR COMO GERADOR MÉTODO CONVENCIONAL	81
FIGURA 2.55 - DIAGRAMA DE VARIAÇÃO DA INDUTÂNCIA, CORRENTE	81
FIGURA 2.56 - CORRENTE POR FASE MVR OPERADOR COMO GERADOR MÉTODO FLUX BOOSTING	82
FIGURA 2.57 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA MÉTODO <i>FLUX BOOSTING</i> , COM TENSÃO DE EXCITAÇÃO DE 200 VCC (A) TENSÃO GERADA (B) TENSÃO NA CARGA (C) CORRENTE GERADA (D) CORRENTE NA CARGA.....	82
FIGURA 2.58 - TENSÃO FASE A MÉTODO FLUX BOOSTING.....	83
FIGURA 2.59 - RENDIMENTO DO GERADOR MVR	83
FIGURA 2.60 - COMPARATIVO DE OPERAÇÃO MVR ENTRE MÉTODO CONVENCIONAL / MÉTODO FLUX BOOSTING	84
FIGURA 2.61 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA MÉTODO CONVENCIONAL COM TENSÃO DE EXCITAÇÃO DE 100 VCC (A) TENSÃO GERADA (B) CORRENTE CARGA (C) DISPARO DAS CHAVES (D) CORRENTE NA CARGA.....	85
FIGURA 2.62 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA MÉTODO <i>FLUX BOOSTING</i> , COM TENSÃO DE EXCITAÇÃO DE 100 VCC (A) TENSÃO GERADA (B) TENSÃO NA CARGA (C) CORRENTE GERADA (D) CORRENTE NA CARGA.....	86
FIGURA 2.63 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA MÉTODO CONVENCIONAL COM TENSÃO DE EXCITAÇÃO DE 150 VCC (A) TENSÃO GERADA (B) CORRENTE CARGA (C) DISPARO DAS CHAVES (D) CORRENTE NA CARGA.....	87

FIGURA 2.64 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA MÉTODO <i>FLUX BOOSTING</i> , COM TENSÃO DE EXCITAÇÃO DE 150 VCC (A) TENSÃO GERADA (B) TENSÃO NA CARGA (C) CORRENTE GERADA (D) CORRENTE NA CARGA.....	88
FIGURA 2.65 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA MÉTODO CONVENCIONAL COM TENSÃO DE EXCITAÇÃO DE 250 VCC (A) TENSÃO GERADA (B) CORRENTE CARGA (C) DISPARO DAS CHAVES (D) CORRENTE NA CARGA.....	89
FIGURA 2.66 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA MÉTODO <i>FLUX BOOSTING</i> , COM TENSÃO DE EXCITAÇÃO DE 250 VCC (A) TENSÃO GERADA (B) TENSÃO NA CARGA (C) CORRENTE GERADA (D) CORRENTE NA CARGA.....	90
FIGURA 2.67 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA MÉTODO CONVENCIONAL, COM VELOCIDADE 1000 RPM (A) TENSÃO GERADA (B) TENSÃO NA CARGA (C) CORRENTE GERADA (D) CORRENTE NA CARGA.....	91
FIGURA 2.68 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA MÉTODO <i>FLUX BOOSTING</i> , COM VELOCIDADE ALTERADA 1000 RPM (A) TENSÃO GERADA (B) TENSÃO NA CARGA (C) CORRENTE GERADA (D) CORRENTE NA CARGA.....	92
FIGURA 2.69 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA MÉTODO CONVENCIONAL, COM VELOCIDADE 1250 RPM (A) TENSÃO GERADA (B) TENSÃO NA CARGA (C) CORRENTE GERADA (D) CORRENTE NA CARGA.....	93
FIGURA 2.70 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA MÉTODO <i>FLUX BOOSTING</i> , COM VELOCIDADE ALTERADA 1250 RPM (A) TENSÃO GERADA (B) TENSÃO NA CARGA (C) CORRENTE GERADA (D) CORRENTE NA CARGA.....	94
FIGURA 2.71 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA MÉTODO CONVENCIONAL, COM VELOCIDADE ALTERADA 2000 RPM (A) TENSÃO GERADA (B) TENSÃO NA CARGA (C) CORRENTE GERADA (D) CORRENTE NA CARGA.....	95
FIGURA 2.72 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO EM MALHA FECHADA MÉTODO CONVENCIONAL, COM VELOCIDADE 2000 RPM (A) TENSÃO GERADA (B) TENSÃO NA CARGA (C) CORRENTE GERADA (D) CORRENTE NA CARGA.....	96

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - MODELOS DE MVR MAIS UTILIZADOS.....	26
TABELA 2.2 - TABELA DE CONVERSÃO CÓDIGO BINÁRIO CÓDIGO GRAY	43
TABELA 2.3 - CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E ELÉTRICAS PRINCIPAIS DA MVR.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

IFG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
MRV	Máquina a Relutância Variável
GRV	Gerador a Relutância Variável
θ_{on}	Ângulo de Magnetização
θ_{off}	Ângulo de Desmagnetização
θ_r	Ângulo fim da transferência de energia acumulada na fase para a fonte.
θ	Posição Rotórica
ω, w	Velocidade Angular
θ_{rotor}	Período de variação da indutância
P_{rotor}	Número de polos no rotor.
θ_0	Posição Rotórica de Referência
HB	Half-Bridge
U_a	Enrolamento da fase A
U_b	Enrolamento da fase B
U_c	Enrolamento da fase C
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor Bipolar de Porta Isolada)
$S_1 \dots S_n$	Chaves IGBT
$D_1 \dots D_n$	Diodos de ação rápida
AC	<i>Alternating Current</i> (Corrente alternada)
CC	<i>Continuos Current</i> (Corrente Contínua)
v	Tensão aplicada
i	Corrente da fase
R	Resistência da fase
λ	Fluxo magnético dependente da corrente e posição rotórica
t	Tempo

$\mathcal{R}_i$	Relutância magnética
N	Número de espiras das bobinas
μ	Permeabilidade magnética equivalente (Ferro e Entreferro)
A	Área transversal por onde circula o fluxo
l	Comprimento médio do circuito
$L(i, \theta)$	Indutância Variável da Fase
e	Força contra-eletromotriz
C_m	Conjugado mecânico no eixo
C_c	Conjugado de carga
D	Coefficiente de atrito viscoso
J	Momento de Inércia
$W^{co}(i, \theta)$	Co-energia
$G_1, \dots, G_n$	Pulso disparo das chaves estáticas
$G_{1c}, \dots, G_{nc}$	Pulso disparo controlados das chaves estáticas
$s_2(x)$	Interpolação Splines Quadráticas
$s_3(x)$	Interpolação Splines Cúbicas
3D	Três Dimensões
Temag	Conjugado Eletromagnético
CV	Cavalo Vapor
PID	Proporcional, Integral, Derivativo
PI	Proporcional, Integral
CPU	<i>Central Processament Unit</i> (Unidade Central de Processamento)
FPGA	<i>Field Programmable Gate Arrays</i> (Arranjo de portas programáveis em campo)
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> (Processador Digital de Sinais)
MIT	<i>Motor Indução Trifásico</i>
RAM	<i>Random Access memory</i> (Memória de acesso aleatório)

HB	<i>Half-Bridge</i>
NI	<i>National Instruments</i>
RIO	<i>Recordable Input Output</i>
RT	Real Time

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	21
INTRODUÇÃO	21
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	21
1.2 OBJETIVOS.....	22
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	22
1.2.2 <i>Objetivos Específico</i>	<i>Erro! Indicador não definido.</i>
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	23
CAPÍTULO 2	24
MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL.....	24
2.1 INTRODUÇÃO	24
2.1.1 <i>Estrutura das máquinas a relutância Variável</i>	24
2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	28
2.3 GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL	34
2.4 MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL	37
2.5 APLICAÇÕES DOS GERADORES A RELUTÂNCIA VARIÁVEL.....	38
2.5.1 <i>Relutância Variável aplicado à Geração Eólica</i>	39
2.5.2 <i>Aplicação Aeronáutica e Espacial</i>	40
2.5.3 <i>Aplicações Automotivas</i>	41
2.6 ENCODER.....	41
2.6.1 <i>Encoder absoluto</i>	42
CAPÍTULO 3	45
MODELAGEM MATEMÁTICA	45
3.1 - INTRODUÇÃO	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
3.2 - EQUAÇÃO ELÉTRICA E MECÂNICA	45
CAPÍTULO 4	50
PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO	50
4.1 INTRODUÇÃO	50
4.2 ELEMENTOS DO PROCESSO DE CONVERSÃO ELETROMECHANICA.....	51
4.3 MODELO DO GVR.....	52
4.4 CONVERSOR ELETRÔNICO DE POTÊNCIA	53
4.5 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO	54
4.6 LEITURA DE POSIÇÃO	55

4.7 ALGORITMO DE ACIONAMENTO.....	56
4.8 CONVERSOR DE POTÊNCIA.....	58
4.9 MODELO COMPUTACIONAL	60
4.10 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO INICIAL.....	60
4.10.1 Excitação: 50VCC – Velocidade: 1500 rpm – carga: 40 Ω	62
4.10.2 Excitação: 75VCC – Velocidade: 1500 rpm – carga: 40 Ω	64
4.10.3 Excitação: 100VCC – Velocidade: 1500 rpm – carga: 40 Ω	65
4.10.4 Excitação: 200VCC – Velocidade: 1500 rpm – carga: 40 Ω	66
CAPÍTULO 5.....	68
TÉCNICA DE CONTROLE TENSÃO GRV	68
5.1 INTRODUÇÃO	68
5.2 CONTROLADORES PI.....	69
5.2.1 Controlador Proporcional (P)	69
5.2.2 Controlador Proporcional Integral (PI)	70
5.3 CONTROLE PI EMBASADO NA VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE DESMAGNETIZAÇÃO	70 off
5.4 ESTRATÉGIA DE CHAVEAMENTO.....	72
5.4.1 Etapa I - Excitação	73 on < θ < off
5.4.2 Etapa II - Excitação	74 off < θ < on
5.5 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE.....	75
CAPÍTULO 6.....	76
RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	76
6.1 MODELO COMPUTACIONAL DO CONTROLE DE TENSÃO: OPERAÇÃO DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL EM MALHA FECHADA.....	76
6.2 CRITÉRIOS DE SIMULAÇÃO	78
6.2.1 Método convencional	78
6.2.2 Método flux boosting.....	81
6.2.3 Excitação: 200 VCC – Velocidade: 1500 rpm – carga: 40 Ω (Método Convencional).....	79
6.2.4 Excitação: 200 VCC – Velocidade: 1500 rpm – carga: 40 Ω (Método Flux boosting).....	82
6.3 COMPRAÇÃO ENTRE OS DOIS MÉTODOS;.....	83
6.3.1 Caso 01: Excitação: 100 VCC – Velocidade: 1500 rpm – carga: 40 Ω (Método Convencional)	85
6.3.2 Caso 02: Excitação: 100 VCC – Velocidade: 1500 rpm – carga: 40 Ω (Método Flux boosting).....	86
6.3.3 Caso 03: Excitação: 150 VCC – Velocidade: 1500 rpm – carga: 40 Ω (Método Convencional)	87
6.3.4 Caso 04: Excitação: 150 VCC – Velocidade: 1500 rpm – carga: 40 Ω (Método Flux boosting).....	88
6.3.5 Caso 05: Excitação: 250 VCC – Velocidade: 1500 rpm – carga: 40 Ω (Método Convencional)	89
6.3.6 Caso 06: Excitação: 250 VCC – Velocidade: 1500 rpm – carga: 40 Ω (Método Flux boosting).....	90
6.3.7 Caso 07: Excitação: 200 VCC – Velocidade: 1000 rpm – carga: 40 Ω (Método Convencional)	91
6.3.8 Caso 08: Excitação: 200 VCC – Velocidade: 1000 rpm – carga: 40 Ω (Método Flux boosting).....	92
6.3.9 Caso 09: Excitação: 200 VCC – Velocidade: 1250 rpm – carga: 40 Ω (Método Convencional)	93

6.3.10 Caso 10: Excitação: 200 VCC – Velocidade: 1250 rpm – carga: 40 Ω (Método Flux boosting).....	94
6.3.11 Caso 11: Excitação: 200 VCC – Velocidade: 2000 rpm – carga: 40 Ω (Método Convencional).....	95
6.3.12 Caso 12: Excitação: 200 VCC – Velocidade: 2000 rpm – carga: 40 Ω (Método Flux boosting).....	96
CAPÍTULO 7	98
CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Segundo [1] as máquinas de relutância variável (MRV) tornam-se mais simples das máquinas. São estatores com enrolamentos de excitação e um rotor magnético com saliências. Sobre este aspecto construtivo segundo [5] a MVR pode ser estudada em diversas configurações, sendo estas configurações conhecidas com $m \times n$, onde m é o número de polos do estator e n é o número de polos do rotor.

Nas últimas décadas, o estudo baseado em máquina de relutância variável tem se intensificado se tornando uma alternativa vantajosa para indústrias e para uso doméstico, caracterizado por ser uma máquina que possui torque elevado, alta eficiência e baixo custo [13].

Máquinas a Relutância Variável é do ponto de vista, construtivo é robusta, simples de ser projetada e não possui enrolamentos no rotor, o que a torna mais barata em relação às máquinas elétricas de mesma potência e rotação [5].

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo estudar o funcionamento da Máquina a Relutância variável 6/4. Com intuito de simulação da Máquina a Relutância Variável como gerador possibilitando analisar e deduzir seu comportamento dinâmico e preservando a estrutura desenvolvida para trabalhos futuros.

1.2.1 Objetivo Geral

Mostrar as áreas abrangidas pelo projeto, como por exemplo, as máquinas elétricas, eletrônica digital e analógica e acionamentos elétricos e demonstrar todo o funcionamento o da máquina de relutância variável 6/4 acionada como gerador possibilitando a análise e avaliação do seu comportamento dinâmico.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Demonstração da Máquina a Relutância Variável operando como gerador.
 - Análise do conversor *half-Brigde* para acionamento de uma MRV 6 / 4.
 - Desenvolvimento de um algoritmo para o acionamento da máquina como gerador.
 - Acionar a Máquina a Relutância como gerador, operando em malha aberta e interpretando a influência das principais variáveis presente em seu acionamento.
 - Mover a Máquina a Relutância Variável como gerador, operando em malha fechada com finalidade de controle de tensão.
 - Estudar o comportamento da Máquina a Relutância frente a oscilação de velocidade, tensão de excitação.
-

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Com o foco de alcançar os objetivos proposto e demonstração dos resultados este trabalho dividido da seguinte forma:

O **capítulo 2** discorre sobre “Demonstração da Máquina a Relutância Variável”, explanado suas características construtivas, princípio de funcionamento e acionamento, forma construtiva. Descrevendo o modelo matemático que representa as não linearidades do Gerador a Relutância Variável.

O **capítulo 3**. Demonstra o modelo matemático estruturado, apresentado equações elétricas e mecânicas.

O **capítulo 4** Discute os conceitos adotados para a simulação da máquina, indicando parâmetros e formato do acionamento, com uma descrição sucinta das tecnologias utilizadas neste trabalho, com uma explanação do conversor eletrônico utilizado para acionamento máquina de Relutância Variável conversor de Potência *Half- Bridge*, contendo simulações do GRV (Gerador de Relutância Variável) operado em malha aberta.

O **capítulo 5**. Expõe as técnicas de controle de tensão da carga do Gerador a Relutância Variável, explanando os métodos de acionamentos visando maior desempenho da MVR.

O **capítulo 6**. Apresenta os resultados experimentais obtidos em malha fechada, o desenvolvimento do software de supervisão e acionamento o gerador Relutância Variável e um ensaio experimental do Gerador controlando a tensão da carga baseado na variação do ângulo de desmagnetização das chaves e da variação da tensão de excitação e velocidade. Todos os resultados são apresentados e discutidos

O **capítulo 7** Apresenta considerações finais sobre o trabalho juntamente com sugestões de novos projetos de pesquisas utilizando o modelo computacional e a bancada experimental desenvolvido.

CAPÍTULO 2

MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

2.1 INTRODUÇÃO

Generalizando os princípios de funcionamento de todos os conversores eletromecânicos de energia demonstram muitas semelhanças, mas em alguns modelos, possui algumas especificidades [9]. A Máquina de Relutância Variável (MRV) possui construção semelhante à maioria das máquinas elétricas, o modelo de funcionamento assemelha-se ao de um motor de passo, com base na relutância, no entanto esta similaridade somente está na relutância, visto que a aplicação de ambos é distinta [12].

Embora conhecidas desde o século XIX [4], as MVR's se beneficiaram muito com o avanço crescente da eletrônica de potência e os microprocessadores. Com isto segundo [4, 16, 25] tornaram-se viáveis, confiáveis e eficientes.

Segundo [9], descrevem que a MVR se torna uma máquina promissora, que possui algumas vantagens, com potencial de substituir máquinas consolidadas em algumas aplicações, principalmente por ser uma Máquina de Relutância Variável de baixo custo de produção com robustez e tolerância as faltas, sendo elevado o conjugado de partida e a ausência dos ímãs ou mesmo dos enrolamentos no rotor. Tais detalhes permite ser uma excelente opção para as aplicações aeroespaciais e de tração elétrica.

Assim, serão demonstradas neste trabalho as características e formas de acionamento de um gerador a relutância variável polifásico possuindo quatro fases distintas.

2.1.1 Estrutura das Máquinas a Relutância Variável

Uma Máquina a Relutância Variável (MRV) é composta de uma estrutura laminada de dupla saliência, em que as bobinas estão restritas apenas aos dentes do estator o rotor com uma construção singular em que não possui bobinas ou ímã [9] [1], onde o conjugado é provocado pela tendência ao alinhamento dos polos do estator com os polos do rotor onde se encontra as bobinas energizadas [25], esta construção possibilita uma estruturas

rígida, fornecendo a vantagem de atingir altas velocidades e suportando altas temperaturas [1], associado a um baixo momento de inércia. [9] Além disso, usualmente, e no caso deste trabalho, cada bobina de par de dentes oposto de estator constitui uma fase.

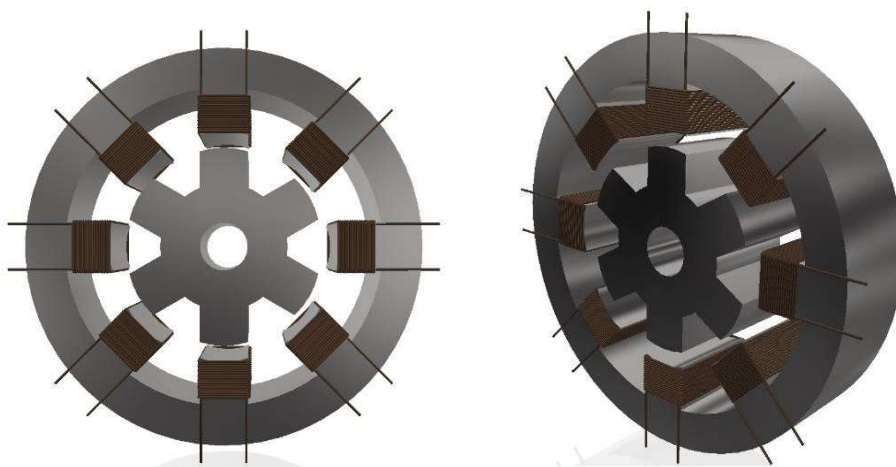


Figura 2.1 - Estrutura de MVR 8x6

Na figura 2.1 é demonstrada uma MRV 8x6, sendo este formato com oito polos no estator e quatro polos no rotor. Como cada par de polos no estator forma uma fase, a MRV possui quatro fases distintas.

Conforme pode ser visto na figura 2.2, um formato de ligação série das bobinas de cada par de dentes opostos por se tratar da mesma fase, com isso a corrente que percorre essas bobinas será a mesma [9]. Para facilitar o entendimento, abaixo segue a demonstração de uma bobina de apenas uma fase, porém essa configuração repete-se para todas as outras três fases.

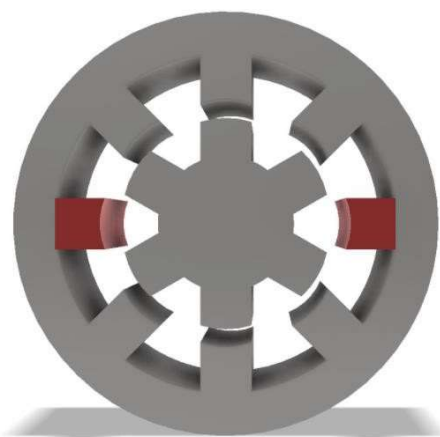


Figura 2.2 - Ligação série da bobina fase A

Possuindo um formato de ligação em que o bobinado faz se presente apenas no estator pode-se verificar um menor custo com cobre, reduzindo as perdas por efeito Joule, dentro deste aspecto ressalta o menor custo de fabricação tornando-se um fator positivo encontrados nas MVR's [8, 1], onde este custo podendo representar 60% do custo de produção de máquinas de corrente contínua ou corrente alternada equivalentes [25]. Entretanto, diferentemente de outras máquinas, a MRV requer a utilização de um conversor encarregado do seu acionamento, conforme é demonstrado na figura abaixo:

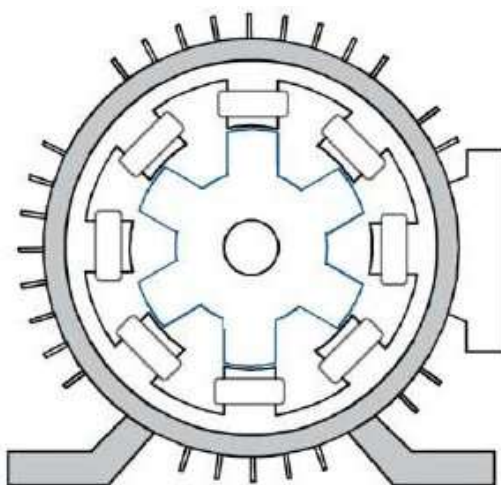


Figura 2.3 - Estrutura da Máquina Relutância Variável (MVR) [8]

Dentro do aspecto construtivo a MRV pode-se notar diversos formatos possíveis, sendo estas configurações conhecidas por $m \times n$, onde m é o número de polos do estator e n número de polos no rotor [8].

Segundo [20, 25] detalha a tabela 2.1 os formatos de MRV mais utilizados, são:

Formato	Polos no Estator	Polos no Rotor
MRV 6/4	6	4
MRV 8/6	8	6
MRV 12/8	12	8
MRV 12/10	12	10

Tabela 2.1 - Modelos de MVR mais utilizados

Os números de polos do estator e do rotor são sempre diferentes, caso contrário, existiriam posições angulares do rotor em que os polos estariam alinhados com os polos do estator, onde se torna impossível à partida da máquina se tratando de motor [23], esta concepção é inexistente se tratando de gerador a relutância variável porque o movimento inicia pelo mecanismo primário acoplado ao eixo do motor [3], com isso GRV pode ser construído com número igual de polos no rotor e estator.

A escolha do número de fases da MVR depende de uma série de fatores, onde um número maior de fases consiste no aumento da frequência dos pulsos com melhor sinal de saída de tensão e corrente, por outro lado, ao aumentar o número de polos ocorre a diminuição na área das ranhuras limitando a quantidade de espiras e/ou bitola do condutor, primordiais para o funcionamento da máquina com relação direta a indutância da fase ou capacidade de condução de corrente [3].

Por isso considera as maiores quantidades de fases resultam também em maior custo com aumento da quantidade de ferro e cobre aumento na quantidade de componentes eletrônicos para acionamento.

As máquinas a relutância variável são essencialmente CC, necessitando de uma fonte de corrente contínua para ser excitada [13], ocorrendo a necessidade de um conversor de potência para garantir a corrente de alimentação, considerando assim uma máquina CC síncrona, no sentido eletromagnético é gerado apenas com a rotação síncrona do rotor em relação a força contra eletromotriz inserida, a relação síncrona, contudo, depende do número de polos e fases de forma complexa. [23]

Segundo [15], as máquinas de relutância variável têm alta confiabilidade, podendo funcionar mesmo sem uma fase presente apenas reduzindo o seu desempenho, uma das razões é que o rotor não possui fonte de excitação com isso não gera energia na fase com falha.

Após o relato de algumas limitações, a Máquina a Relutância Variável apresenta-se apta a concorrer com máquinas convencionais em funções que demandem velocidades variáveis, pois, neste contexto o conversor é nivelado ao acionamento convencional utilizado para controle de velocidade e da tensão [16].

Para a inserção no mercado e conseqüentemente, a sua comercialização, é necessário considerar os estudos de alto desempenho, que ainda é uma novidade para o mercado e para comunidade científica [4] mesmo projetada desde século XIX [4, 8, 9, 3],

com o avanço contate da eletrônica de potência e os microprocessadores, esta máquina vem se tornando cada vez mais eficiente, viável e confiável. [4, 16]

2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Sintetizando, descreve-se a tensão nos terminais do bobinado das MVR's da seguinte forma:

$$V = R \times i + \frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} \quad (2.1)$$

Onde:

- λ Fluxo Magnético
- i Corrente Instantânea
- θ Posição do Rotor
- R Resistência Ôhmica
- V Tensão Instantânea

A equação 2.1 demonstra de fato a resistência, todas as demais variáveis têm variação dependendo da posição do rotor em relação ao tempo [13]. A corrente tem relação com o fluxo por meio da indutância conforme equação (2.2);

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (2.2)$$

Onde:

- λ Fluxo Magnético
 - i Corrente Instantânea
-

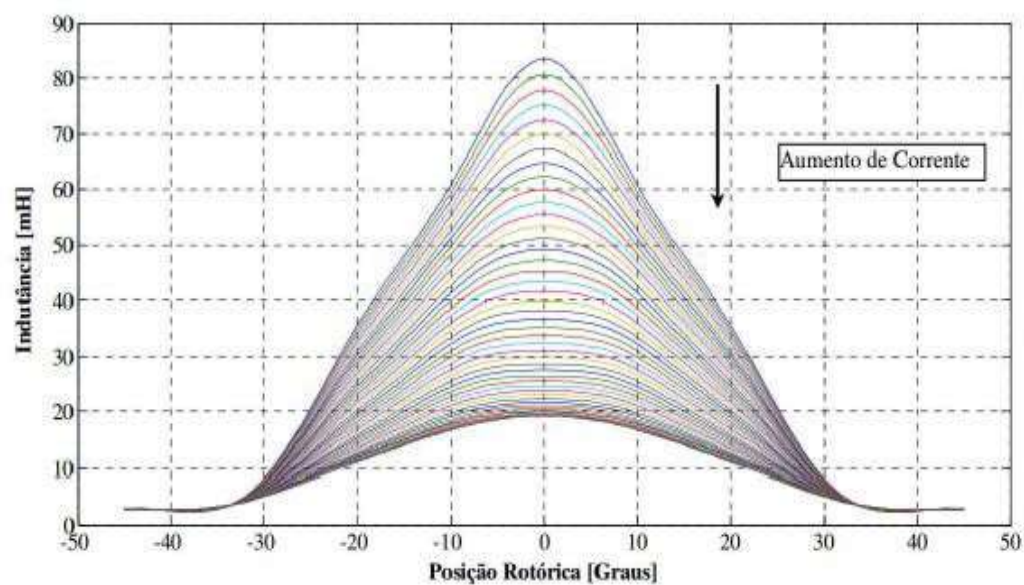


Figura 2.4 - Curvas de indutância de uma fase em função da posição e da corrente [4]

Conforme demonstrado na figura 2.4 o perfil de indutância típico de uma fase da MVR, indicando na formula (2.2), a indutância muda com a posição angular do rotor e com a corrente [3].

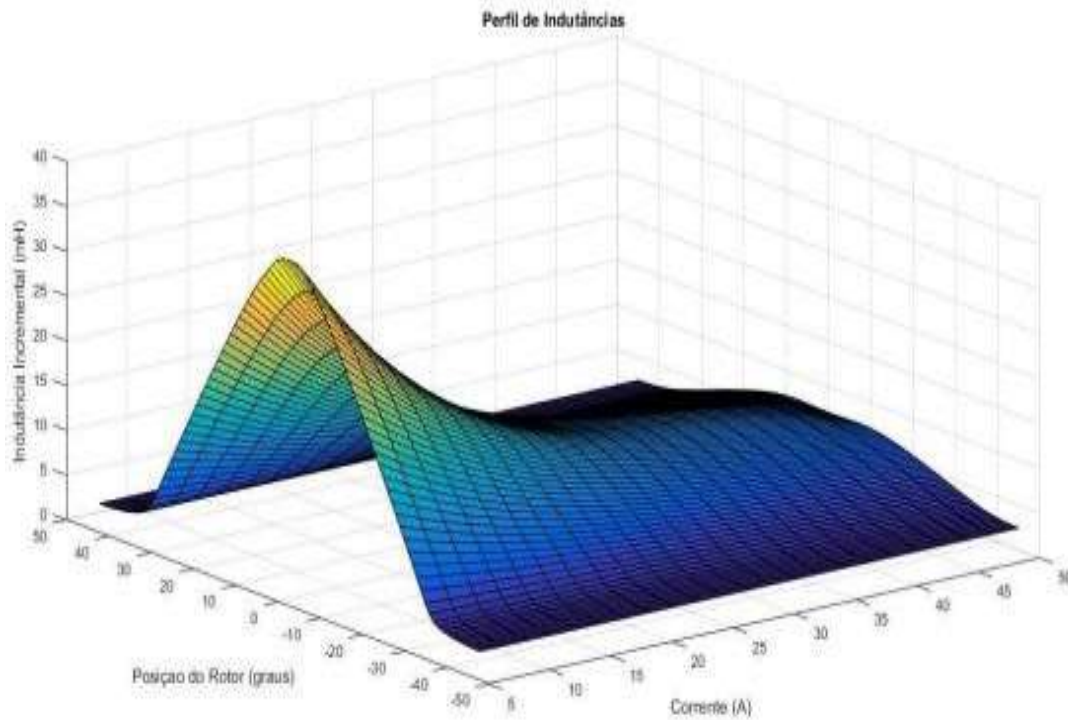


Figura 2.5 - Perfil da Indutância 3D [4]

Segundo Fitzgerald *et al.* [1], “Em um circuito magnético, composto de material magnético de permeabilidade constante ou que inclua um entreferro dominante, a relação entre λ e i será linear e poderemos definir a indutância L ”. Definindo que “ L ” tem função direta com a posição angular do rotor no domínio do tempo, obtém-se substituído (2.1) em (2.2):

$$V = R \cdot i + L \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + i \frac{\partial L}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2.3)$$

Considera-se que a velocidade angular (ω) é definida como a variação angular do rotor em ligação ao tempo $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)$, tem-se:

$$V = R \cdot i + L \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + i \cdot \omega \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (2.4)$$

Conforme $(R \cdot i)$ demonstra a queda de tensão no bobinado da máquina, $(L \cdot \frac{\partial i}{\partial t})$ é a queda de tensão provocada pela indução e $(i \cdot \omega \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta})$ considera-se a Força Contra Eletromotriz (FCEM), dependendo da velocidade angular, corrente e variação da indutância em relação à posição angular. [2]

Analisando a dinâmica de movimento pressupõe que o conjugado aplicado ao eixo será suficiente para equilibrar com o conjugado eletromagnético e demais características resistivas, por tanto tem-se;

$$T_m = T_{mag} + D\omega + j \frac{d\omega}{dt} \quad (2.5)$$

Em que:

- T_m Conjugado Mecânico
- T_{mag} Conjugado eletromagnético
- D Coeficiente de atrito viscoso
- ω Velocidade Angular
- j Momento de inércia

O modo de operação da MVR é determinado pela variação da indutância em relação à posição angular do rotor. Ou seja, no intervalo em que a variação da indutância em relação à posição do rotor for menor que zero $(\frac{\partial L}{\partial \theta} < 0)$, a máquina assume o comportamento de gerador. De modo contrário, onde o intervalo da variação da indutância em relação à posição do rotor for maior que zero $(\frac{\partial L}{\partial \theta} > 0)$, a máquina assume o comportamento de motor.

Com este comportamento, define-se a forma de trabalho da Máquina Relutância Variável, onde para que a máquina assuma o comportamento de motor aciona-se a chave do conversor no momento positivo da indução em relação à posição angular do eixo, do mesmo modo para gerador aciona-se a chave no momento negativo da indução em relação a posição angular. [9, 12, 13]

Um ponto relevante para o desempenho da MVR é a definição do ponto de disparo do sistema de excitação, que possui influência direta na operação e desempenho da máquina [9].

De uma forma simplificada pode-se deduzir a geração de conjugado da MVR, demonstrada a conversão de energia eletromagnética de um solenoide. [8] A solenoide possui uma composição bastante simplificada, consistido em um cabo condutor distribuído em voltas de N sobre um material ferro magnético percorrido por uma corrente elétrica i , com a circulação da corrente elétrica pelo condutor surge a presença de fluxo magnético [8], como demonstrado na figura 2.6, a corrente se torna proporcional ao fluxo magnético fazendo com que a armadura móvel se mova em direção a armadura fixa.

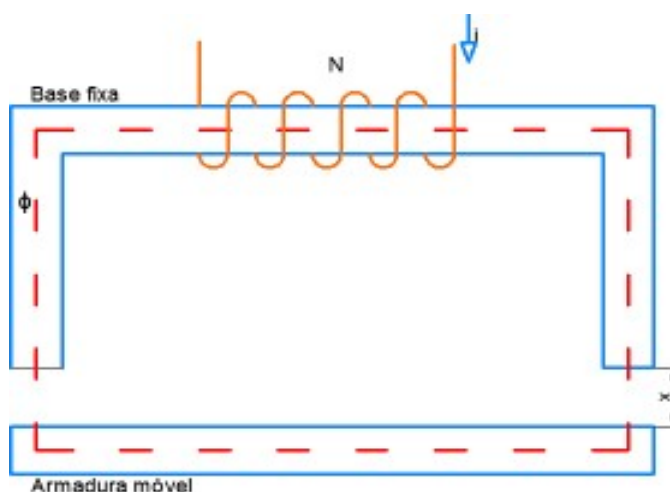


Figura 2.6 - Característica de solenoide [8]

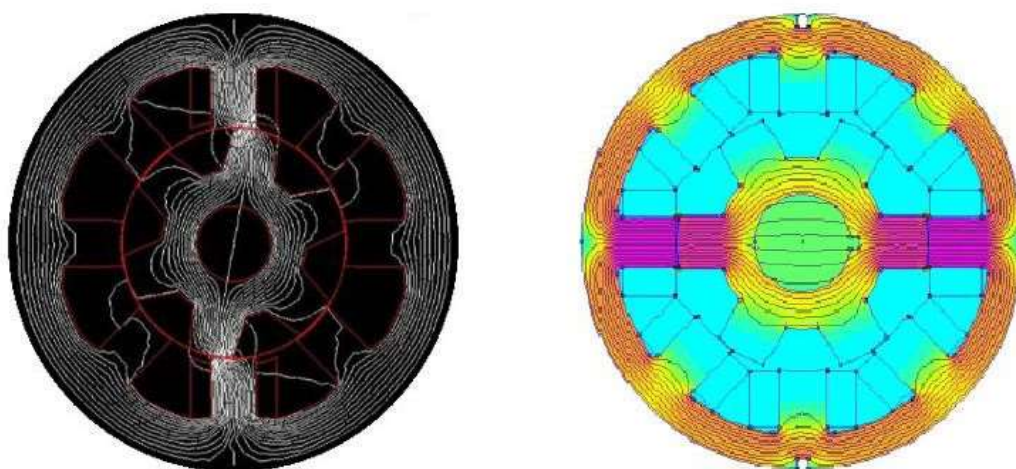


Figura 2.7 - Demonstração de fluxo magnético interno MVR [3]

Define-se de Relutância Magnética a resistência do material a passagem do fluxo magnético, na equação 2.6 é demonstrada a fórmula básica para seu cálculo:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (2.6)$$

Em que:

- $\mathcal{R}$ Relutância magnética
- l Comprimento do circuito
- μ Permeabilidade equivalente
- A Área da seção onde circula o fluxo

Esta equação é uma referência teórica simplificada, desconsiderado efeitos diversos como a dispersão no entreferro, saturação, magnética entre outros. Demonstra-se na equação 2.7 o comportamento inversamente proporcional da indutância em relação à relutância.

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \quad (2.7)$$

Em que:

- L Indutância
- N Número de espiras

Tendo em vista que a relutância magnética é alterada pelo ferro do conjugado, a modificação da posição do rotor altera a relutância equivalente do circuito, conforme a equação 2.7, causando um transitório na indutância de forma inversa, devido a esta variação denominar-se Máquina Relutância Variável [6, 10].

Para simplificar a abordagem assume-se que a equação 2.7 [6] com a seguinte definição:

“trata como grandeza corrigida quando aos efeitos de espalhamento de fluxo no entreferro, de dispersão, de empilhamento das lâminas, de saturação e outros, sendo assim uma referência teórica simplificada, isto é, uma idealização da máquina para posterior desenvolvimento”.

2.3 GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

A Máquina de Relutância Variável pode funcionar como gerador de energia elétrico, similar às outras máquinas elétricas, neste contexto a MRV tem a função de converter energia mecânico em energia elétrica denominado conversor eletromecânico. [4]

O processo de acionamento da MVR como gerador ocorre com a excitação da máquina no instante de diminuição do valor da indutância em relação à variação da posição, conforme mostra a figura 2.8 [5, 6, 8]

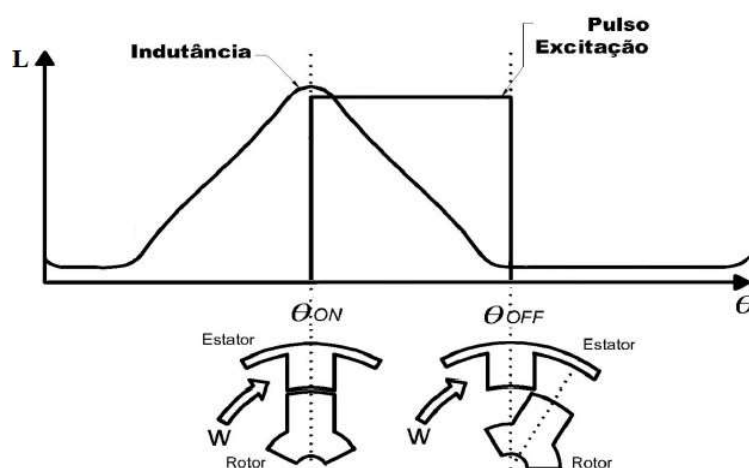


Figura 2.8 - Momento de Acionamento do Gerador a Relutância Variável

O momento de acionamento da chave de excitação é um aspecto crítico na operação da máquina, devido à necessidade de posicionar os pulsos dentro do perfil de indutância da fase, com influência efetiva sobre o rendimento e eficiência da máquina.

Quando ocorre a magnetização da fase, pode-se adicionar a sua entrada aoconjugado mecânico no eixo. O processo de geração divide-se em três etapas, sendo a primeira etapa inicial onde as duas chaves se encontram em posição zero, não permitido a passagem da corrente demonstrada na figura 2.9 (a), a segunda etapa consiste na excitação, onde ocorre o fechamento das chaves S1 e S2, permitido a passagem da tensão de

excitação pela bobina do estator conforme a figura 2.9 (b) e a terceira etapa denominada geração consistem na abertura das chaves retirando assim a tensão de excitação anteriormente inserida na bobina do estator, de forma que a corrente proveniente da conversão eletromecânica seja direcionada através dos diodos D1 e D2 [4, 12] conforme figura 2.9 (c).

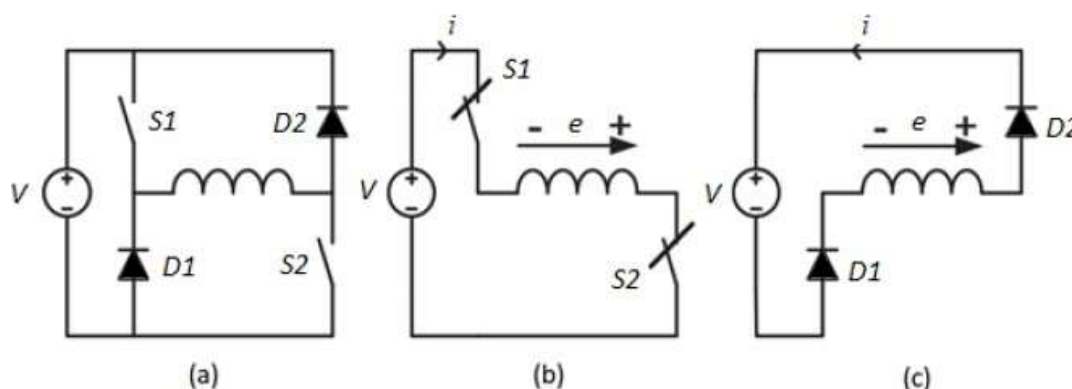


Figura 2.9 - (a) Etapa inicial, (b) Etapa de excitação, (c) Etapa de transferência de energia para a carga [6].

Existem inúmeras formas de excitar a MRV, com excitação independente que possui uma fonte de corrente contínua externa, fornecendo a corrente de excitação e as MRV auto excitado utilizando dispositivo acoplado a máquina, onde não necessitam de uma fonte de excitação externa quando o gerador se encontra em regime permanente[12].

Neste trabalho será abordado apenas a máquina com excitação externa conforme figura 2.10, demonstrando o desenho esquemático de um conversor de acionamento de uma das fases da MVR, o conversor *half-bridge*. Este conversor tem ótima aceitação em acionamentos de máquinas a relutância variável, sendo um dos mais utilizados [4, 5, 9, 10].

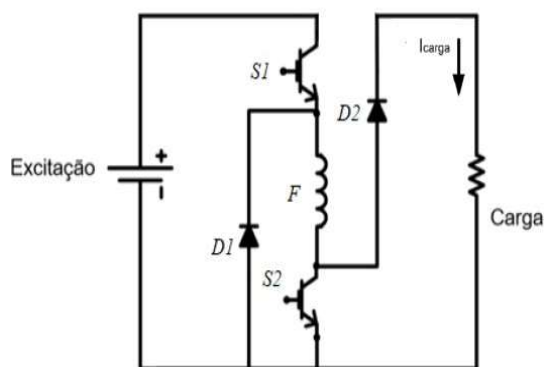


Figura 2.10 - Fase A conversor *half-bridge*

Conforme figura 2.11 observam-se os circuitos de magnetização e desmagnetização das fases da MRV operado com gerador.

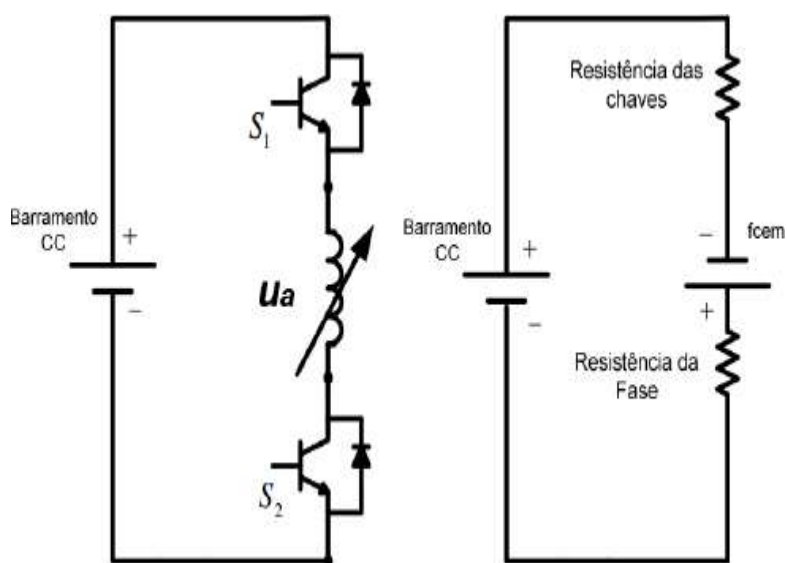


Figura 2.11 - Circuito equivalente momento de excitação [8]

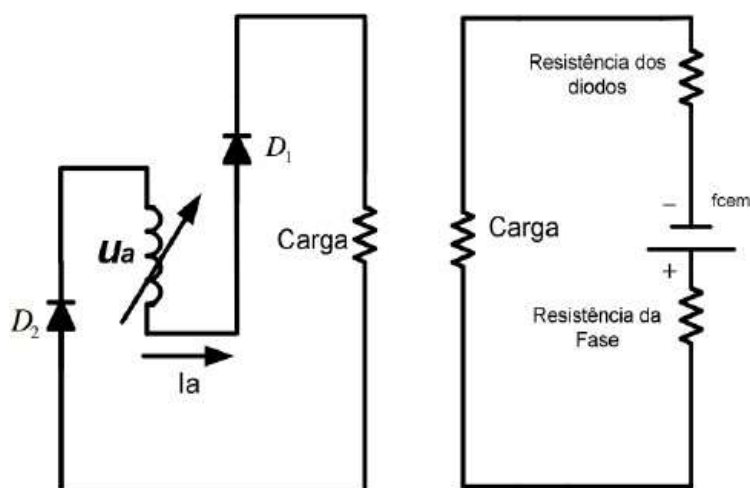


Figura 2.12 - Circuito equivalente momento de transferência de energia [8]

2.4 MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

O conjugado do rotor é produzido pela tendência do circuito magnético em busca do alinhamento, que durante a excitação de uma fase, apresenta uma mínima relutância e em seguida a máxima relutância [24].

Mediante este fenômeno o alinhamento das fases, o par de polos do estator magnetiza os polos do rotor mais próximo com a intenção de obter a menor relutância ou maior condução de fluxo magnético. Ao alternar o acionamento das fases provoca um movimento rotativo no eixo do motor [6].

Para que a máquina de relutância variável atue como motor, necessita que a energização das fases ocorra no momento em que a indutância magnética esteja em crescente em relação à variação da posição angular do rotor [6], conforme figura 2.13.

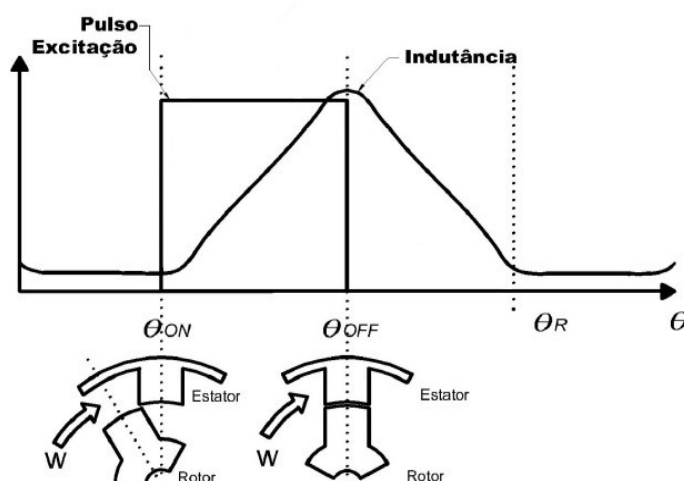


Figura 2.13 - Momento de Acionamento do Motor a Relutância Variável

O processo de motorização divide-se em duas etapas. Na etapa inicial ocorre a excitação, onde ocorre o fechamento das chaves S1 e S2, realizando a passagem da tensão de excitação pela bobina do estator conforme a figura 2.15 B, a segunda etapa denominada geração consiste na abertura das chaves retirando assim a tensão de excitação anteriormente inserida na bobina do estator, de forma que a corrente proveniente da conversão eletromecânica seja direcionada através dos diodos D1 e D2 [10, 16, 25], conforme demonstra a figura 2.14 C.

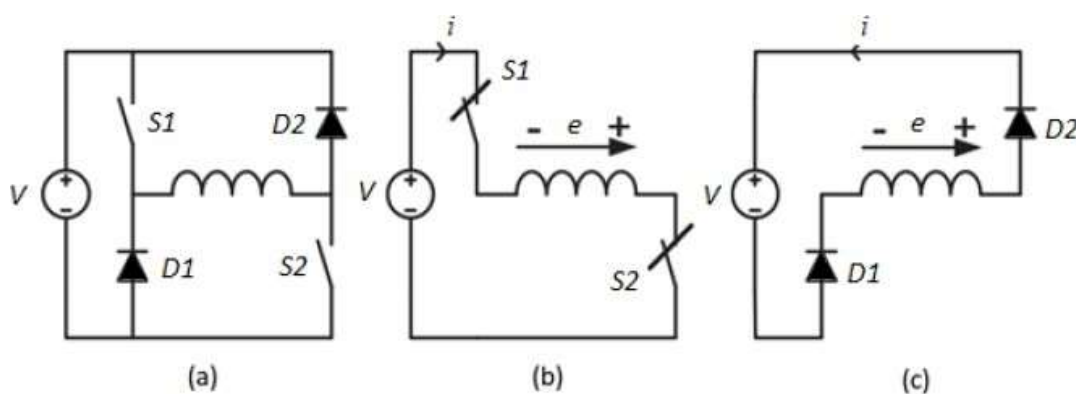


Figura 2.14 - (a) Etapa inicial, (b) Etapa de excitação, (c) Etapa de transferência de energia para a carga. [6]

2.5 APLICAÇÕES DOS GERADORES A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

Segundo [2], após a evolução dos componentes eletrônicos o gerador a relutância variável vem ganhando espaço nas pesquisas tendo em vista a forma construtiva e de

acionamento que permite utilizá-la em aplicações com velocidade variáveis que o torna comercialmente viável. Entre estas aplicações têm-se: energia eólica, que necessita de uma operação em baixa velocidade e em aplicações automotivas e aeroespaciais que necessitam de grandes velocidades de operação. Cada aplicação citada será detalhada neste capítulo.

2.5.1 Relutância Variável aplicada à Geração Eólica

Segundo dados da associação brasileira de energia eólica, atualmente o Brasil tem capacidade instalada de 18 GW de energia eólica gerando anualmente 55,9 TWh com cerca de 695 parques eólicos instalados com 9,7% de toda energia injetada no sistema interligado nacional (SIN) em 2019 mais de 8300 aerogeradores em operação presentes em 12 estados, com uma significância de 28,8 milhões de residências por mês podem ser abastecidas com este formato de energia renovável [7].

Nos sistemas de geração eólica constata-se maior utilização de máquinas de indução e síncronas [16], sendo estas máquinas podendo trabalhar com velocidades fixas ou variáveis utilizando ou não conversores eletrônicos de potência, para processamento de energia elétrica gerada. A máquina de relutância variável possui um papel importante neste conceito possuindo características para um bom desempenho com sistemas de geração eólica em micro redes ou sistemas isolados com cargas relativamente baixas.

O Gerador de Relutância Variável (GRV) possui características de robustez mecânica, com alto torque de partida, alta eficiência e baixo custo [4, 16], podendo operar em um range maior que as máquinas de indução e síncrona. A figura 2.15, é demonstrada a evolução e perspectiva de evolução até 2024 demonstrando um cenário promissor.

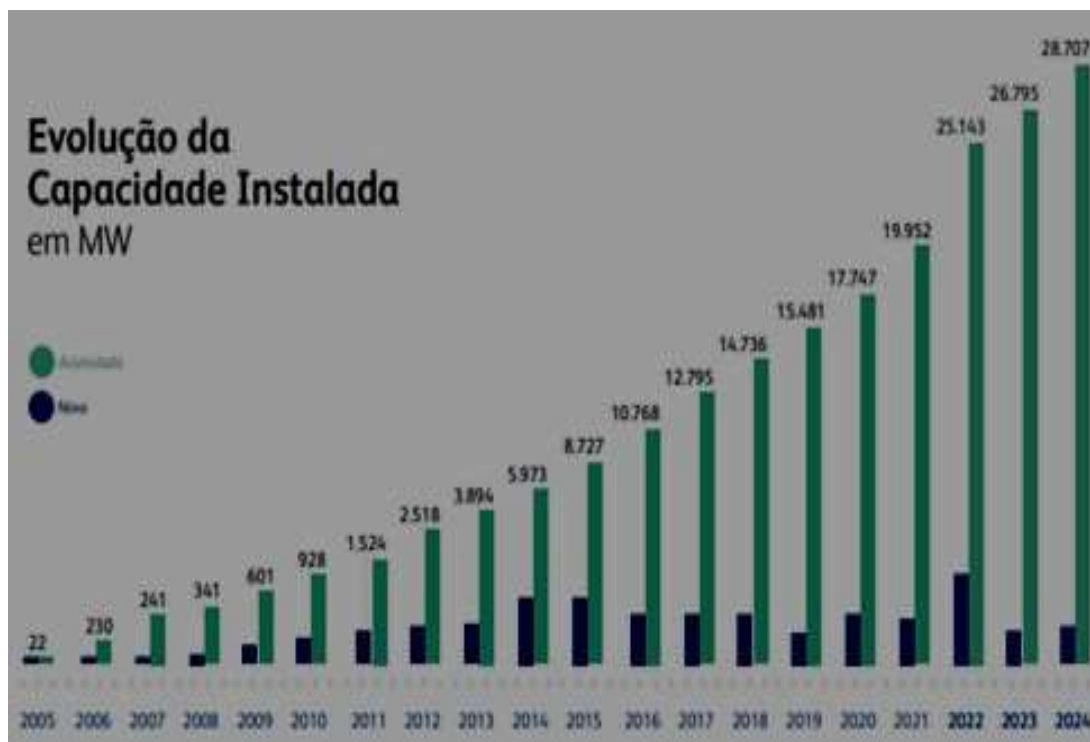


Figura 2.15 - Evolução da Capacidade de Energia Eólica instalada [7]

2.5.2 Aplicação Aeronáutica e Espacial

A força aérea americana divulga estudos referente a utilização das máquinas de relutâncias variáveis em projetos aeronáuticos [2], com a criação do programa *More Electric Aircraft* (MEA) cujo objetivo é de estimular o estudo e o desenvolvimento de trabalhos com máquinas, operando como Geradores e Motores a Relutância. [2, 8, 17]

A forma construtiva da MVR que a torna atrativa a esta aplicação, por não possuir imã permanente ou rotor bobinado, diminuído assim o peso do equipamento e a não existindo a possibilidade de desligamento da excitação que consiste em um problema inerente em outros modelos de máquinas, [2, 6, 8, 18]

Segundo [2], os estudos sobre as instalações futuras onde a MVR seria acoplada ao eixo da turbina sendo esta fonte de torque, proporcionado assim uma geração a partir do movimento da turbina a partir da queima do combustível, permitindo que as aeronaves tenham mais independência energética, analisando a possibilidade de armazenamento de energia gerada em baterias, para utilizar em sistemas elétricos dos aviões.

2.5.3 Aplicações Automotivas

Atualmente, existe uma crescente preocupação com aspectos ambientais tem tornado realidade os veículos de passeio movido à energia elétrica, podendo ser parcialmente, denominados híbridos que utilizam motor a combustão e motor elétricos, ou puramente elétricos movidos à bateria ou pilhas combustíveis. [2, 8, 11, 12]

Uma alternativa para a evolução constante do sistema elétricos em carros seria a geração de energia a por meio do torque desenvolvido pelas rodas a máquina de relutância variável com a capacidade de velocidade variável o que se torna uma opção interessante, possibilitando distribuir alimentação para componentes eletrônicos além de recarga da bateria. [2]

Segundo [8, 2], o sistema híbrido, elétrico e combustíveis fósseis se destacam como nova tecnologia possibilitando a redução do consumo de combustível. A MVR atuando como gerador surge como alternativa factível interligando motor de partida e alternador, possibilitando a recarga da bateria.

2.6 ENCODER

O Encoder tradutor de posição, um sensor eletromecânico que reproduz pulsos elétricos nos pinos de saída a partir do movimento de rotação de seu eixo. Nos quais são utilizados para definir velocidade, taxa de aceleração, distância, rotação, posição, direção entre outras finalidades [13,14]. Por isso possuem uma gama de aplicações dentro do setor industrial como, por exemplo:

- Máquinas CNC para medição do posicionamento linear dos eixos X-Y-Z;
- Medição de rotação;
- Medição de posicionamento angular;
- Medição de volume ou vazão de produtos líquidos;
- Medição de velocidade linear;
- Contâmetros;

O encoder possui um disco (encoder rotativo) formado por aberturas radiais transparentes e opacas alternadas, com uma luz infravermelha instalada perpendicular ao disco com a fusão de projetar a passagem de luz na abertura transparente no qual o receptor

ao receber o sinal luminoso o transforma em pulso elétrico. A figura 2.16, descreve de forma resumida o princípio de funcionamento baseado no circuito elétrico [14].

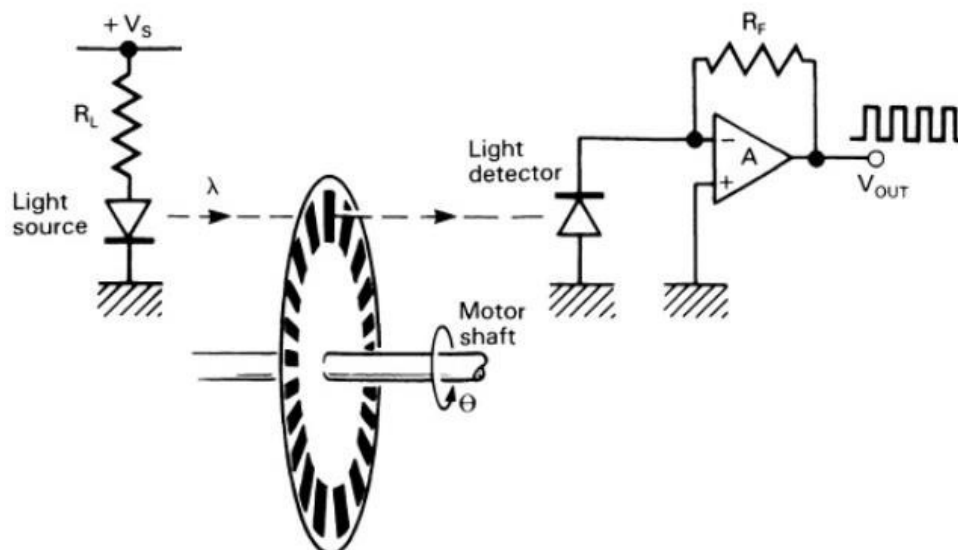


Figura 2.16 - Funcionamento encoder rotativo [14]

Os dois formatos de encoder mais utilizados são o absoluto e incremental, onde o encoder absoluto possui uma alta tecnologia, trabalhando com detalhamento em nível de bit's indicando a posição real do eixo com a função de retentor de posição, ou seja, caso ocorra uma queda de energia a posição não é perdida, podendo assim voltar do mesmo ponto antes do ocorrido, e considera o encoder incremental como menos tecnológico, não possuindo a função de retenção de posição, em caso de queda de energia existe a necessidade de retornar a posição de origem para reiniciar o ciclo, no entanto apresenta boa aceitação no mercado devido custo. [15] Tendo em vista a complexidade no acionamento da MVR sendo a posição um fator crucial do para o desempenho e funcionamento adotou-se o encoder absoluto como padrão.

2.6.1 Encoder absoluto

Encoders absolutos caracterizam por definir a posição do disco pela leitura de um código, único para cada posição. Neste contexto, em possíveis quedas de energia a posição rotórica do eixo não é perdida.

O código binário se torna bastante empregado na definição de posição do encoder absoluto, devido a sua manipulação simples evitando a necessidade de conversão para obter-se a posição real do eixo. O código binário é extraído diretamente do disco que se encontra em rotação. [14]

O encoder adotado para acionamento da máquina MVR possui um código binário no formato “código Gray”, devido a sua particularidade de mudar apenas um bit na comutação de um número para outro, conforme demonstrado na tabela 3.4, com comparação ao código binário convencional.

<u>Decimal</u>	<u>Binário</u>	<u>Gray</u>
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

Tabela 2.2 - Tabela de conversão código Binário código Gray [15]

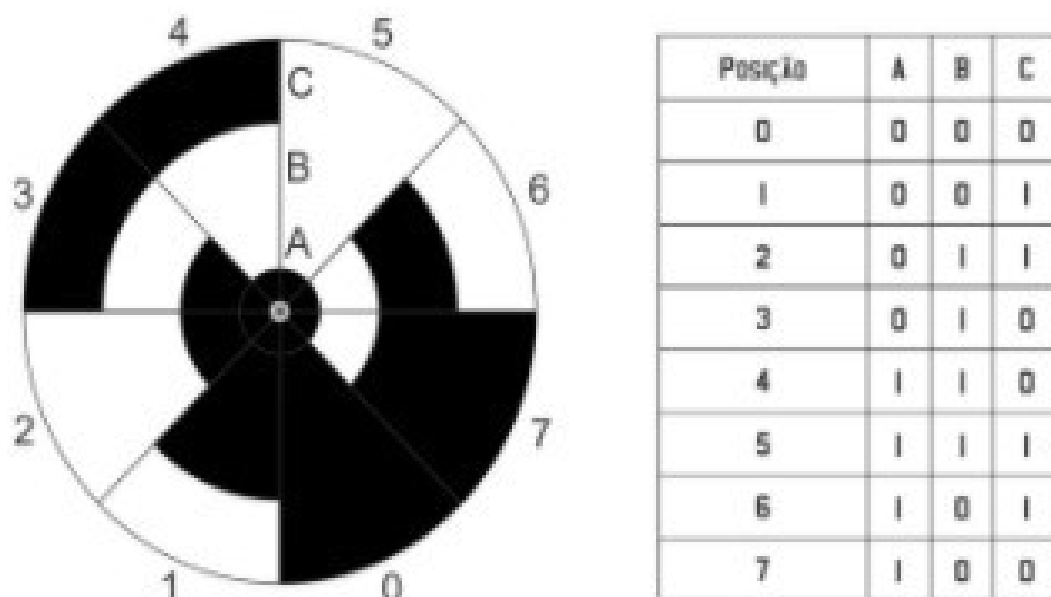


Figura 2.17 - Posição rotórica do encoder [15]

A figura 2.17 define a forma de leitura do disco código binário gray, onde A, B e C são os sensores responsáveis pelo envio de sinal e as posições do eixo e dado pelos valores de 0 a 7. Desta forma é possível entender a construção do encoder absoluto a construção do disco e os sinais elétricos, conforme é detalhado na figura MVR [15]

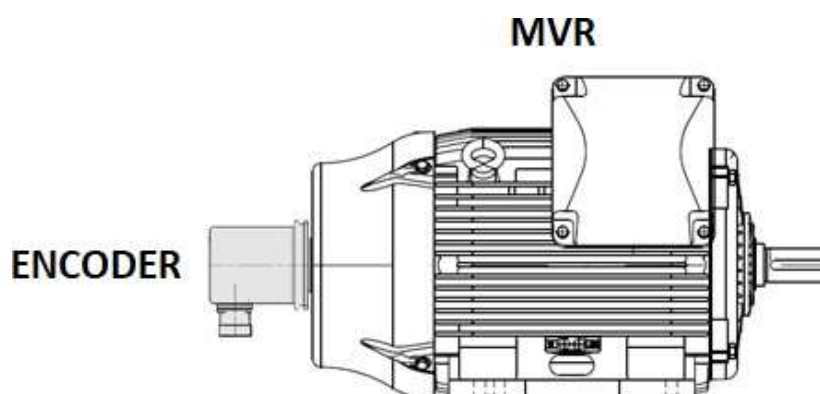


Figura 2.18 - Local de interligação do encoder com a MVR [15]

CAPÍTULO 3

MODELAGEM MATEMÁTICA

Este capítulo apresenta a modelagem matemática, com intuito de descrever os fenômenos e comportamentos em equações, fundamentalmente os objetivos são: deduzir os fenômenos baseados em suas leis existentes descrevendo matematicamente, e estabelecer uma base que possa prever seus comportamentos futuros baseados em seus estados anteriores [6].

A Máquina a Relutância Variável é uma máquina comparativamente simples, entre os diversos modelos existentes [9]. Seu modelo matemático representa equações elétricas e mecânicas, indutâncias incrementais, fluxo, perfil de indutância, co-energia e conjugado. Para o presente trabalho, será abordada a modelagem para um gerador 6/4, (6 polos no estator e 4 no rotor), abordando os aspectos não lineares do circuito magnético de malha aberta, as equações de estados para o circuito elétrico e mecânicos obtidas serão utilizadas posteriormente para a realização das simulações.

3.2 - EQUAÇÕES ELÉTRICA E MECÂNICA

De acordo [4], deve se demonstrar circuito de uma fase da MRV de forma simples conforme é apresentado na figura 2.19.

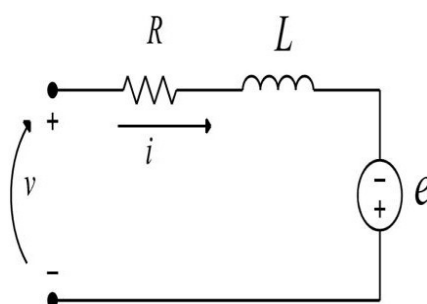


Figura 2.19 - Circuito Elétrico referente a uma fase MRV [1]

A equação 3.1 para a tensão em uma das fases pode ser dada por:

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

Sendo:

v - Tensão aplicada.

i - Corrente da fase.

R - Resistência da fase.

λ - Fluxo magnético dependente da corrente e posição rotórica.

θ - Posição do rotor em relação ao estator.

t - Tempo.

A equação da tensão na fase pode ser escrita:

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

Onde o termo “e” é a força eletromotriz, que isolada pode ser escrita como:

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

No qual, $\omega = d\theta/dt$ velocidade angular do rotor.

Realizando uma análise dinâmica do movimento do Gerador, pode ser obtida a equação mecânica da máquina. Para que exista trabalho realizado o conjugado mecânico da máquina primária deve fornecer torque mecânico (T_m) com capacidade de equilibrar o conjugado eletromagnético resistente, tem que ser capaz de vencer a inércia rotacional nas variações de velocidade, vencer o atrito dos mancais de fixação do rotor, o conjugado da carga diretamente. [4, 6, 8] A equação do conjugado do MRV é expressa por:

$$T_m = T_{emag} + D\omega + J\frac{d\omega}{dt} \quad (3.4)$$

Em que:

- T_m - Conjugado mecânico no eixo;
- T_{emag} - Conjugado de carga;
- D - Coeficiente de atrito viscoso;
- ω - Velocidade Angular;
- J - Momento de Inércia;

Fazendo uma análise sobre a saturação do material ferromagnético, pode-se encontrar uma equação para o conjugado eletromagnético por isso é demonstrado na figura 2.20 à curva de saturação do material ferromagnético para determinada posição (θ) do rotor.

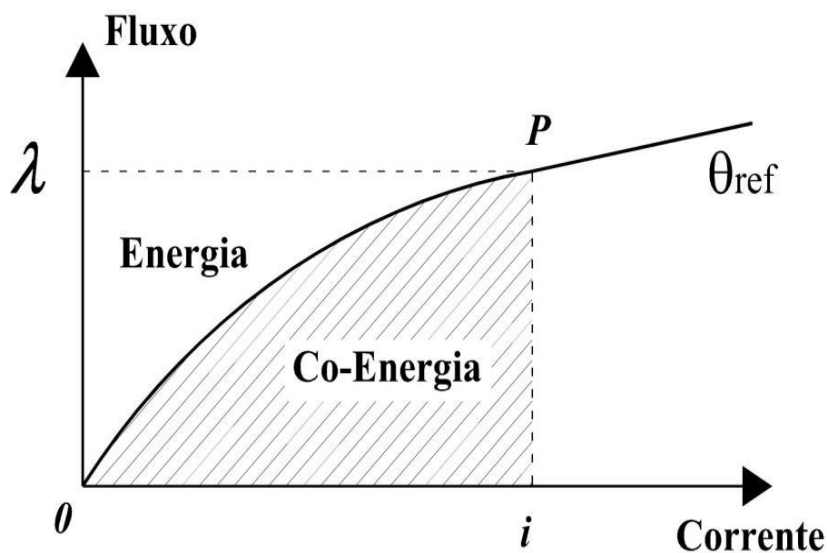


Figura 2.20 - Curva de Magnetização Típica Para Uma Fase do Motor a Relutância Variável [1]

A co-energia W^{co} para uma fase e para uma determinada posição θ do rotor, pode ser evidenciada por:

$$W^{co}(i, \theta) = \int_0^i \lambda(i, \theta) di \quad (3.5)$$

Baseando-se na equação 3.5 se aplica a cada fase da máquina, a co-energia instantânea do Gerador a Relutância Variável será dada por:

$$W^{co} = W_1^{co} + W_2^{co} + \dots + W_n^{co} \quad (3.6)$$

Ou, explicitamente, por:

$$W^{co}(i, \theta) = \sum_{k=1}^n W_k^{co}(i, \theta) \quad (3.7)$$

Segundo [4, 6], o conjugado eletromecânico é dado pela equação.

$$T_{emag} = \frac{\partial W^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (3.8)$$

Expandindo à equação 3.7, obtêm-se:

$$T_{emag} = \frac{\partial W_1^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial W_2^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} + \dots + \frac{\partial W_n^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (3.9)$$

Executando a substituição da equação 3.9 na equação 3.4, tem-se:

$$T_m = \left(\frac{\partial W_1^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial W_2^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} + \dots + \frac{\partial W_n^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} \right) + D\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.10)$$

De acordo com as equações acima demonstradas, mostra o comportamento elétrico e mecânico do Gerador a Relutância Variável e podendo ser rearranjadas e reescritas na forma matricial, considerando-se uma máquina de três fases, conforme mostrado na equação 3.11, o que facilita o emprego de métodos numéricos para solução, onde o valor inferior a 1% do efeito da indutância mutua não foi contemplada nesta definição. [4, 6]

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ T_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 & 0 \\ r_1 & r_2 & r_3 & D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a(i, \theta) & 0 & 0 & 0 & i_a \frac{\partial L_a(i, \theta)}{\partial \theta} \\ 0 & L_b(i, \theta) & 0 & 0 & i_b \frac{\partial L_b(i, \theta)}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & L_c(i, \theta) & 0 & i_c \frac{\partial L_c(i, \theta)}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Onde:

$$r_1 = \frac{1}{2} i_a \frac{\partial L_a(i, \theta)}{\partial \theta} \quad r_2 = \frac{1}{2} i_b \frac{\partial L_b(i, \theta)}{\partial \theta} \quad r_3 = \frac{1}{2} i_c \frac{\partial L_c(i, \theta)}{\partial \theta}$$

Caracterizado por $[V], [R], [I], [L]$, e $[\dot{I}]$ as matrizes na ordem que aparecem na equação 3.11, obtém-se:

$$[V] = [R][I] - [L] [\dot{I}] \quad (3.12)$$

Da equação 3.12 é possível progredir a equação de estados da máquina isolando-se a matriz $[\dot{I}]$ de modo a atingir:

$$[\dot{I}] = [L]^{-1}[V] - [L]^{-1}[R][I] \quad (3.13)$$

Esta equação de estados descreve completamente o estado de cada fase da máquina a qualquer ponto. Os valores de resistências e das indutâncias das fases que formam os elementos da matriz $[R]$ e $[L]$ são determinados por características construtivas

da máquina. [4, 6]

CAPÍTULO 4

PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO

As ferramentas de simulação computacionais facilitam o estudo e o desenvolvimento de projetos reduzindo custos com elaborações de máquinas elétricas [9], auxiliando projetistas engenheiros e usuários a entender o comportamento de determinado sistema sem que ocorra a necessidade de possuir o sistema físico [4]. E na literatura especializada encontram-se trabalhos sobre as simulações de MVR em vários estágios de desenvolvimento, com exemplo foi percorrido nos capítulos anteriores.

Em [7], desenvolveu-se uma simulação de um MVR 6x4 operado como motor alterado as cargas dos equipamentos e comparado com uma bancada de teste física, simulado com tensão de alimentação em 50 V, e um conjugado de 2.0 N.m com o propósito de controle da velocidade do motor a relutância variável alterado o ângulo de desmagnetização atuando nas chaves do conversor.

Em [5], desenvolveu-se uma simulação de uma MVR 8x6 operador como gerador em malha aberta e comparando resultados com bancada de teste desenvolvida. Onde utilizando uma tensão de excitação de 30 V com uma largura de pulso de 15 graus, foi definido pela simulação o comparativo dos cálculos realizados no capítulo 3 apresentado em seu trabalho e confirmado pela simulação no capítulo 4.

Em [9], desenvolveu uma simulação de duas máquinas MVR uma trifásica 6x4 e outra monofásicas 6 x 6 na configuração de motor, mantendo a tensão do barramento de alimentação em 100 VCC, atingiu uma velocidade satisfatória em ambas as máquinas tendo a máquina trifásica uma menor variação na velocidade desejada e a máquina trifásica com maior velocidade desenvolvida no eixo.

As simulações apresentadas neste trabalho foram realizadas em ambiente Matlab Simulink. O principal objetivo foi de simular uma MVR de 5,0 kw não linear, e no capítulo 03 apresentar a modelagem matemática para desenvolvimento da simulação, e a mesma consiste na operação da MVR como gerador com duas formas de controles de tensão distintas, comparando os resultados e aplicabilidade.

4.2 ELEMENTOS DO PROCESSO DE CONVERSÃO ELETROMECCÂNICA

O processo de ensaio e simulação da MVR, em conjunto com seu controle em tornar-se complexo e confuso, pois, se faz necessário executar simulações distintas. A figura 2.21 demonstra um diagrama de bloco do processo de geração proposto no intuito de facilitar o entendimento do trabalho.

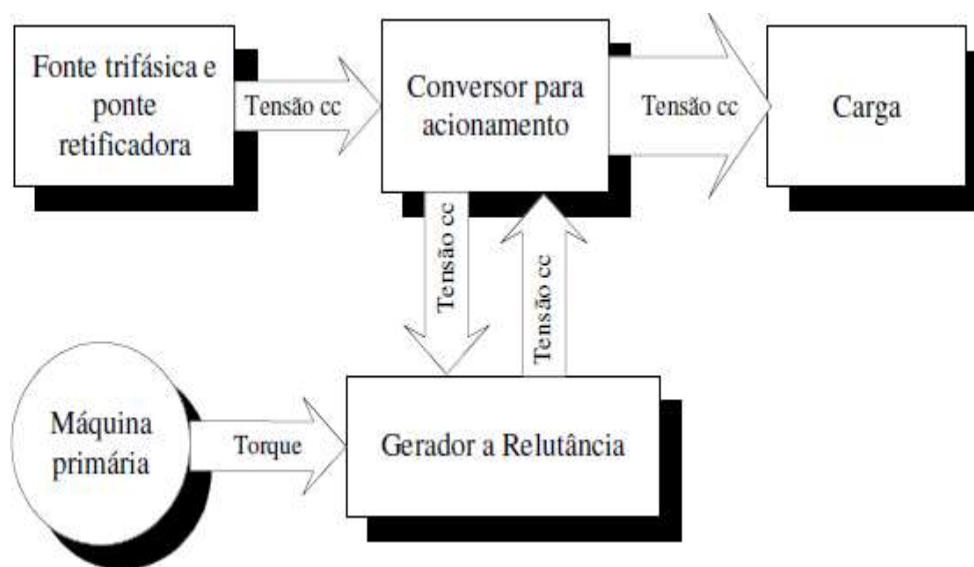


Figura 2.21 - Diagrama de Simulação Computacional [6]

De acordo com a figura 2.21, o centro do processo de excitação será o conversor para acionamento, e através dele ocorre a integração do GRV com a carga e fonte de excitação. Devido a esta alta importância no processo se torna fundamental a seleção de um modelo eficiente. Existe inúmeras topologias estudadas buscando uma performance eficiente do conversor [15, 16, 17, 18] neste trabalho foi adotado o conversor *half-bridge* (HB), este modelo de conversor por ser o mais utilizado devido às suas características operacionais. [4, 9]

A fonte trifásica tem a função de converter a tensão alternada para contínua, fornecendo a tensão de excitação do GRV acionada pelo conversor nos pontos necessários, estão tensão e projetadas conforme necessidade da máquina e das cargas, podendo ser alterada conforme simulação.

Máquina primária tem a função de fornecer conjugado, se tornado a fonte mecânica no eixo da GRV, pode ser de várias formas de energia (eólica, hidráulica, turbina a vapor etc.), para fim de experiência e teste de rendimento comumente feito por um motor

de indução acionado por inversor de frequência possibilitando alterar a velocidade. [4, 5, 7, 8]

A carga tem a função de simulação de trabalho da máquina, podendo ser simulado várias cargas distintas em momentos distintos do funcionamento, facilitando o entendimento do desempenho da GRV. [22]

O Gerador a Relutância refere-se ao comportamento dinâmico da MRV, operando como gerador sendo implementada na simulação utilizado a modelagem matemática desenvolvida no capítulo anterior.

4.3 MODELO DO GVR

A Máquina a Relutância Variável utilizada como protótipo de parâmetro para simulação possui potência nominal de 5 kw, e configuração interna de 6x4 detalhamento explorado em [4], e demonstrado na tabela 2.3, este protótipo fornece os parâmetros para a simulação. Trata-se de um protótipo bem elaborado que demonstra robustez e versatilidade, com projetos anteriores desenvolvidos no laboratório de acionamentos elétricos da UFU (Universidade Federal de Uberlândia).



Figura 2.22 - MVR 6/4 base da simulação [4]

Especificações	Dados	
Potência de Saída	5,0	kw
Atrito Viscoso	0,006	N.m.s
Indutância (Posição Alinhada)	0,07748	H
Indutância (Posição Desalinhada)	0,00262	H
Momento de Inércia	0,04806	kg.m ²
Resistência do Enrolamento Fase	0,5	Ω

Tabela 2.3 - Características mecânicas e elétricas principais da MVR [4]

4.4 CONVERSOR ELETRÔNICO DE POTÊNCIA

Conforme disposto no capítulo 2, o modo de acionamento definido para a simulação foi o conversor *half-bridge*, a figura 2.23 demonstra o esquema elétrico das três fases ligadas ao conversor, onde cada braço de acionamento do conversor é composto por um par de chaves e um par de diodos, portanto, para uma máquina de três fases o conversor possui três braços.

Mediante o teste dentre os conversores existentes no mercado, não existe definição padrão para a operação do GRV. No entanto, possui uma quantidade considerável de simulações e utilizações de HB devido as suas características operacionais. [4, 6, 8]

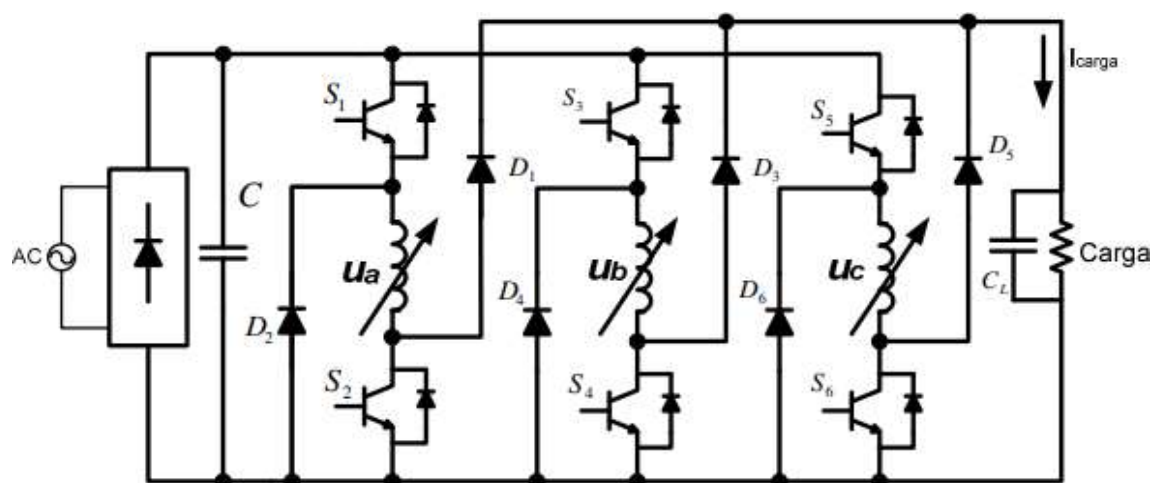


Figura 2.23 - Circuito do Conversor *Half-Brinde* (HB) [26]

4.5 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO

O modelo computacional desenvolvido permite simular a máquina a relutância variável como motor ou gerador, onde em ambos os casos possui a obrigatoriedade da leitura de posição instantânea da máquina, por meio do rotor.

Após a leitura de posição angular do rotor fisicamente feita pelo encoder, possibilita a geração de pulsos de disparo das fases da MRV, onde os pulsos são direcionados para chaves estáticas no conversor para acionamento [22].

Conforme apresentado no capítulo 2, quando realiza o acionamento no instante em que ocorre a indutância, é crescente e explorado com o movimento natural de tendência do rotor ao se alinhar junto com estator, fenômeno conhecido como indução magnética, o que resulta em um conjugado positivo no eixo, sendo disponível para realização de trabalho, ou seja, a MRV tem seu funcionamento como motor, conforme demonstrado na figura 2.24 [2, 7, 9, 10].

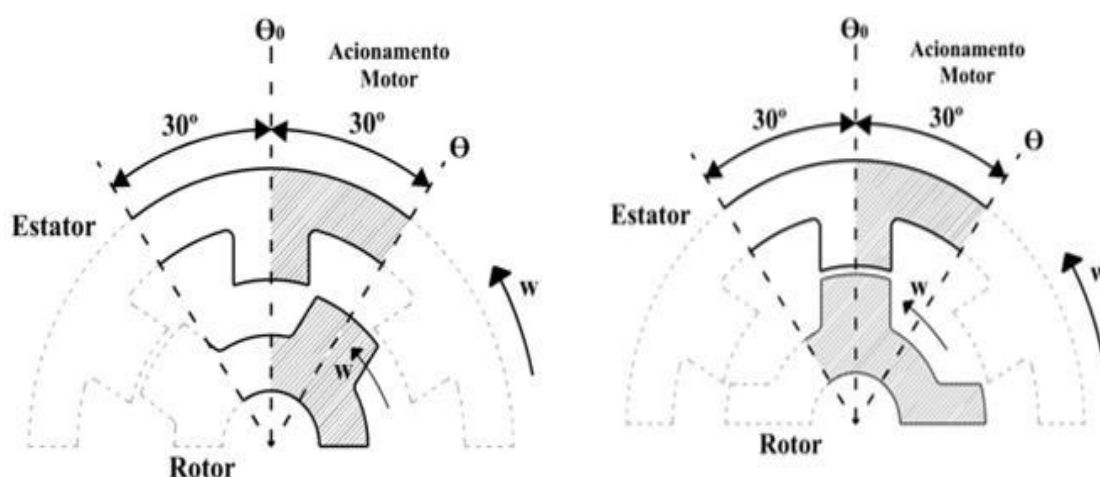


Figura 2.24 - Estado de Acionamento do MVR [7]

Caso o acionamento for realizado onde a indutância é decrescente, aproveita-se a força contra eletromotriz, ou seja, aproveita a energia armazenada no campo magnético do enrolamento das fases para geração de energia. A MRV, portanto, passa a trabalhar como gerador conforme demonstrado na figura 2.25. [2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10]

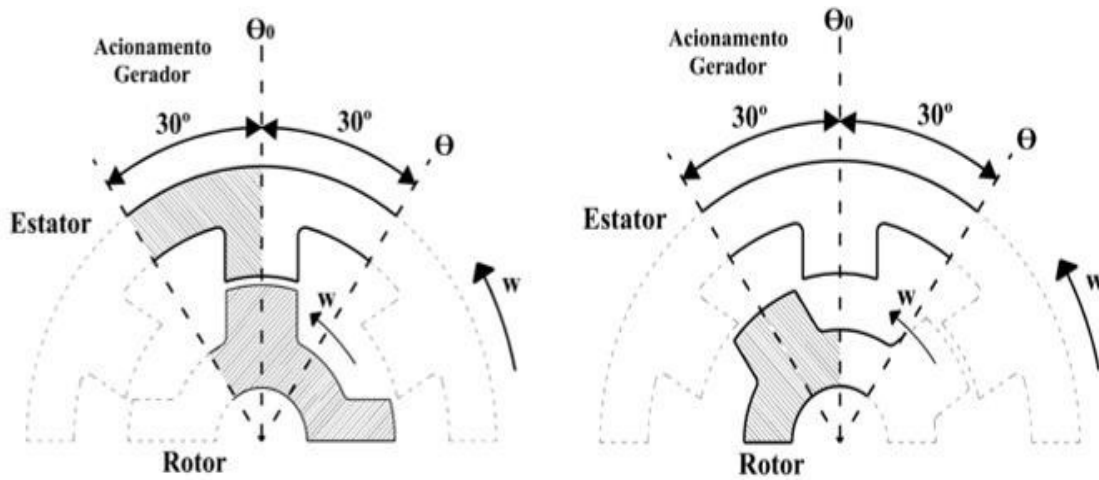


Figura 2.25 - Estada de Acionamento do GVR [7]

Neste trabalho almeja mostrar o funcionamento e controle da MVR trabalhando como gerador, neste contexto toda a simulação foi projetada para esse fim, trazendo duas formas distintas de controle de tensão aplicadas á cargas e velocidade variável no tempo simulando variações possíveis em processos.

4.6 LEITURA DE POSIÇÃO

Por ser apenas uma simulação e não existir a possibilidade da utilização de um encoder acoplado ao eixo da máquina para garantir a posição angular física do rotor, a aquisição da posição rotórica no modelo computacional, utiliza-se a equação que descreve o conjugado mecânico da MRV, sendo:

$$T_m = T_{emag} + D\omega + J\frac{d\omega}{dt} \quad (4.1)$$

Sabe-se que:

$$\omega = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (4.2)$$

Isolando e integrando $\left(\frac{d\omega}{dt}\right)$ obtêm:

$$\omega = \int \left(\frac{C_m - C_e - D\omega}{J} \right) dt \quad (4.3)$$

Integrando ω , resulta a equação para a posição retórica instantânea, sendo dado por:

$$\theta = \iint \left(\frac{T_m - T_{emag} - D\omega}{J} \right) dt \quad (4.4)$$

4.7 ALGORITMO DE ACIONAMENTO

Com a determinação da posição angular do rotor, define-se o momento de acionamento das fases, tendo como base o instante de geração citado anteriormente, ilustrado na figura 2.26, em que representa as posições nas as três fases (A, B, C) como o defasamento de 60 graus entre si demonstrando que a posição angular do rotor é reiniciada a cada 90 graus com saídas nomeadas de teta A, teta B, teta C. Onde estas saídas são direcionadas a uma comparação com os tetas reesponsáveis pelo acionamento definido como teta ON e teta OFF.

O algoritmo desenvolvido para geração dos pulsos de disparo é apresentado na figura 2.26.

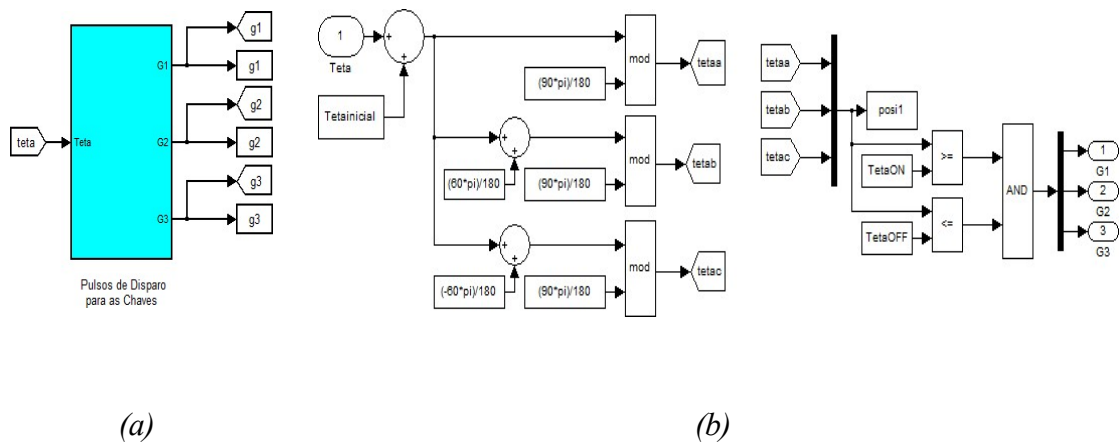


Figura 2.26 - (a) Bloco Geral da Geração dos Pulsos de Disparo das Chaves Estáticas, (b) Visão Explodida do Bloco de Geração dos Pulsos de Disparo.

Na figura 2.26 (a), corresponde ao bloco geral de acionamento a representação de uma entrada com posição rotórica (θ), tendo como saída os disparos do acionado dentro da

configuração máxima de acionamento para gerador, ou seja, sendo 30 graus referentes ao decrescimento da indutância, definido com pulsos de disparo das chaves estáticas (G2, G2, G3), sendo os responsáveis pelo acionamento da máquina. Na figura 2.27 (b) é apresentada a lógica desenvolvida dentro do bloco, onde se desenvolve o ponto de repetição do ciclo das fases, iniciando as fases a cada 90 graus decorridos, o que corresponde à posição polar do rotor, ou seja, a cada 90° a condição magnética do gerador se repete [21] na figura 2.27, é possível verificar os acionamentos pulsos das fases (G1, G2, G3) em relação à posição angular do rotor.

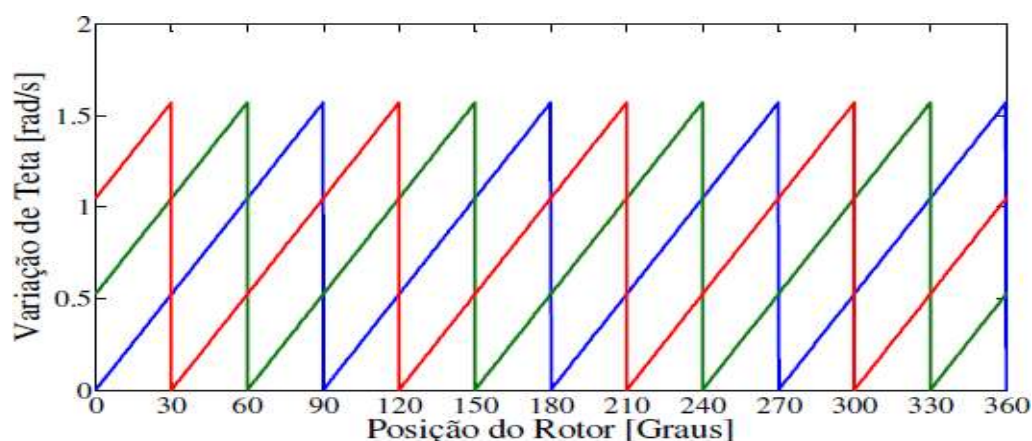


Figura 2.27 - Variação de teta em rad/s [4]

Na figura 2.28 demonstra o acionamento da fase A em relação à indutância e o ponto de gatilho de excitação do circuito disparado pelo conversor. Ressaltando que a operação da MVR com gerador ocorre na região de decrescimento da indutância, no caso de uma máquina 6/4 este instante ocorre após os 30 graus da fase, tendo em vista que o intuito do trabalho e o controle da tensão máquina alterando a posição do comando fornecendo comando válido em “1” (um) e retornando para comando “0”(zero), para analisar o comportamento.

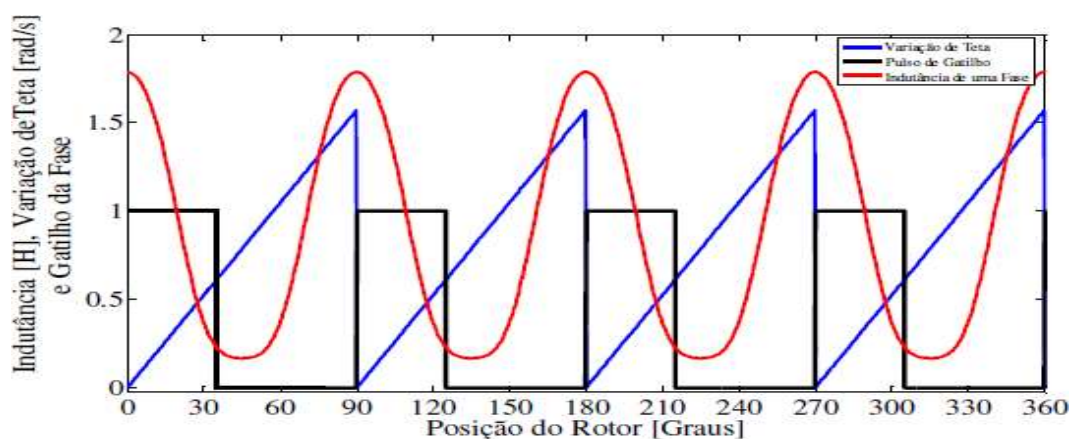


Figura 2.28 - Variação de indutância, variação de teta e ponto de acionamento [4]

4.8 CONVERSOR DE POTÊNCIA

De posse dos pulsos de disparo das chaves estáticas, parte-se para o sistema de acionamento da máquina o ponto central o conversor de acionamento. O conversor escolhido para ser desenvolvido no presente trabalho foi o conversor em ponte assimétrica *Half-Bridge* (HB), cujo diagrama de blocos desenvolvido no SIMULINK MATLAB é apresentado na figura 2.29.

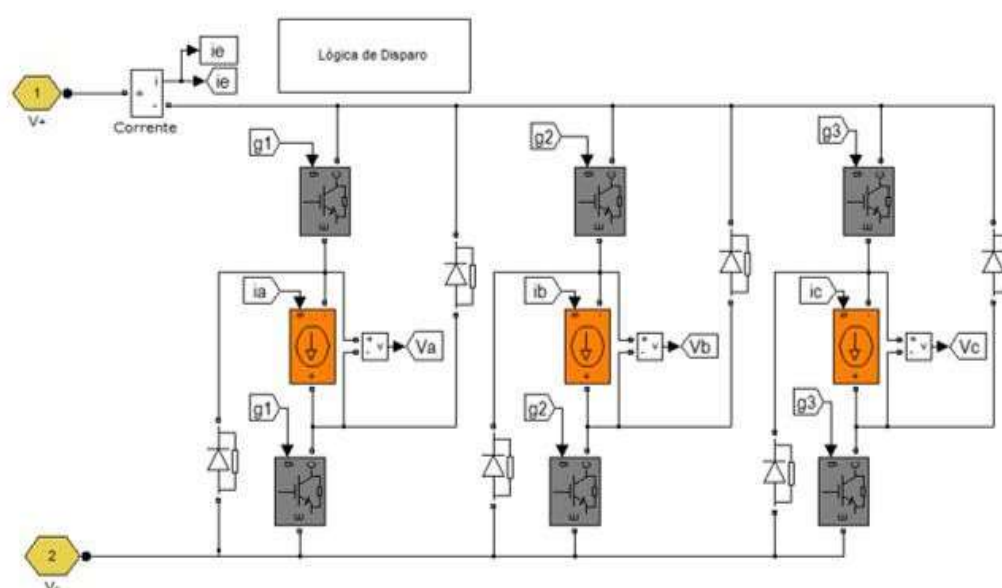


Figura 2.29 - Esquema de bloco *half bridge* (HB)

De acordo com o diagrama de bloco desenvolvido apresenta o circuito elétrico de um conversor HB, são utilizados medidores de tensão para analisar os níveis nas fases denominam **Va**, **Vb**, **Vc**, que conforme demonstrado no capítulo anterior são os dados de

entrada das matrizes. Os sinais de disparo das fases são os sinais G1, G2, G3 vindos das chaves de disparo, responsáveis pelos ângulos de disparos em relação a posição angular.

A simulação consiste em dois subsistemas, a representação do conversor por diagrama de bloco conforme figura 2.29, e a matriz de estados tendo com entradas as tensões de fase, perfil de indutância construtivas da MVR e conjugado, e como saídas as correntes de fases, indutância de fase, conjugado eletromagnético e mecânico e posição do rotor, programada em linhas de código através da função **Function_GRV** demonstrada na figura 2.30, que soluciona as equações de estado da máquina utilizando integração numérica através de função do *MATLAB*. A solução é realizada no domínio do tempo de forma iterativa, as variáveis são realimentadas a cada ciclo.

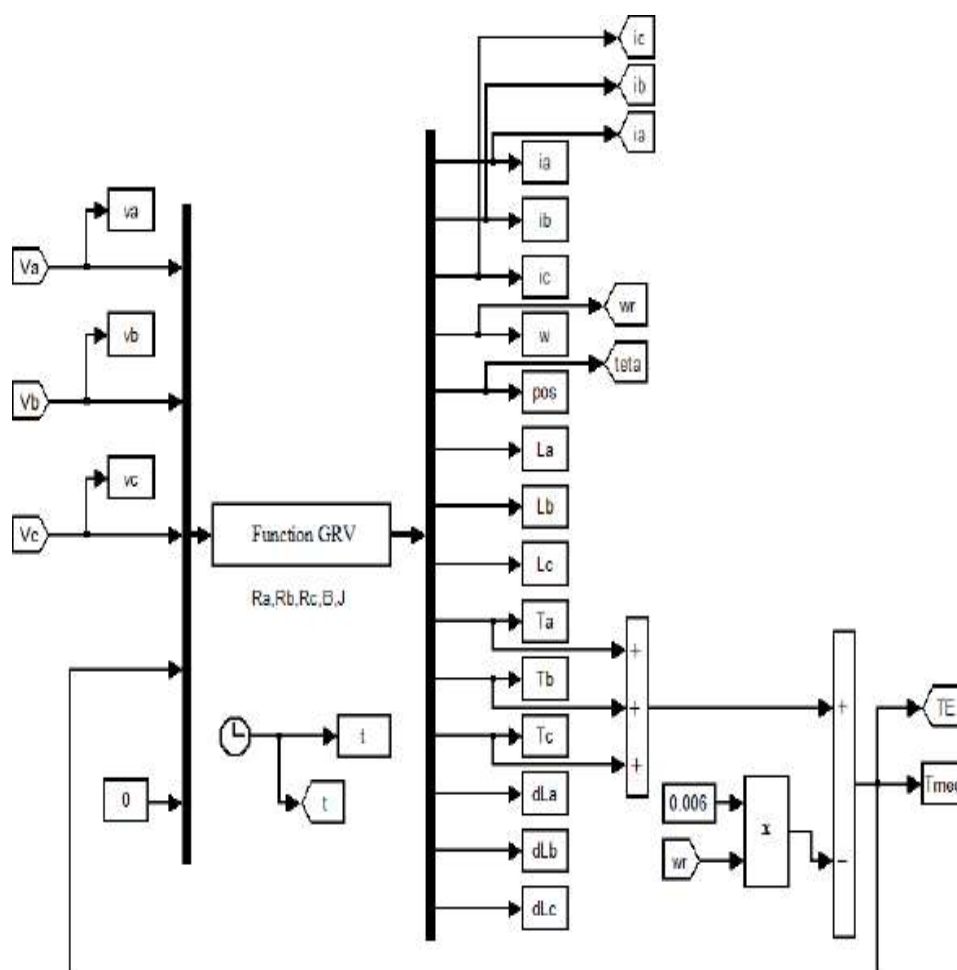


Figura 2.30 - Programada em Linhas de Código Através da Função **Function_GRV**

4.9 MODELO COMPUTACIONAL

O modelo computacional para acionamento da MRV em malha aberta é apresentado na figura 2.31, compreendido em um bloco representando o Gerador a Relutância Variável onde todas as equações diferenciais da MRV são resolvidas conforme capítulo anterior e o outro bloco com o conversor de potência e a lógica de disparo das chaves estáticas.

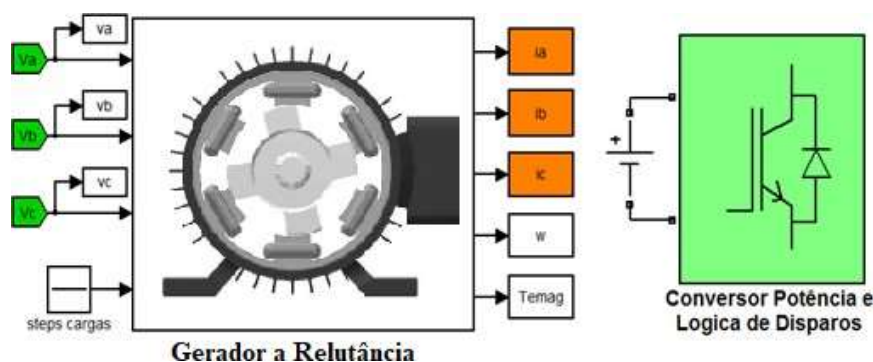


Figura 2.31 - Modelo computacional para acionamento da MVR

4.10 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO INICIAL

Com intuito de simular uma máquina de relutância variável 6/4 em conjunto com gerador e utilizando as equações efetuadas anteriormente, os testes no sistema projetado para simulação.

Baseado na máquina exibida no início da programação a primeira simulação foi realizada a uma velocidade 1500 rpm, com uma fonte de excitação externa de 50 VCC e para simular as cargas um conjunto de resistência de 40 ohms, o passo de tempo utilizado de 1e-5, máquina simulada em malha aberta onde o figura 2.32, indica a tensão na carga durante o transitório inicial de partida da máquina e em regime permanente mante um valor de 139,4 VCC, com estabilização da tensão após 0,6 segundos, conforme demonstrado no figura 2.33.

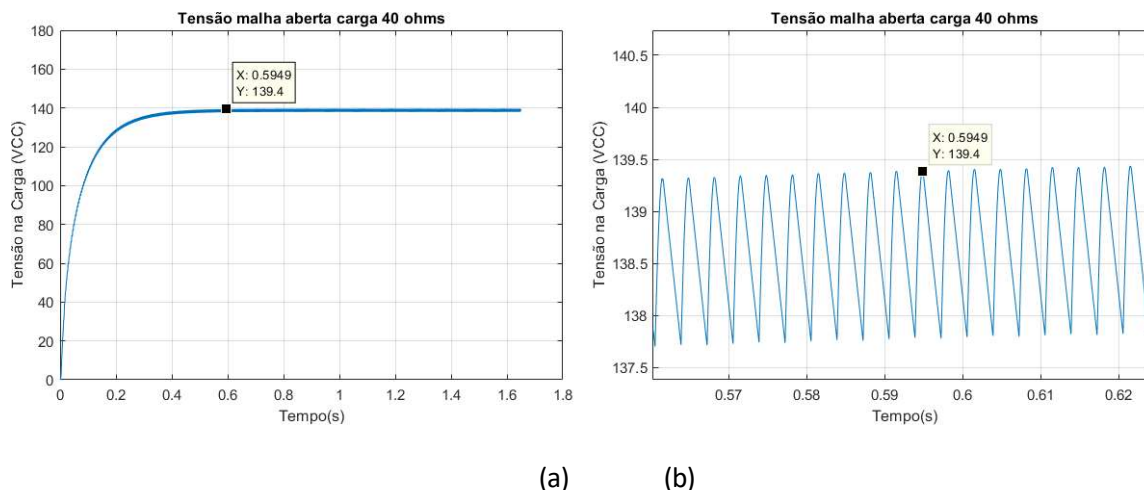


Figura 2.32 - Simulação do valor de tensão GRV malha aberta

Observa-se na figura 2.33 (a), corrente media na carga, onde encontra seu ponto de regime permanente após os 0,6 segundos, estabilizado em 3,5A constante. Com ampliação da curva demonstrado na figura 2.33 (b), constatado que existe uma variação referente ao chaveamento do conversor de potência, variação está que está na casa de 3,449 A à 3,488 A.

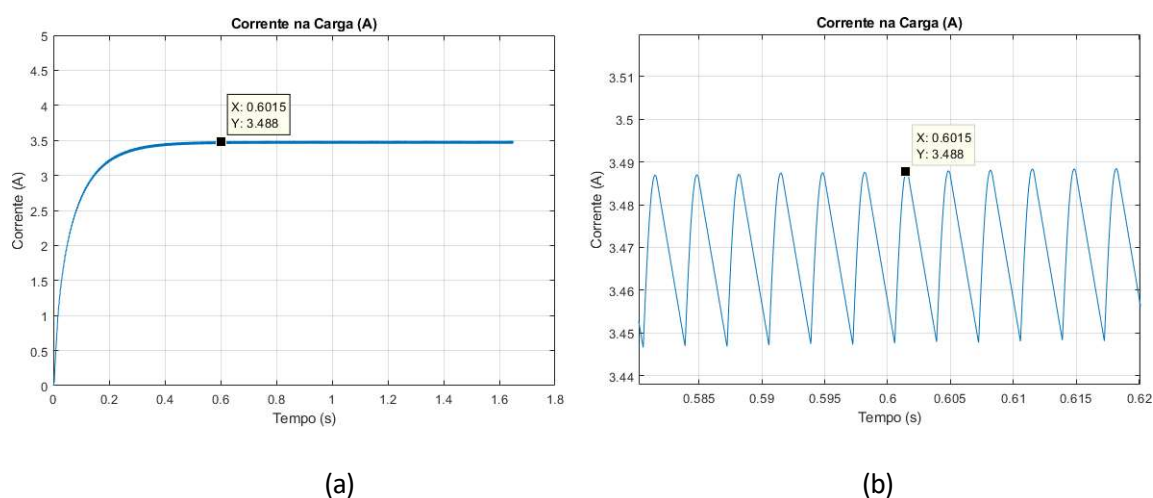


Figura 2.33 - Simulação de Corrente em malha aberta GRV

De acordo com a figura 2.34 percebe-se o valor de pico por chaveamento de fase, atingido níveis de regime permanente de 17,91 A e um transitório na partida da máquina devido a corrente de magnetização da MVR.

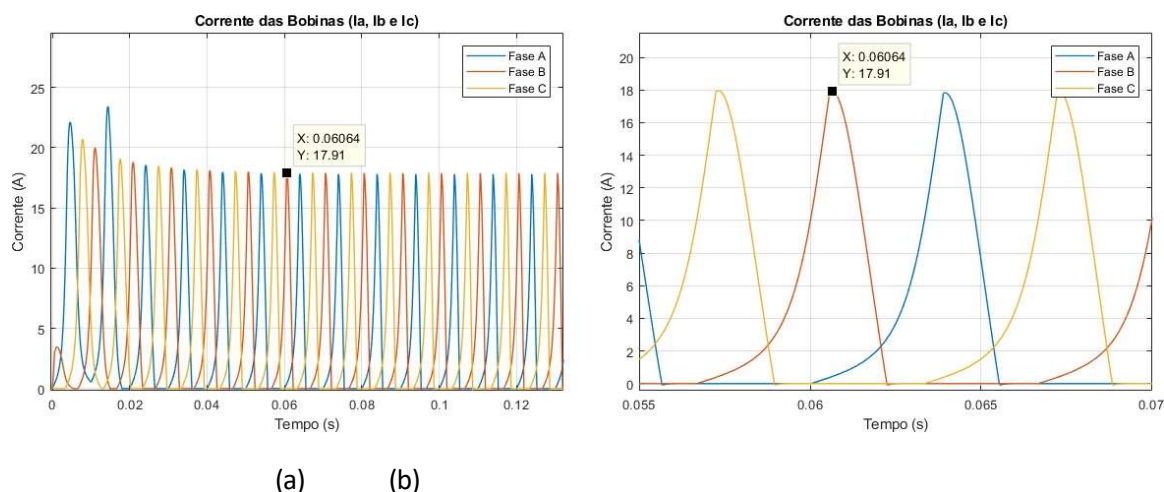


Figura 2.34 - Pico de corrente por fase

Segundo a figura 2.34 (a) descreve o comportamento em regime da corrente das fases sobre a forma de onda ampliada da indutância da fase. A figura 2.34 (b), evidência o pico máximo em regime permanente da máquina de relutância variável atuando como gerador, pode ser observado o pulso de disparo das chaves no instante onde a indutância da fase é decrescente, o que implica diretamente em seu funcionamento como gerador.

Com interesse de verificar o comportamento da MVR operado como gerador em função da excitação externa fornecida, alterou-se valores de excitação de forma crescente [3, 4, 5, 12] para acompanhar o formato de onda da corrente e tensão final da carga tendo como fase de referência a fase “A”, ressaltando que a simulação em primeiro momento está no formato malha aberta.

4.10.1 Excitação: 50VCC – Velocidade: 1500 rpm –carga: 40 Ω

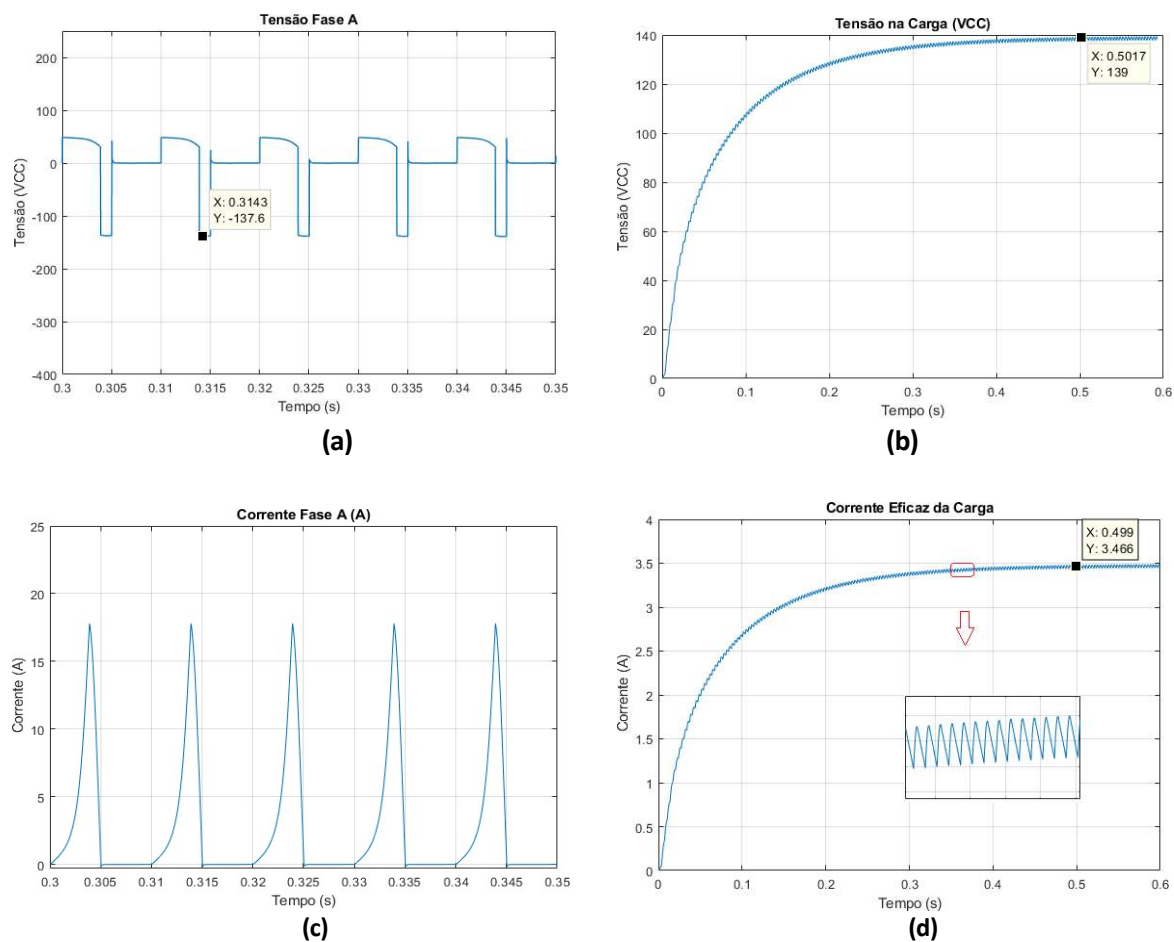


Figura 2.35 - Resultados da simulação em malha aberta com tensão de excitação de 50 VCC - (a) Tensão gerada (b) Tensão na carga (c) Corrente gerada (d) Corrente na carga

4.10.2 Excitação: 75VCC – Velocidade: 1500 rpm –carga: 40 Ω

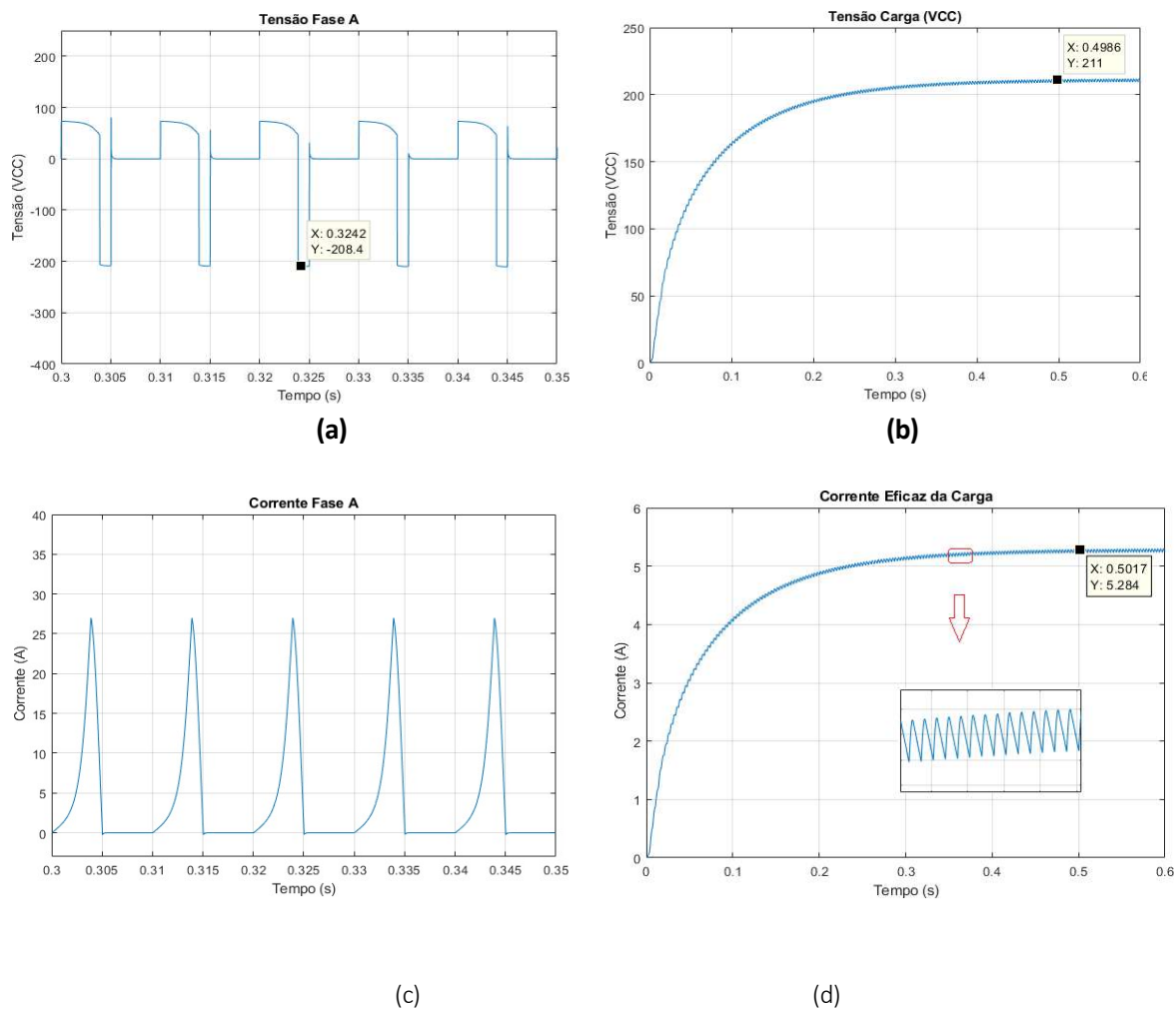


Figura 2.36 - Resultados da simulação em malha aberta com tensão de excitação de 75 VCC (a) Tensão gerada (b) Tensão na carga (c) Corrente gerada (d) Corrente na carga

4.10.3 Excitação: 100VCC – Velocidade: 1500 rpm –carga: 40 Ω

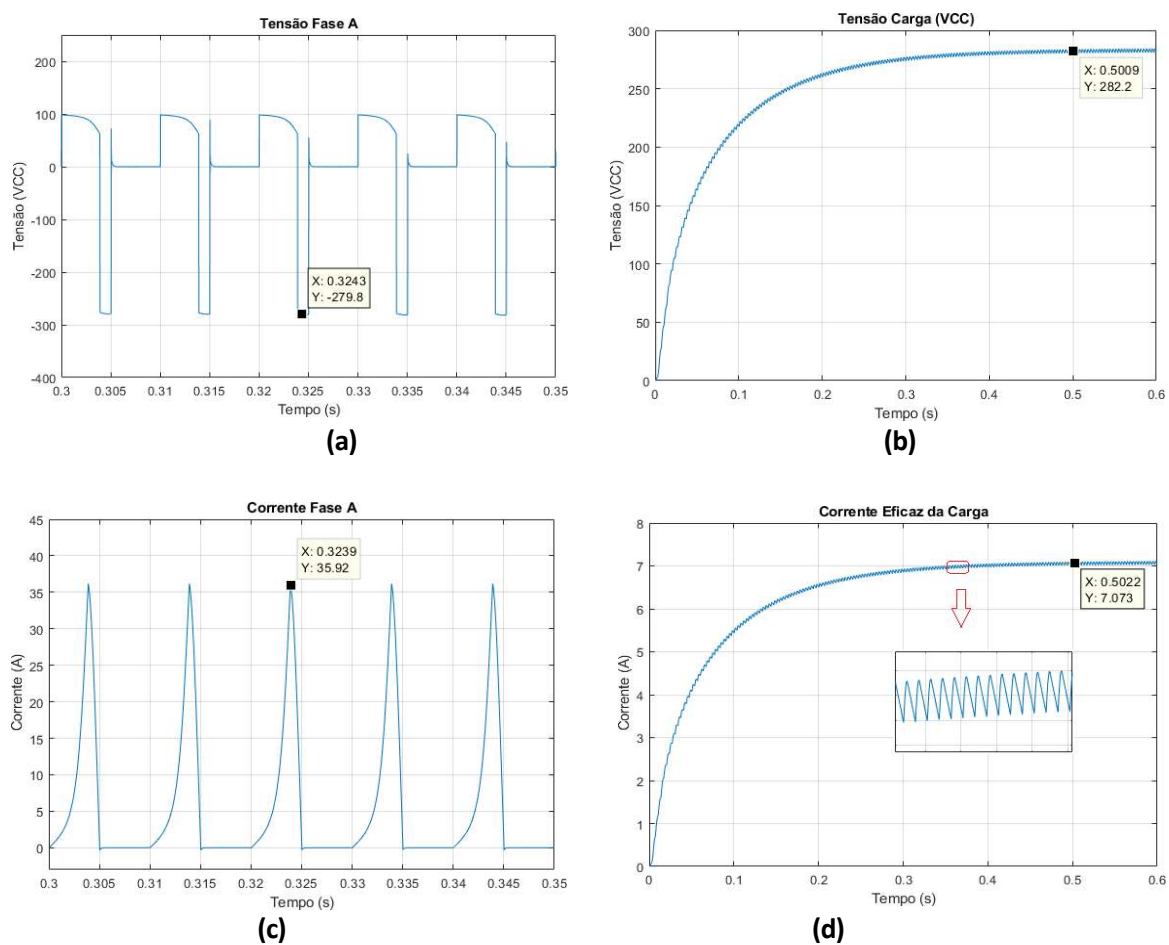


Figura 2.37 - Resultados da simulação em malha aberta com tensão de excitação de 100 VCC (a) Tensão gerada (b) Tensão na carga (c) Corrente gerada (d) Corrente na carga

4.10.4 Excitação: 200VCC – Velocidade: 1500 rpm –carga: 40 Ω

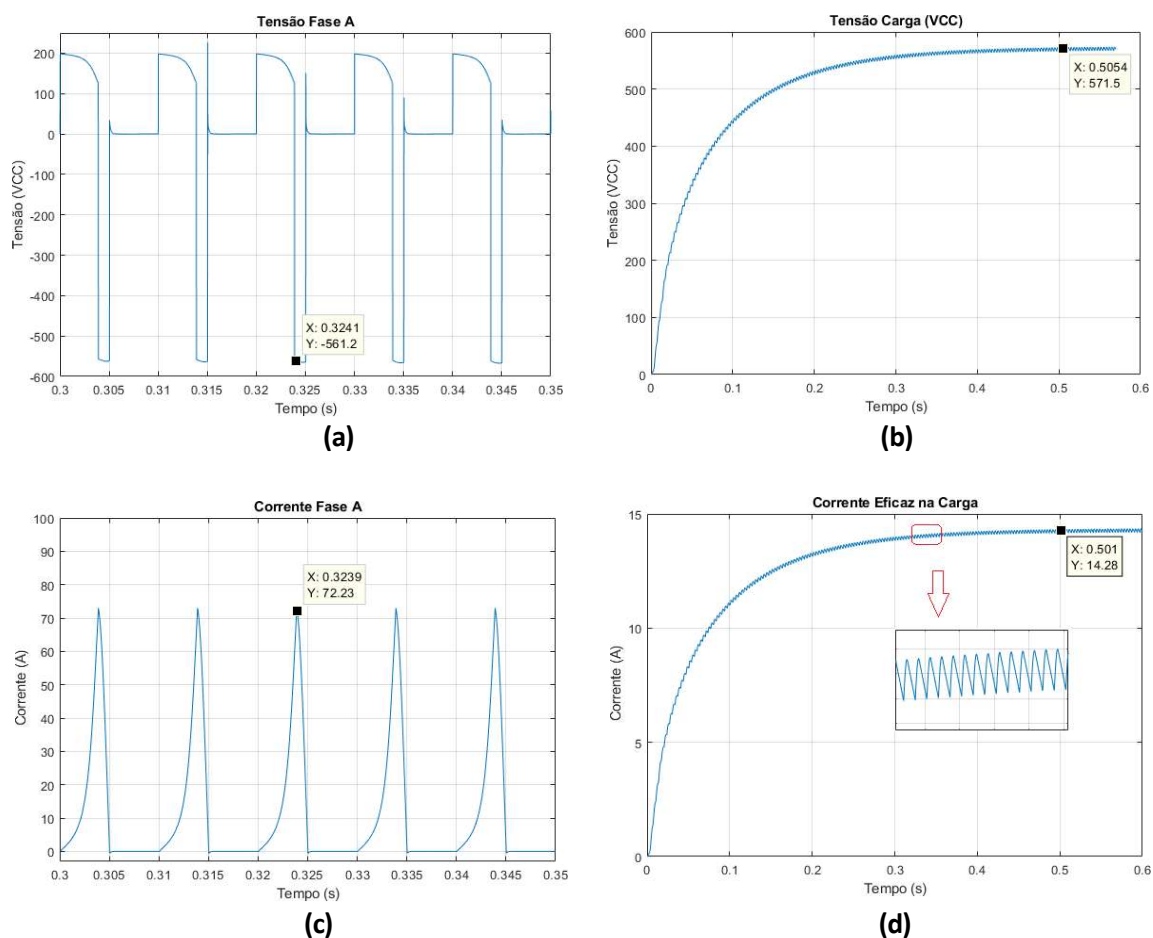


Figura 2.38 - Resultados da simulação em malha aberta com tensão de excitação de 200 VCC (a) Tensão gerada (b) Tensão na carga (c) Corrente gerada (d) Corrente na carga

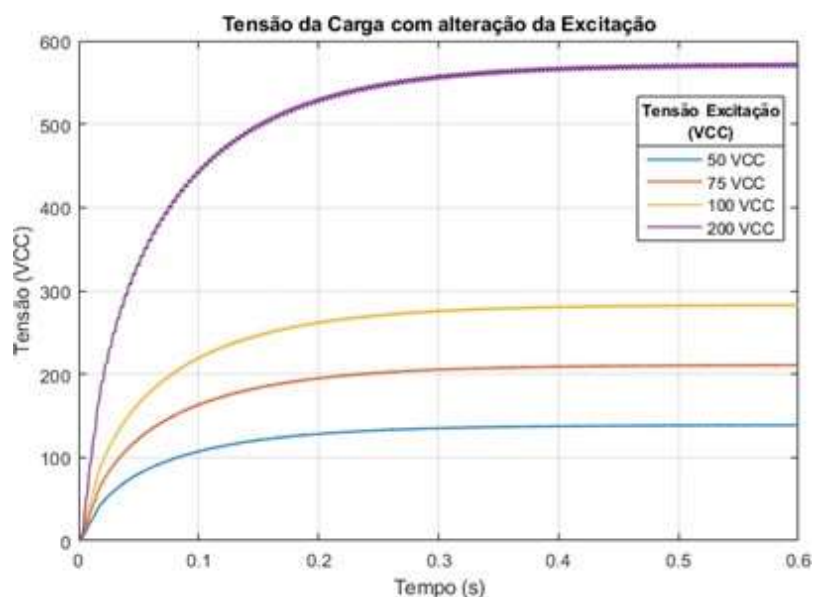


Figura 2.39 - Gráfico geral das tensões de saída em relação à tensão de excitação

Por meio das simulações realizadas, possibilitou a avaliação do comportamento da GRV atrás das curvas de tensão e corrente encontradas em regime aberto, que podem ser obtidas conforme excitação desenvolvida.

Além dos resultados demonstrarem o comportamento do GRV, verifica-se resultados coerentes baseados nas equações matemáticas, onde a excitação influencia diretamente na tensão gerada, com base no gráfico pode-se afirmar que a tensão gerada é proporcional à tensão de excitação.

Apresentado neste capítulo em forma de programação o modelo matemático apresentado no capítulo 03, os resultados encontrados em malha aberta demonstram claramente a dependência que a tensão gerada possui em proporção a tensão de excitação, sendo seu aumento proporcional a tensão aplicada na tensão de excitação.

CAPÍTULO 5

TÉCNICA DE CONTROLE DE TENSÃO NO GRV

5.1 INTRODUÇÃO

Um sistema de controle de tensão tem como objetivo manter a tensão da máquina em um valor de referência predeterminado ou conduzir a este valor, e quando houver mudança de referência, independentemente das condições em que a máquina se encontre de operação, ou seja, com a presença de perturbações no sistema e com a variação do conjugado de carga, devendo responder de forma rápida e eficiente. [7]

Proposta de estudo recentemente vem sendo apresentadas para o controle de tensão gerada da GRV. Em [23], o autor desenvolve três técnicas de controle: PWM com ângulo de disparo fixo, controle de tensão de excitação com conversor BUCK e técnica de variação de ângulo do θ_{off} das chaves superiores e inferiores.

Em [24], a tensão gerada na GRV é manipulada mantendo-se o θ_{off} fixo e variando θ_{on} por meio de um algoritmo possui como princípio a lógica FUZZY, obtendo como resultado, a eficiência crescente conforme aumenta a velocidade.

Em [25], excuta uma técnica de controle da tensão gerada permanecendo fixos o θ_{off} e θ_{on} através de uma simulação computacional. Implementadas duas malhas de controle, sendo uma o controle da corrente de fase usando técnica CCC (*current chopping Control*) com intuito de manter a corrente regulada, e a outra em controle da tensão externa.

Os controladores por histerese apresentam uma menor complexidade na implementação, por não haver a necessidade de conhecimento dos parâmetros da máquina. Apresentam modo de operação *On-Off*, que impõem variações à frequência de chaveamento do conversor, sendo determinadas por aspectos como: variação da indutância da máquina, tensão no barramento CC e as oscilações de corrente causadas pela banda de histerese. Todas estas variações podem elevar a frequência de chaveamento, podendo ser

ultrapassado os limites de operação das chaves e também aumentando as perdas de chaveamento [24].

Neste Contexto, o propósito deste trabalho é de apresentar duas estratégias de controle de tensão gerada pela MVR, através da variação do ângulo de desmagnetização θ_{off} , onde o ângulo de magnetização θ_{on} mante-se fixo em relação à posição de alinhamento das fases. As duas técnicas têm como princípio o controlador PI (proporcional integral) com alteração do instante de acionamento do θ_{off} .

5.2 CONTROLADORES PI

A abertura de um controlador em um determinado sistema visa a alteração de sua dinâmica, manipulando a relação entrada/saída através da atuação sobre um ou mais dos seus parâmetros, com o objetivo de satisfazer certas especificações com relação a sua resposta.[13]

Os parâmetros do sistema que sofrem uma ação direta do controlador são denominados variáveis manipuladas (MV). As variáveis controladas ou variável de processo (MP) se referem aos parâmetros dos quais se desejam obter mudanças que agradem as especificações dadas.

O controlador é um dispositivo físico, na maioria das vezes eletrônico. [13] Os sinais não elétricos são transformados normalmente em sinais elétricos por transdutores. Geralmente os circuitos eletrônicos são simples e formados por amplificadores operacionais. Também podem ser aplicados em microprocessadores, onde o sinal de entrada passa a ser amostrado e enviado ao processador, que calcula o valor da saída de acordo com o controle implementado.

5.2.1 Controlador Proporcional (P)

A razão entre a saída e a entrada do compensador é chamado de ganho proporcional "Kp". Quanto maior for o ganho do compensador, menor será o erro de estado estacionário. Porém, o tempo de acomodação do sistema aumenta tendendo a ser instável. O inverso acontece quando se reduz o ganho (atenuação). Esse compensador representa apenas um ajuste no ganho original do sistema, como exemplificado abaixo.

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (5.1)$$

$$u(t) = Kp - e(t) \quad (5.2)$$

Onde:

- $u(t)$ Representa a saída do controlador,
- $r(t)$ Representa o sinal de controle desejado,
- $y(t)$ Corresponde ao valor medido da variável a ser controlada.

5.2.2 Controlador Proporcional Integral (PI)

A ação integral representa a uma taxa de variação do sinal de saída em relação a entrada, uma ação integral atua aprimorando a resposta do controle, tendendo a eliminar o erro em regime permanente. Porém, o regime transitório é prejudicado, podendo aumentar o tempo de acomodação do sistema.

A atuação de um controlador PI corresponde à soma de uma ação proporcional à uma ação integral com intuito de melhorar a resposta transitória com a contribuição da ação proporcional, enquanto a ação integral corrige o erro de regime permanente.

$$u(t) = \left(kp \cdot e(t) + ki \cdot \frac{1}{\tau} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (5.3)$$

- Define-se τ tempo integrativo ou *reset time*.

5.3 CONTROLE PI EMBASADO NA VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE DESMAGNETIZAÇÃO θ_{off}

Visando a operação em malha fechado para controle de tensão gerada na MVR, desenvolve-se uma estratégia de controle digital, baseado na variação da largura do

período de magnetização das fases, definido o ângulo θ_{on} (ângulo de fechamento da chave) fixo conforme os 30° desenvolvido pela máquina, e modificado o valor de θ_{off} (ângulo de abertura ou desmagnetização das chaves) através do um controlador PI, demonstrado anteriormente. Controle desenvolvido em SIMULINK MATLAB.

A tensão a ser controlada e medida e sua variação e convertida em graus e transmitidas para o controlador PI. Os ganhos do controlador calculam o novo valor do ângulo de disparo das chaves, alimentando o algoritmo gerador de pulso. A figura 2.40, demonstra o fluxo demonstrativo do controlador PI, e os valores de referência de tensão e o valor de realimentação e o controlador de pulsos.

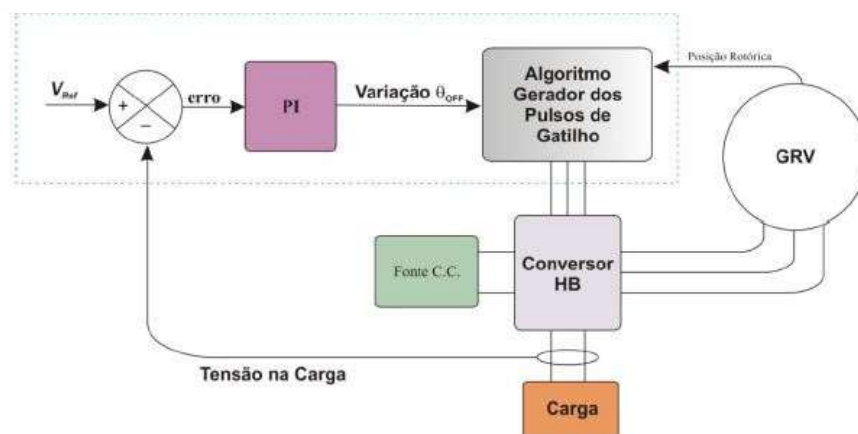


Figura 2.40 - Diagrama de Simulação do Controle de Tensão [8]

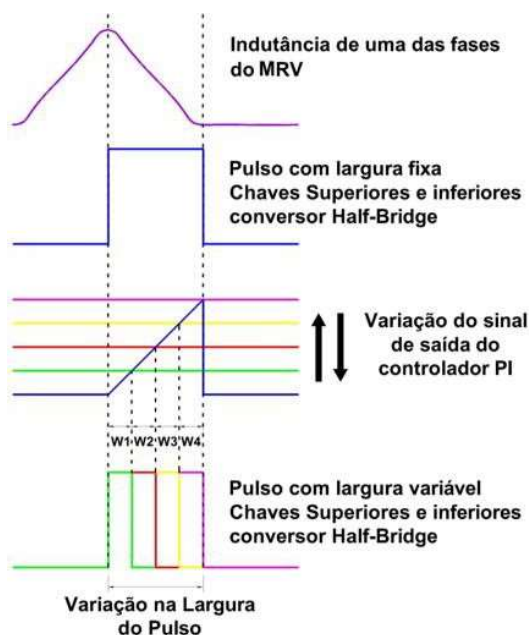


Figura 2.41 - Estratégia para Variação do Ângulo de Magnetização das Chaves do HB [4]

5.4 ESTRATÉGIA DE CHAVEAMENTO

A estratégia de chaveamento do conversor HB, o qual é responsável pelo acionamento das fases do GRV, será realizado através de chaveamento clássico, onde se evidência duas etapas distintas, sendo a primeira etapa de excitação e a segunda etapa de roda livre. Na figura 2.42 apresenta o conversor HB utilizado. Os instantes de magnetização e desmagnetização das fases são apresentados na figura 2.43.[26]

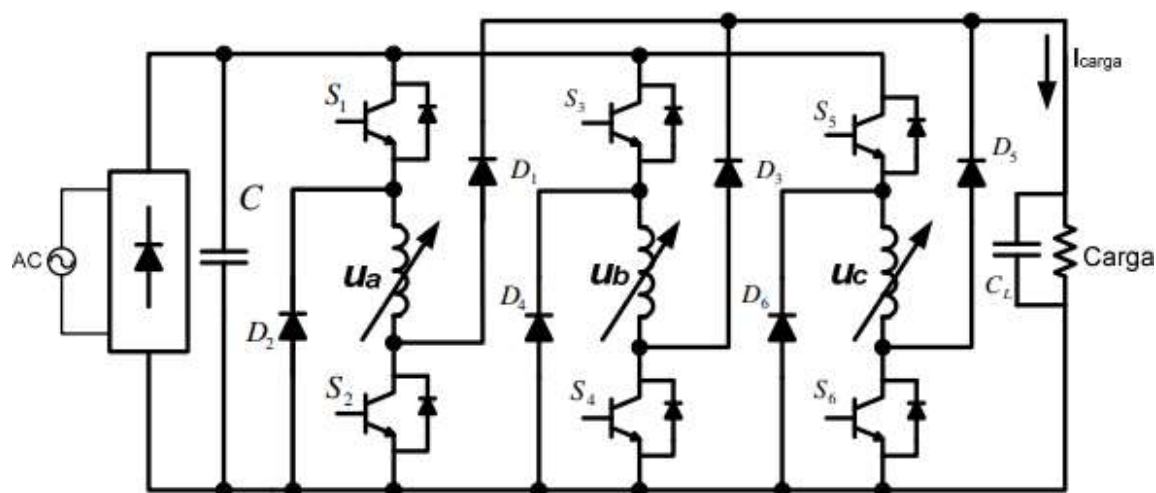


Figura 2.42 - Diagrama Esquemático do Conversor HB [10]

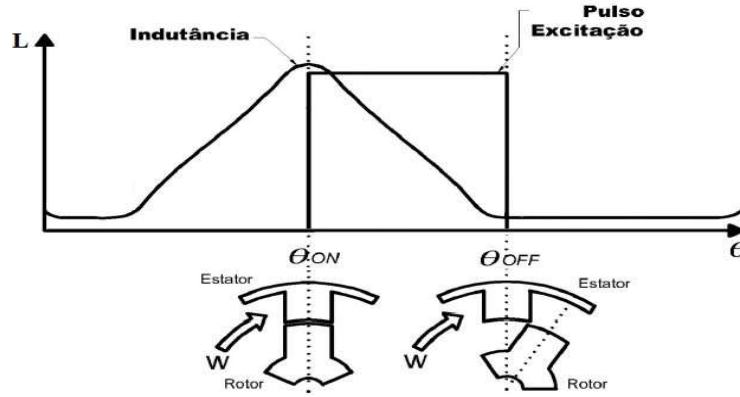


Figura 2.43 - Indutância e Pulso de Disparo de Uma Fase em Função da Posição do Rotor

A função clássica de chaveamento do conversor HB, para acionamento de uma das fases do Gerador a Relutância Variável é normalmente dada por [26]:

$$S(S_1, S_2) = \begin{cases} 1, & S_1, S_2: \text{on } (\theta_{on} < \theta < \theta_{off}) \\ -1, & S_1, S_2: \text{off } (0 < \theta < \theta_{on}, \theta_{off} < \theta < \theta_R) \end{cases} \quad (5.4)$$

A função da tensão na fase pode ser escrita [4]:

$$u(S) = \begin{cases} u_a = S = 1 \\ -u_a = S = -1 \end{cases} \quad (5.5)$$

Conforme apresentado na figura 2.43, o sistema de chaveamento é representado por duas etapas distintas de acionamento, etapas (I, II) sendo descritas por:

5.4.1 Etapa I - Excitação $\theta_{on} < \theta < \theta_{off}$

Inicialmente a corrente de magnetização é estabelecida através do fechamento das chaves S_1 e S_1 do conversor HB, conforme a figura 2.44. Nesta etapa a fonte de tensão quando a tensão nominal é aplicada aos terminais do Gerador estabelecendo fluxo magnético ao núcleo, resultado em uma força contra eletromotriz adicional a tensão de

excitação [4], contribui para o máximo valor de conjugado, acionado no momento de decrescimento da indutância.

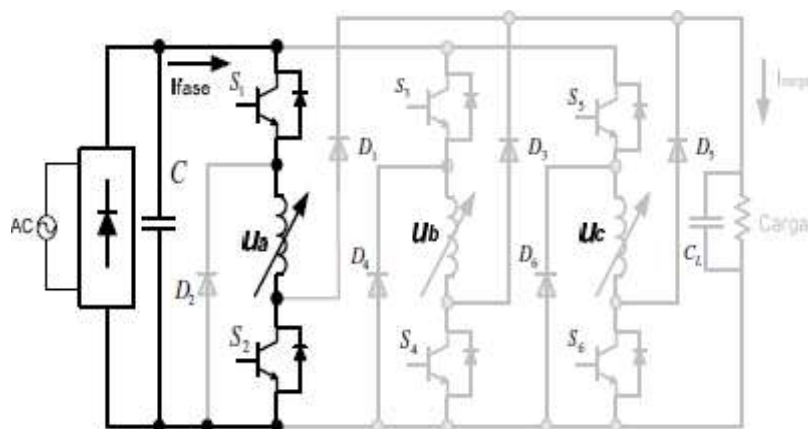


Figura 2.44 - Etapa I – Excitação [7]

5.4.2 Etapa II - Excitação $\theta_{off} < \theta < \theta_R$

Nesta etapa acontece a abertura das chaves S_1 e S_1 do conversor HB, iniciando o processo de transferência de energia armazenada no enrolamento de fase para a fonte de tensão de excitação através dos diodos de roda livre, conforme figura 2.45.

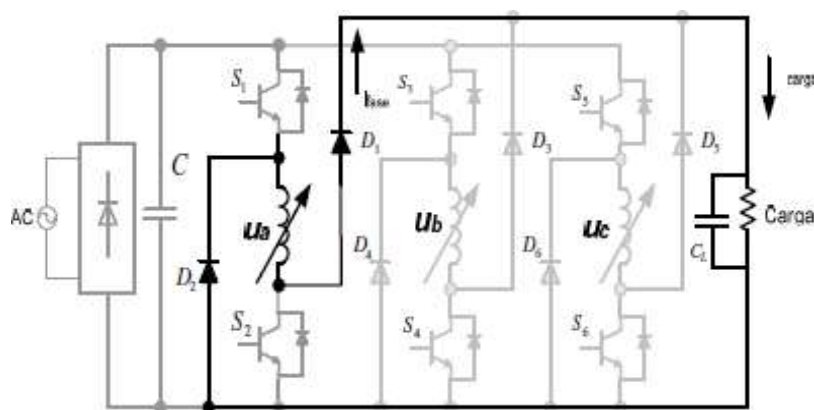


Figura 2.45 - Etapa II – Geração por fase [7]

5.5 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Buscando um melhor desempenho da geração da MVR, inseriu – se um novo modelo de controle ao modelo clássico, denominado de modelo (*Flux Boosting*), que consistem em acrescentar uma terceira etapa ao modelo clássico em chaves diferentes, conforme demonstrado nas duas funções abaixo.

A etapa de *flux boosting*, tem como função a abertura da chave S1, sendo que o fluxo da energia que circula do diodo D2 e a chave 02 conforme figura 2.46 (b), a força eletromotriz da máquina permanece acrescentado corrente continua a fase, neste contexto, a energia somada ao indutor e proveniente apenas da conversão eletromecânica.[4]

$$S(S_1, S_2) = \begin{cases} 1, & S_1, S_2: on \ (\theta_{on} < \theta < \theta_{off1}) \\ 0, & S_1: off, S_2: on \ (\theta_{on} < \theta < \theta_{off2}) \\ -1, & S_1, S_2: off \ (0 < \theta < \theta_{on} \ , \ \theta_{off2} < \theta < \theta_R) \end{cases} \quad (5.6)$$

$$u(S) = \begin{cases} u_a & S = 1 \\ 0 & S = 0 \\ -u_a & S = -1 \end{cases} \quad (5.7)$$

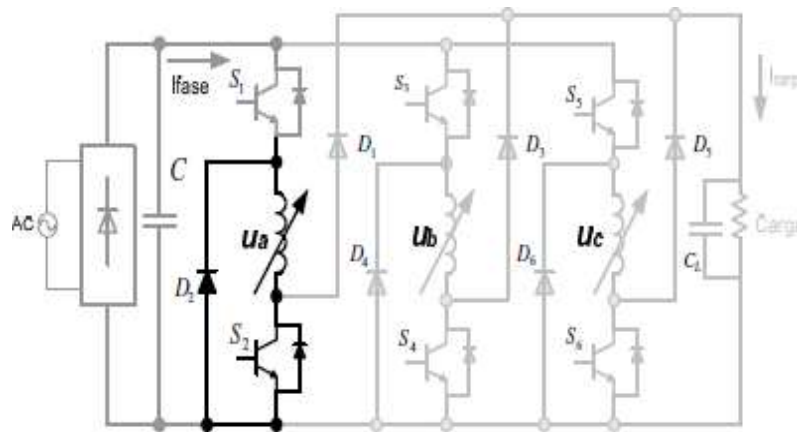


Figura 2.46 - Etapa II – Excitação [7]

CAPÍTULO 6

RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

6.1 MODELO COMPUTACIONAL DO CONTROLE DE TENSÃO: OPERAÇÃO DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL EM MALHA FECHADA

Na figura 2.47, é apresentado o modelo computacional desenvolvido para a simulação da estratégia de controle definida. Conforme o diagrama descrito anteriormente e representado na figura 2.40 (Diagrama de Simulação do Controle de Tensão com Acréscimo), adotados as duas formas de acionamento do gerador a relutância variável, encorpada a um controle no formado PI (Proporcional, Integral), com o objetivo de garantir a estabilidade da tensão de forma rápida e confiável.

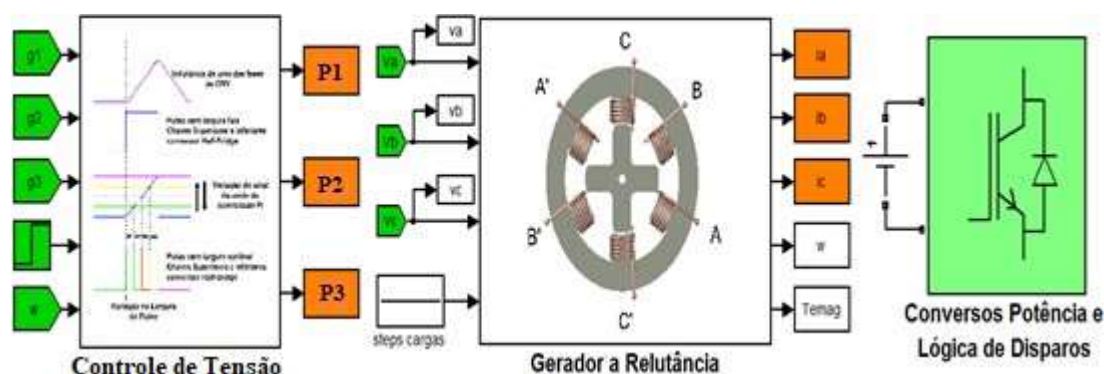


Figura 2.47 - Diagrama Completo de Simulação. [5]

Desenvolve-se controle de tensão, trabalhando em malha fechada, com uma estratégia de variação da largura do pulso de magnetização das fases do acionamento, ou seja, o ângulo de disparo, mantendo o início do pulso constante e reduzindo o final do pulso, fixo e alterando o valor de (ângulo de abertura das chaves) através de um controlador PI. Basicamente é realizada a realimentação do circuito de controle através da medição da tensão desenvolvida na carga, que ao ser comparado com a tensão de referência ou (SP) *set point* gera um erro, onde ao ser inserido em um controlador do tipo PI, controla o ângulo de disparo θ_{off} de abertura das chaves do conversor, conforme diagrama apresentado na

figura 2.48, que demonstra o método de controle, tendo como princípio de controle a tensão final da carga em relação a tensão de referência.

Esta forma de controle é observada no formato de programação visível na figura 2.49, onde demonstra de forma clara o controlador PI, tendo com entrada a tensão de referência e a tensão da carga.

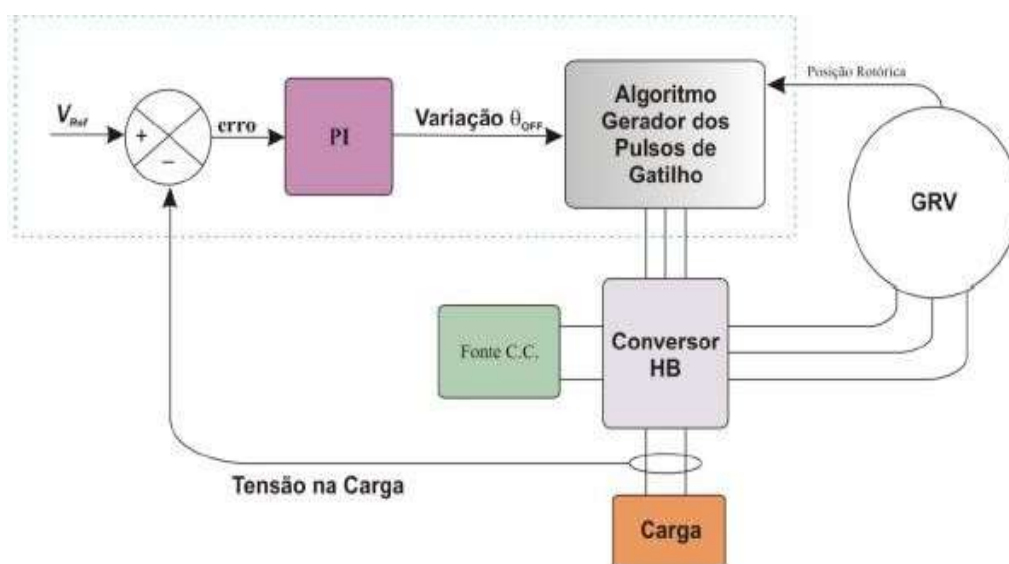


Figura 2.48 - Diagrama de controle de tensão gerado [5]

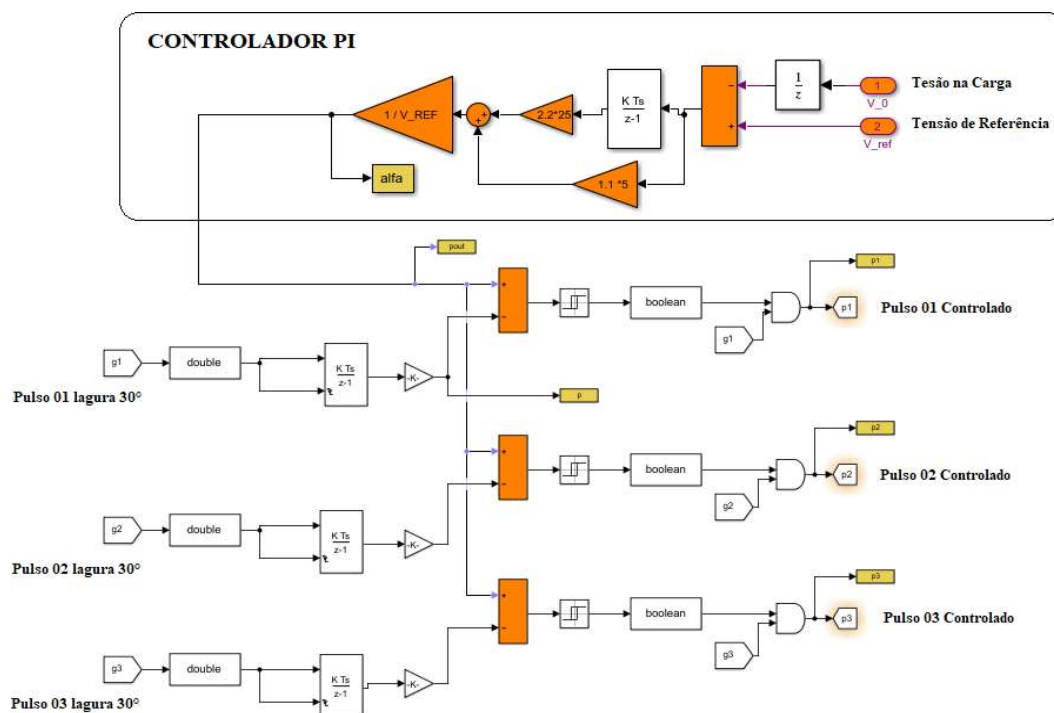


Figura 2.49 - Detalhamento do controle gerado dentro do SIMULINK [4]

Com o objetivo de analisar o controle PI, operando com os métodos citados anteriormente (método convencional e método flux boosting), desenvolveu-se uma série de alterações de variáveis da máquina, visando observar o comportamento do controle atuado diretamente nos métodos de acionamento.

6.2 CRITÉRIOS DE SIMULAÇÃO

Objetivando a garantia de uma simulação constante nos dois métodos adotados, estabeleceram-se critérios padrões, utilizando a máquina apresentada no capítulo 4, conforme:

- Tensão de excitação: 200 VCC;
- Tensão de Referência: 311 VCC;
- Velocidade rotórica: 1500 rpm;
- Carga constata: 40 ohms;
- Tempo de Simulação: 10 segundos;

6.2.1 Método Convencional.

Conforme demonstrado no modelo anterior o método de controle Convencional, com duas etapas de acionamento das chaves de acionamento, θ_{on} fixo e alterando o valor de θ_{off} .

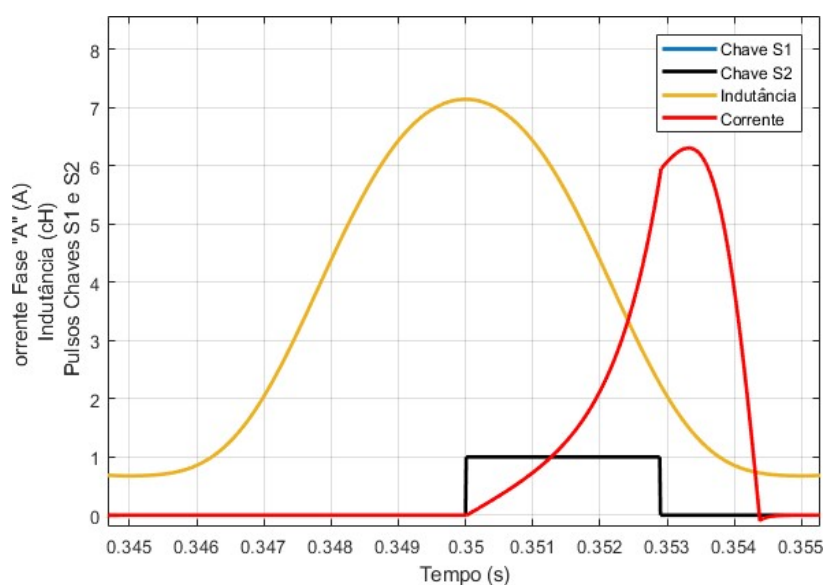


Figura 2.50 - Diagrama de variação da indutância, corrente em relação ao acionamento

Excitação: 200 VCC – Velocidade: 1500 rpm – carga: 40 Ω (Método Convencional)

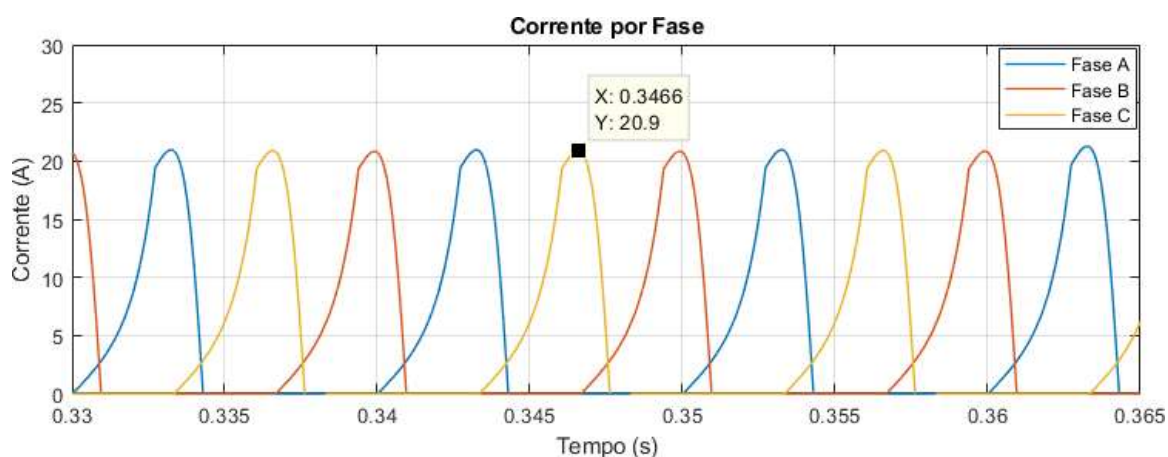
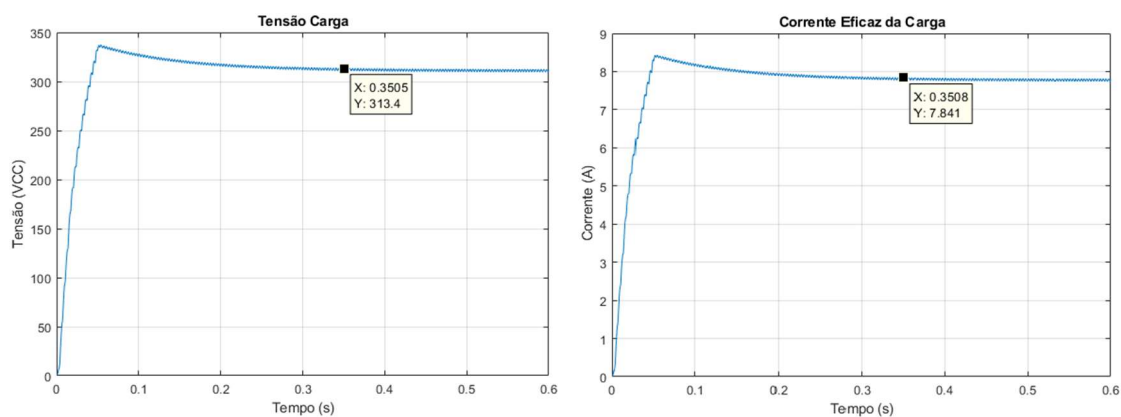


Figura 2.51 - Corrente por fase



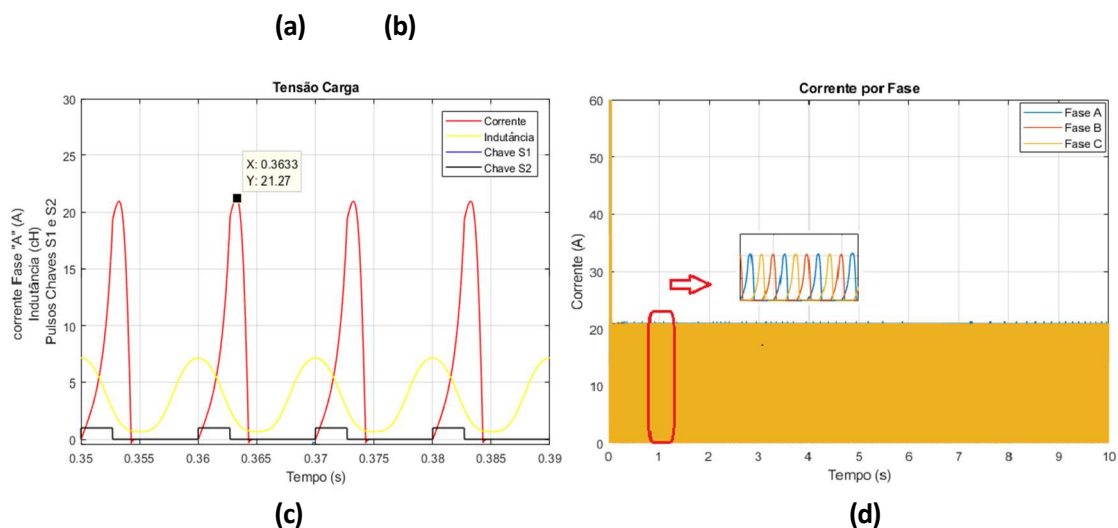


Figura 2.52 - Resultados da simulação em malha fechada método clássico com tensão de excitação de 200 VCC (a) Tensão gerada (b) Corrente carga (c) Disparo das chaves (d) Corrente na carga

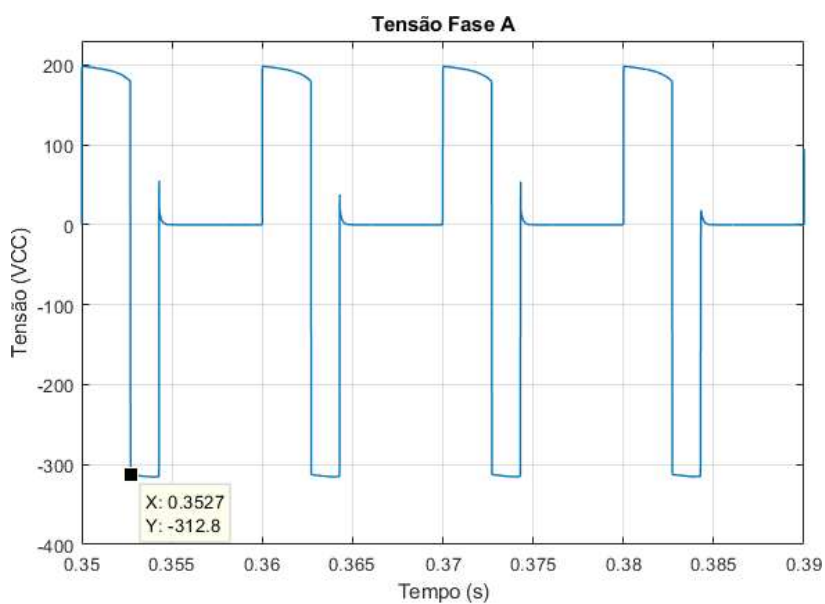


Figura 2.53 - Tensão fase A Método convencional

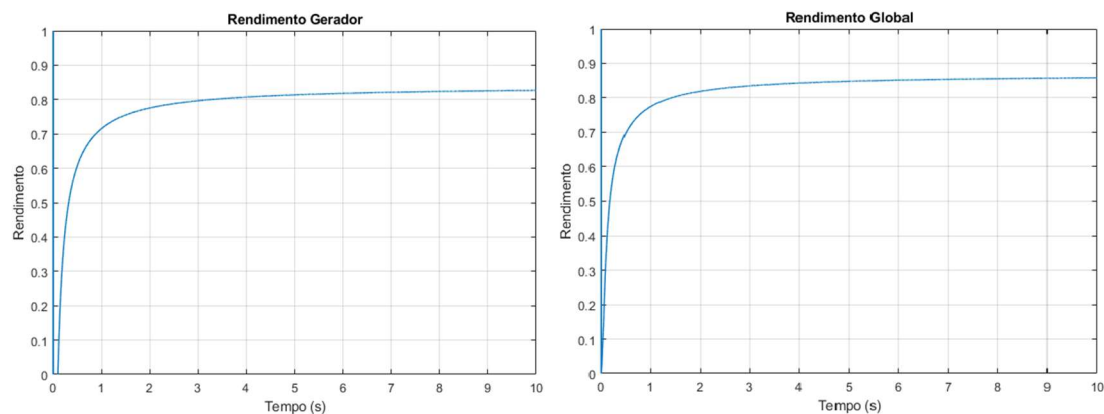


Figura 2.54 - Rendimento da MVR operador como gerador método Convencional

6.2.2 Método flux boosting.

Compreendendo o método flux boosting, e a sua função que consiste na abertura da chave S1, possuindo o fluxo aa energia que circula do diodo D2 e a chave 02 onde a sua força eletromotriz permanecem em sua corrente, continua a fase e mediante a esta ação, a energia em conjunto ao indutor é proveniente da conversão eletromecânica, conforme é demonstrada pela figura 2.55.

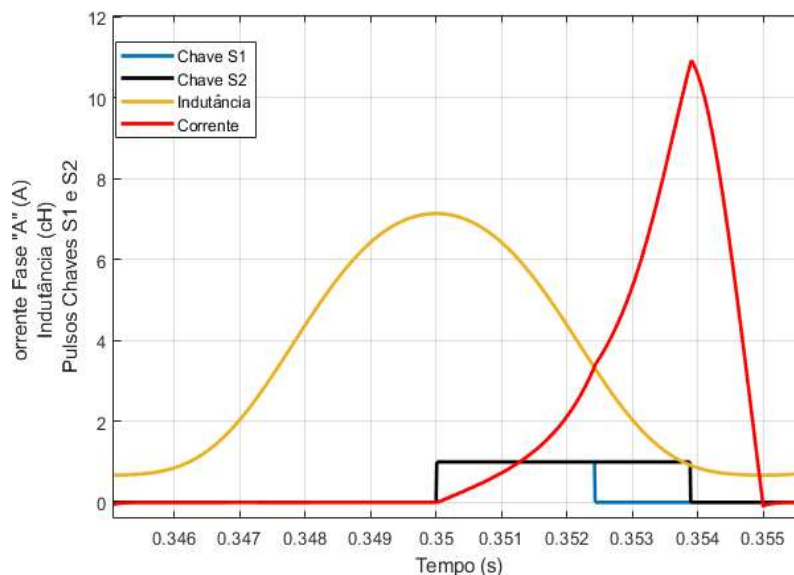


Figura 2.55 - Diagrama de variação da indutância, corrente em relação as chaves de acionamento S1 / S2

Excitação: 200 VCC – Velocidade: 1500 rpm – carga: 40 Ω (Método *Flux boosting*)

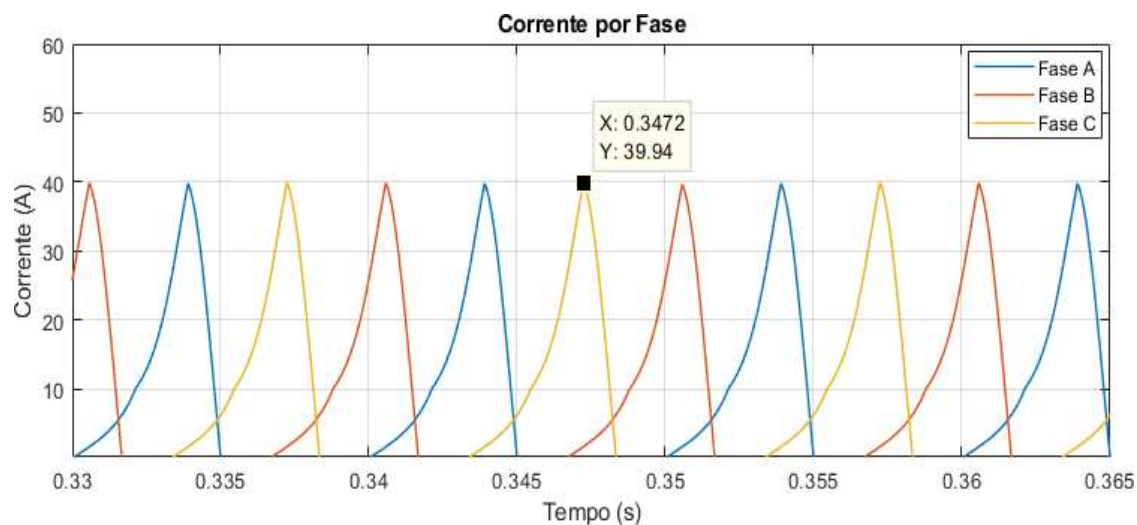
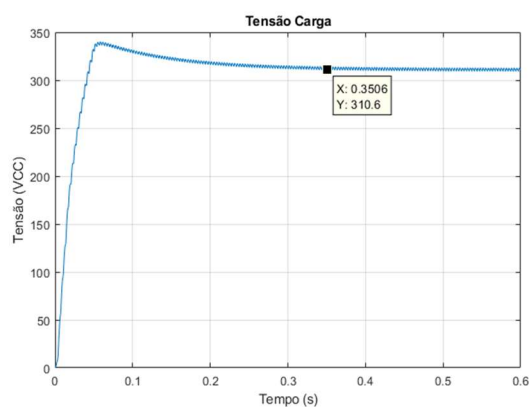
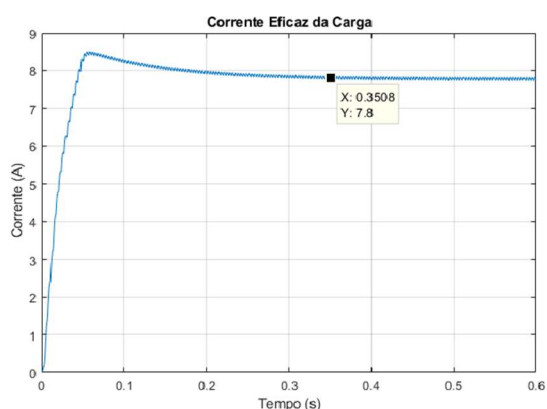


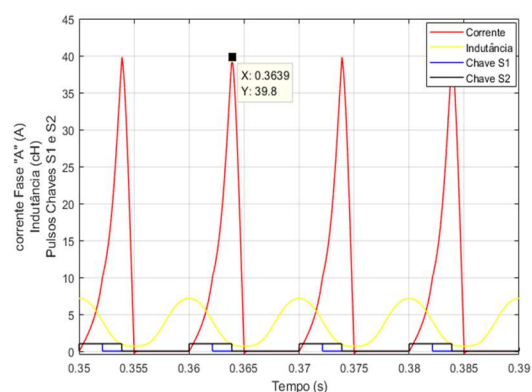
Figura 2.56 - Corrente por fase MVR operador como gerador método Flux Boosting



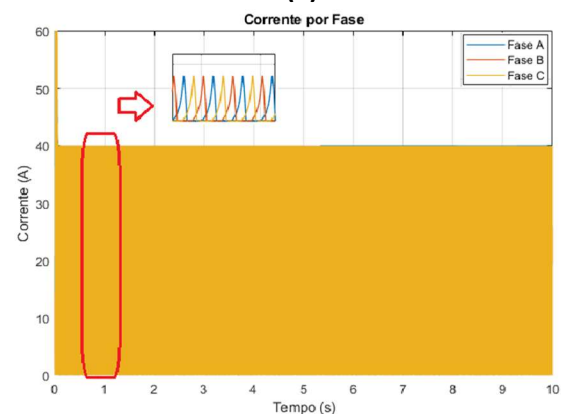
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.57 - Resultados da simulação em malha fechada método *Flux boosting*, com tensão de excitação de 200 VCC (a) Tensão gerada (b) Tensão na carga (c) Corrente gerada (d) Corrente na carga

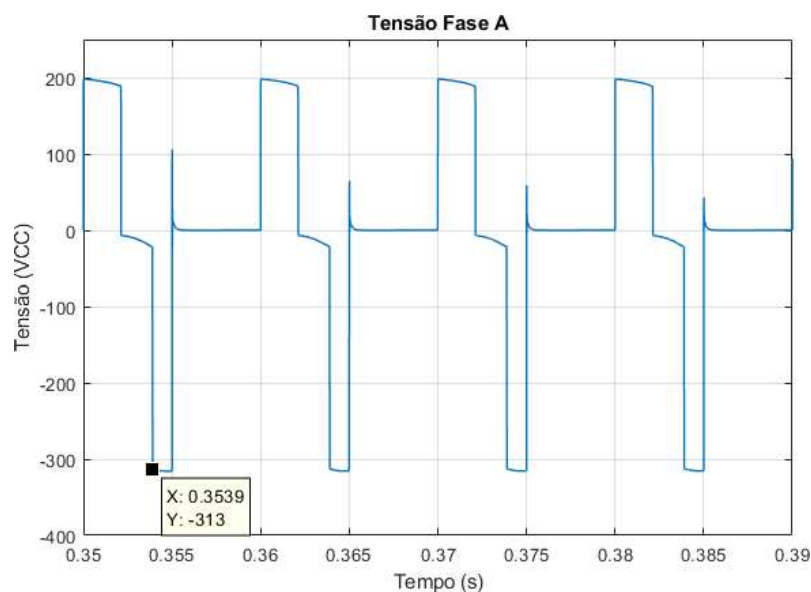


Figura 2.58 - Tensão fase A método flux boosting

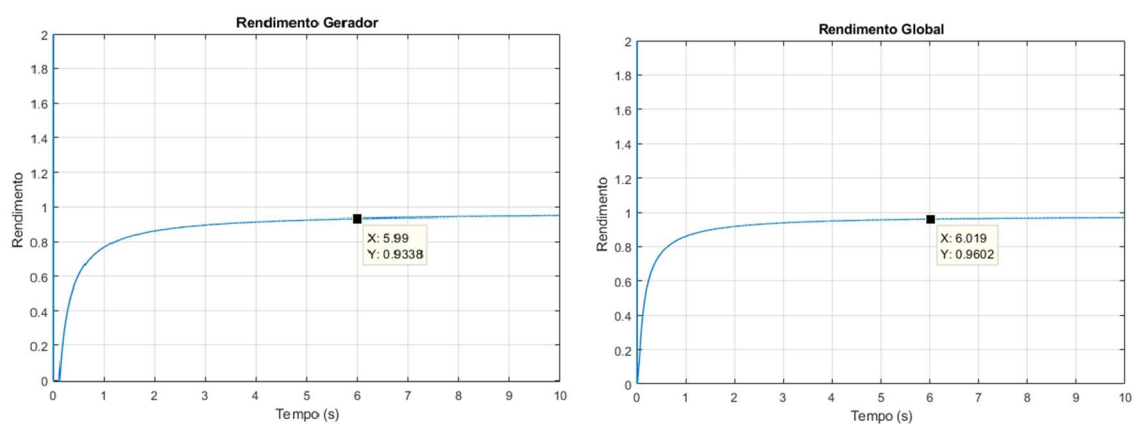


Figura 2.59 - Rendimento do Gerador MVR

6.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS DOIS MÉTODOS

O comportamento da máquina com a variação do ângulo de abertura da chave com a superior do conversor half-bridge consegue atuar nas três fases da máquina, conforme observa nas figuras 2.52 (a) e figura 2.57 (a), em que o valor de referência (311 V) foi devidamente mantido, mostrando que o controle foi mantido a precisão da tensão gerada independente do método utilizado na atuação, onde as correntes das 3 fases representado nas figuras 2.51 e figura 2.56, indicando o sinal de atuação das chaves comutadoras do conversor, no qual o método flux booting apresentou corrente 87,77% superior a corrente do método convencional aplicado a mesma carga, dado pelo aproveitamento da força contra eletromotriz proveniente da conversão eletromecânica.

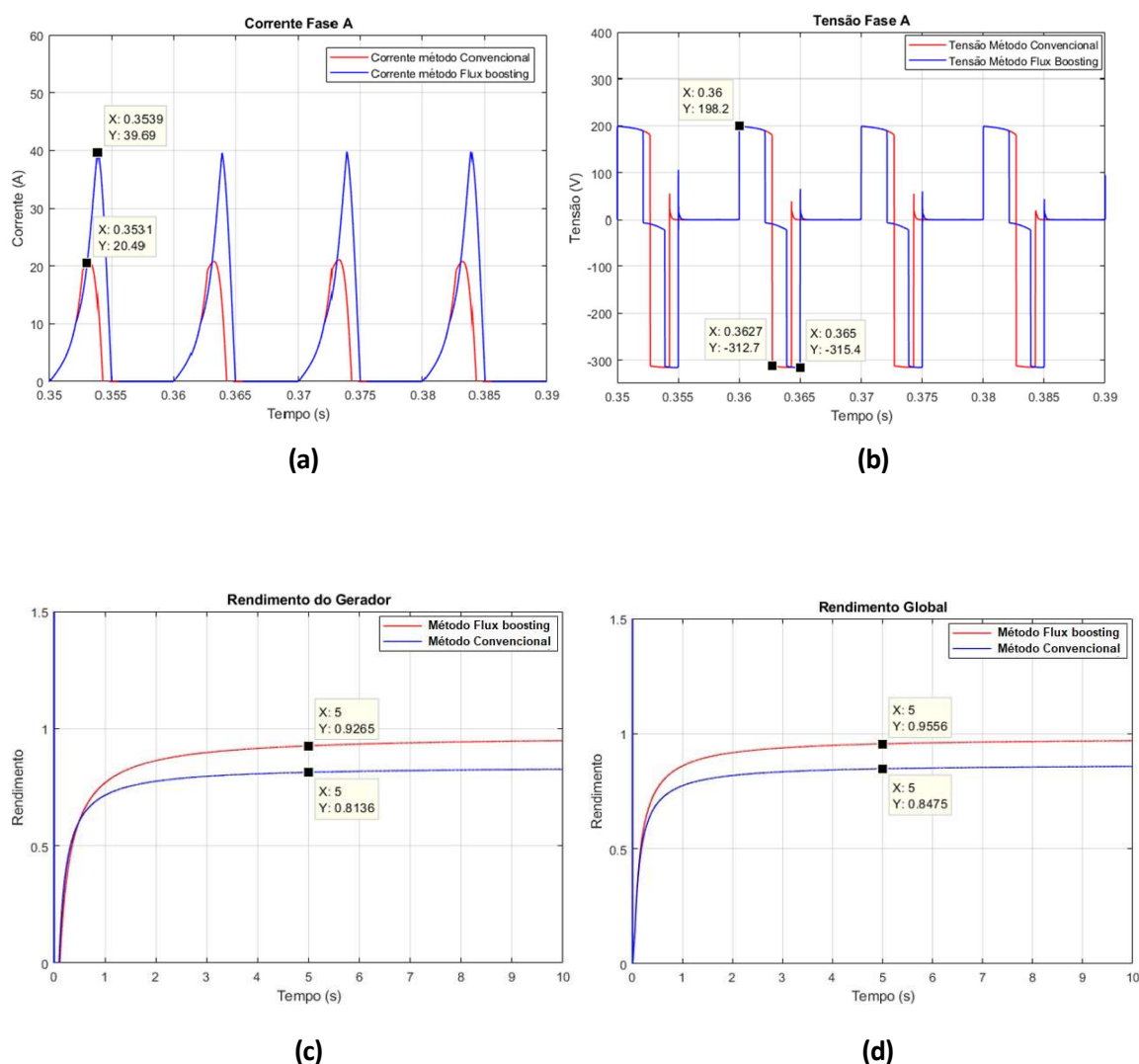


Figura 2.60 - Comparativo de operação MVR entre método convencional / método Flux Boosting

Como demonstrado na figura 2.60 (c), (d), o rendimento do método flux boosting apresentou um desempenho superior ao método convencional chegando a 13,87% no rendimento do gerador e 12,75% no rendimento global, este resultado tem como fator principal a redução da utilização da energia da fonte externa de excitação, podendo ser observada esta redução na figura 2.60 (b), onde a chave superior do método fluxo booting abre em um momento inferior ao método convencional.

Sendo os próximos passo a alteração de velocidade e tensão de excitação, aplicados os mesmos métodos, tendo como objetivo identificar qualquer anomalia que possa comprometer a entrega de variáveis estáveis para a carga, utilizando com controle PI, mantendo o ponto de operação em 311 VCC nos terminais de saída.

6.3.1 Caso 01: Excitação: 100VCC – Velocidade: 1500 rpm –carga: 40 Ω (Método Convencional)

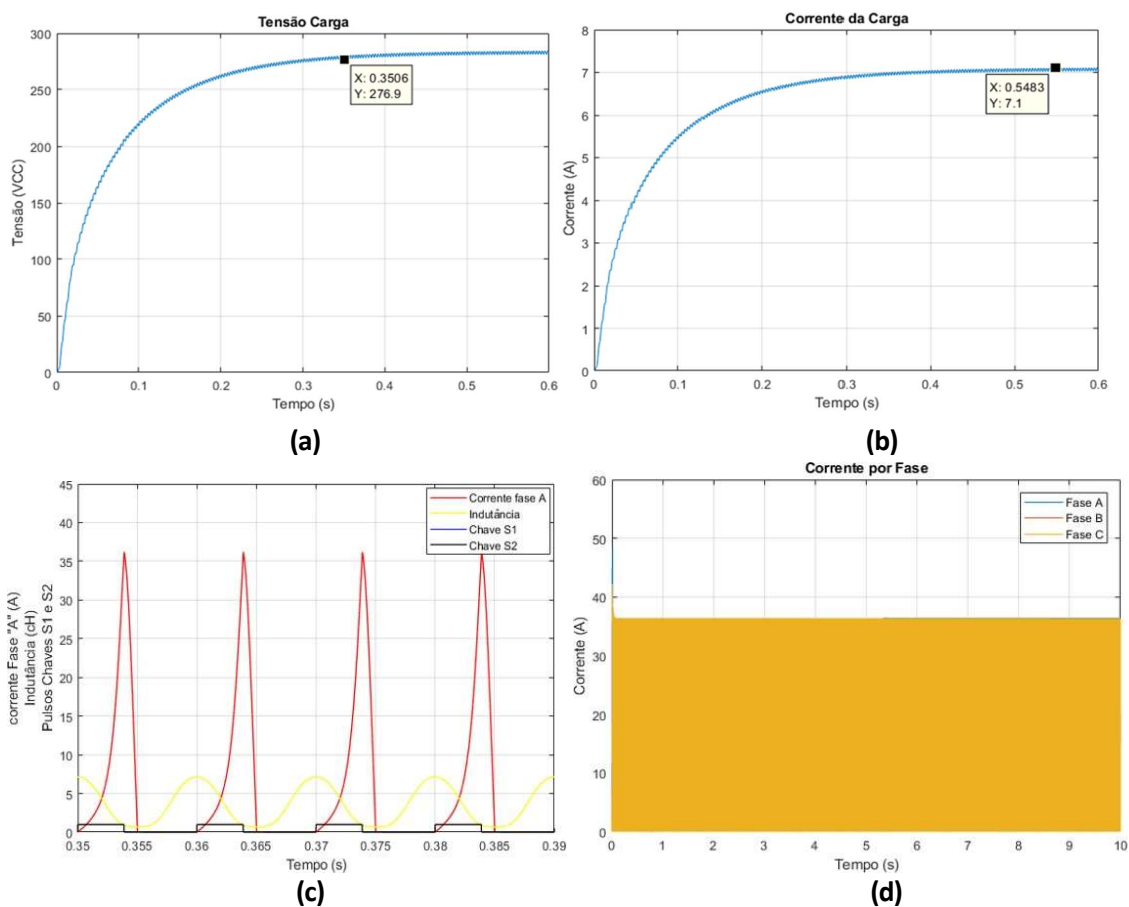


Figura 2.61 - Resultados da simulação em malha fechada método convencional com tensão de excitação de 100 VCC (a) Tensão gerada (b) Corrente carga (c) Disparo das chaves (d) Corrente na carga

6.3.2 Caso 02: Excitação: 100VCC – Velocidade: 1500 rpm –carga: 40 Ω (Método *Flux boosting*)

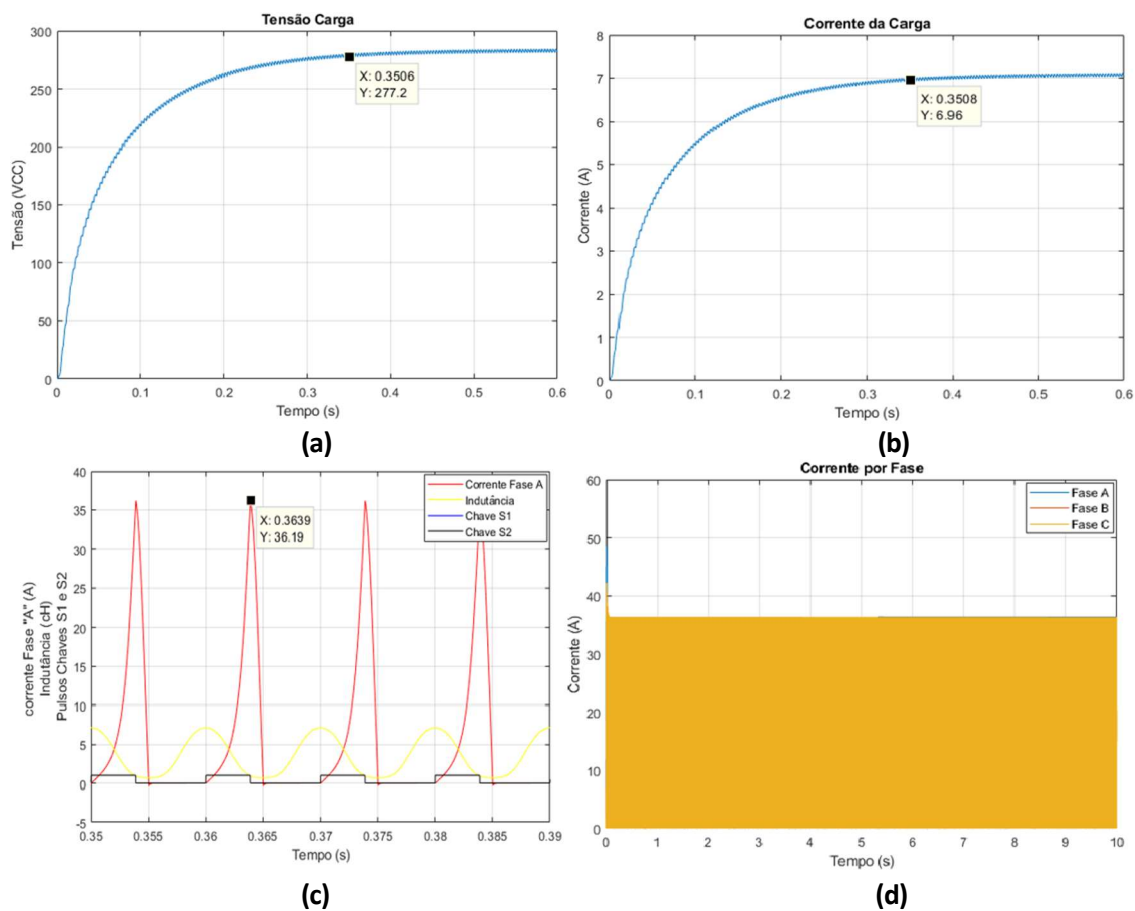


Figura 2.62 - Resultados da simulação em malha fechada método *Flux boosting*, com tensão de excitação de 100 VCC (a) Tensão gerada (b) Tensão na carga (c) Corrente gerada (d) Corrente na carga

6.3.3 Caso 03: Excitação: 150 VCC – Velocidade: 1500 rpm – carga: $40\ \Omega$ (Método Convencional)

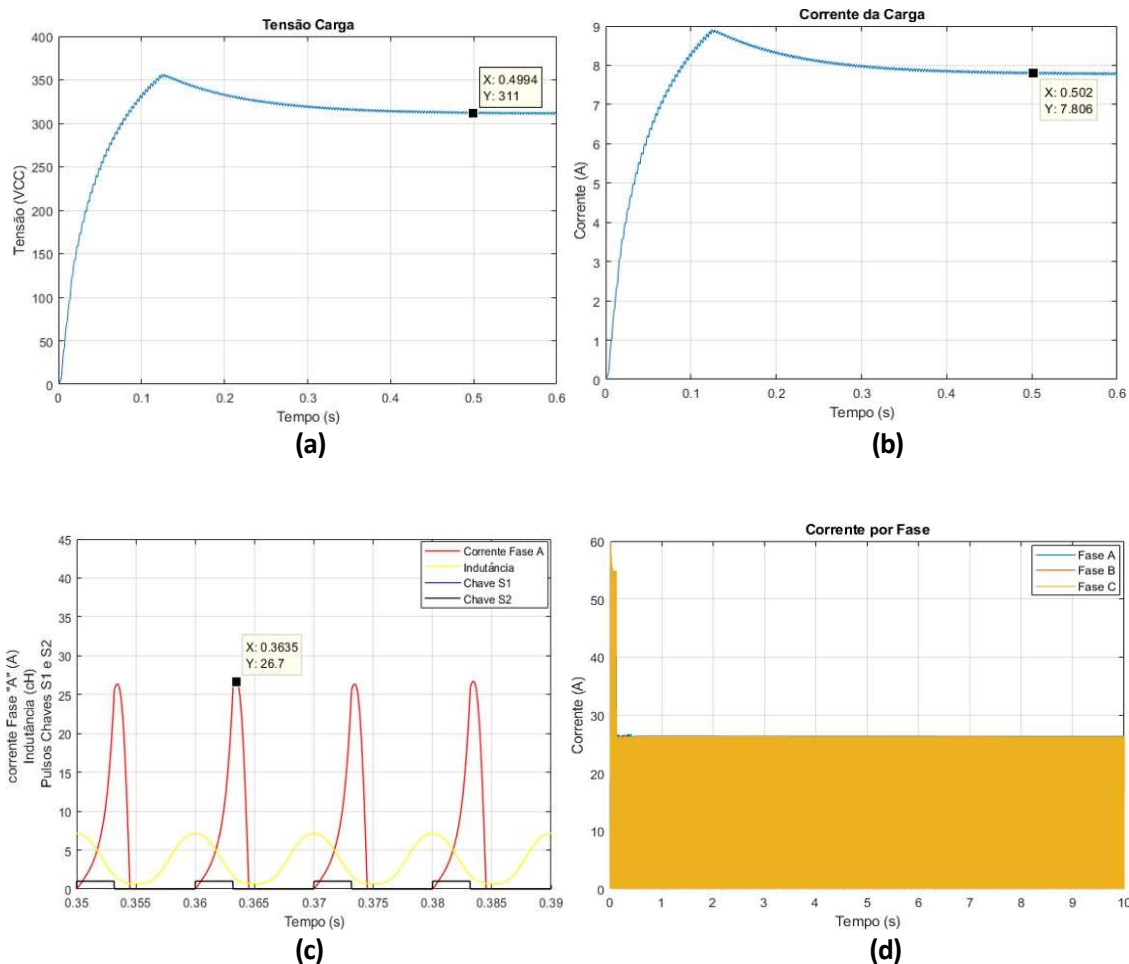


Figura 2.63 - Resultados da simulação em malha fechada método convencional com tensão de excitação de 150 VCC (a) Tensão gerada (b) Corrente carga (c) Disparo das chaves (d) Corrente na carga

6.3.4 Caso 04: Excitação: 150 VCC – Velocidade: 1500 rpm –carga: 40 Ω (Método *Flux boosting*)

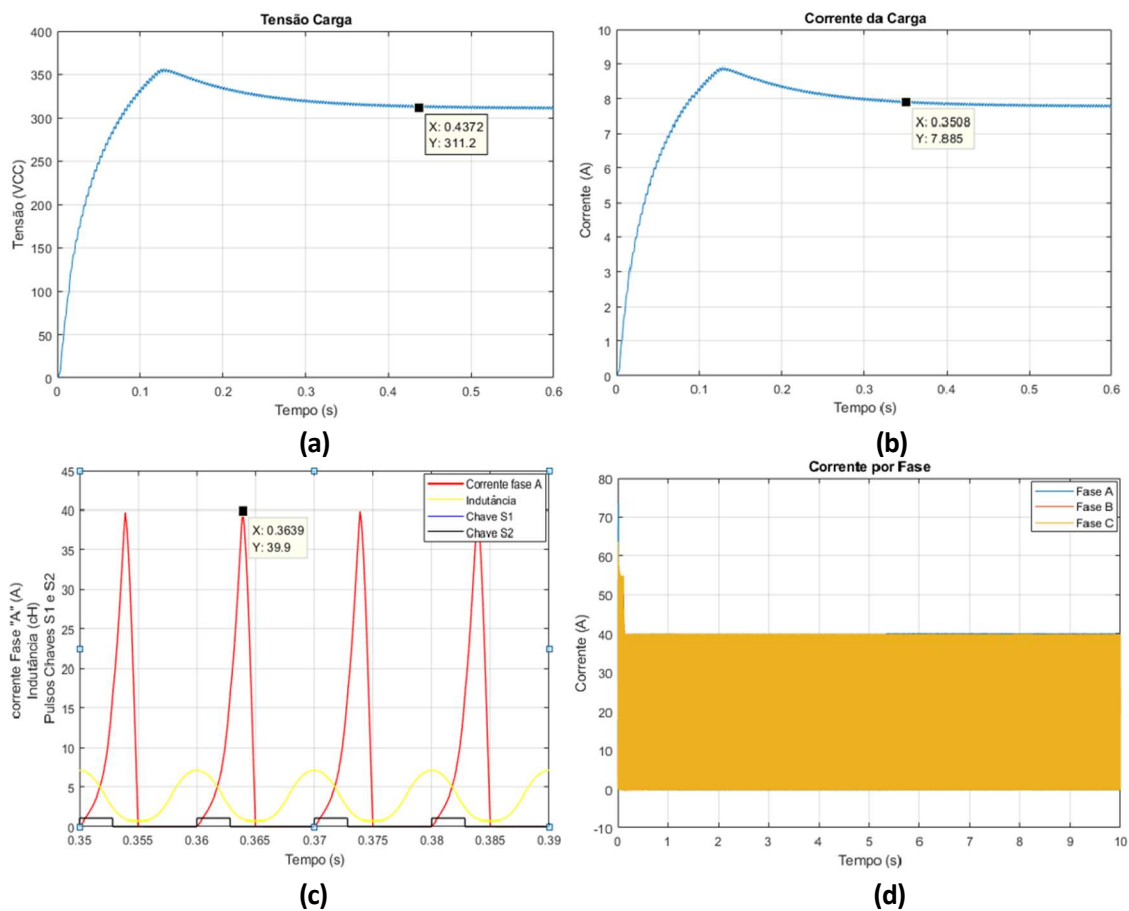


Figura 2.64 - Resultados da simulação em malha fechada método *Flux boosting*, com tensão de excitação de 150 VCC (a) Tensão gerada (b) Tensão na carga (c) Corrente gerada (d) Corrente na carga

6.3.5 Caso 05: Excitação: 250 VCC – Velocidade: 1500 rpm –carga: 40 Ω (Método Convencional)

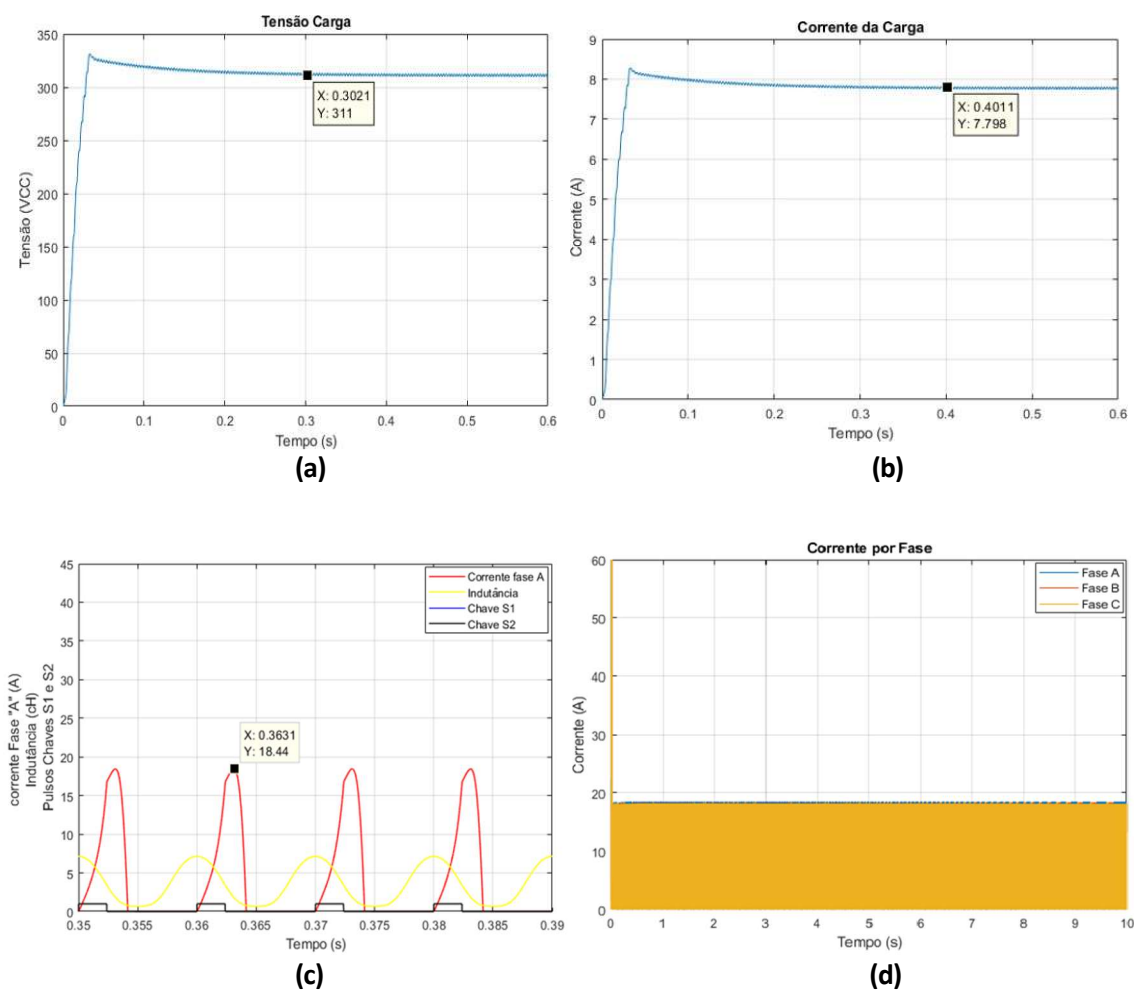


Figura 2.65 - Resultados da simulação em malha fechada método convencional com tensão de excitação de 250 VCC (a) Tensão gerada (b) Corrente carga (c) Disparo das chaves (d) Corrente na carga

6.3.6 Caso 06: Excitação: 250 VCC – Velocidade: 1500 rpm –carga: 40 Ω (Método *Flux boosting*)

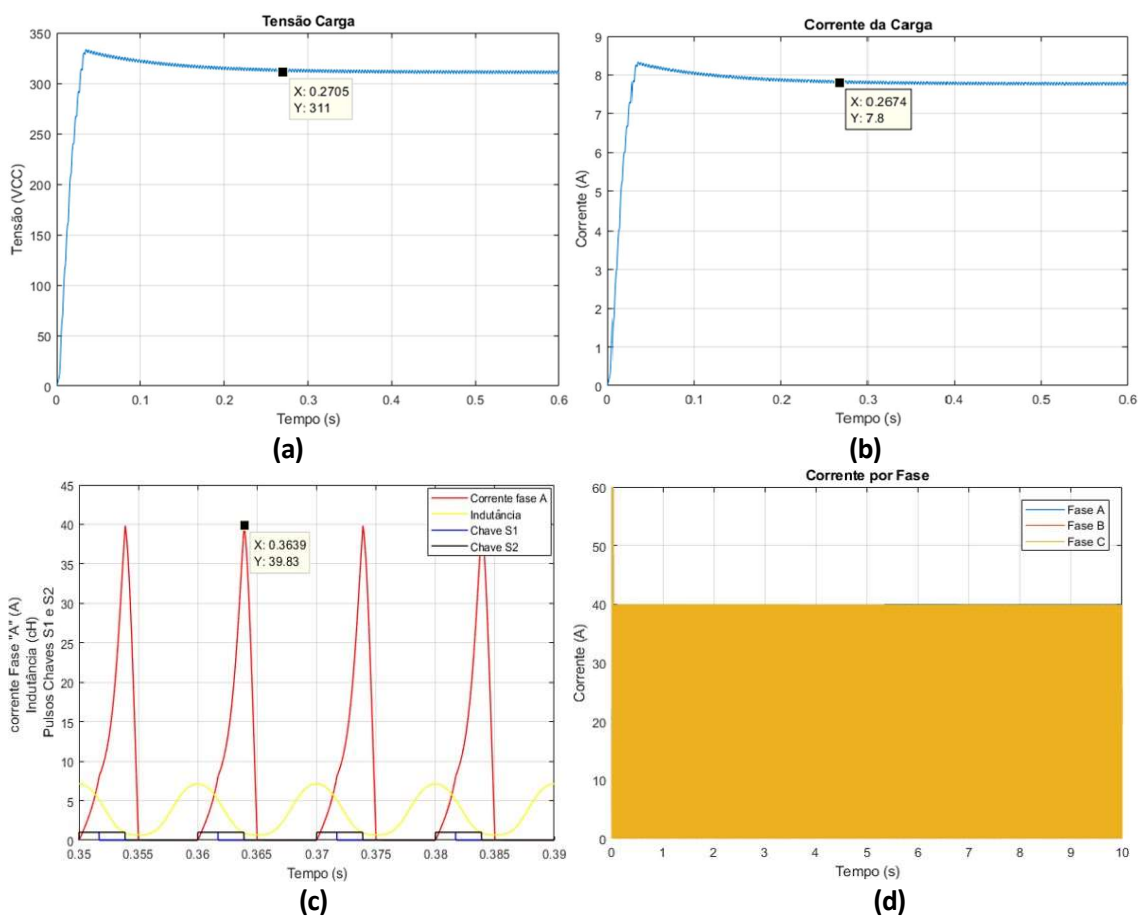


Figura 2.66 - Resultados da simulação em malha fechada método *Flux boosting*, com tensão de excitação de 250 VCC (a) Tensão gerada (b) Tensão na carga (c) Corrente gerada (d) Corrente na carga

6.3.7 Caso 07: Excitação: 200 VCC – Velocidade: 1000 rpm –carga: 40 Ω (Método Convencional)

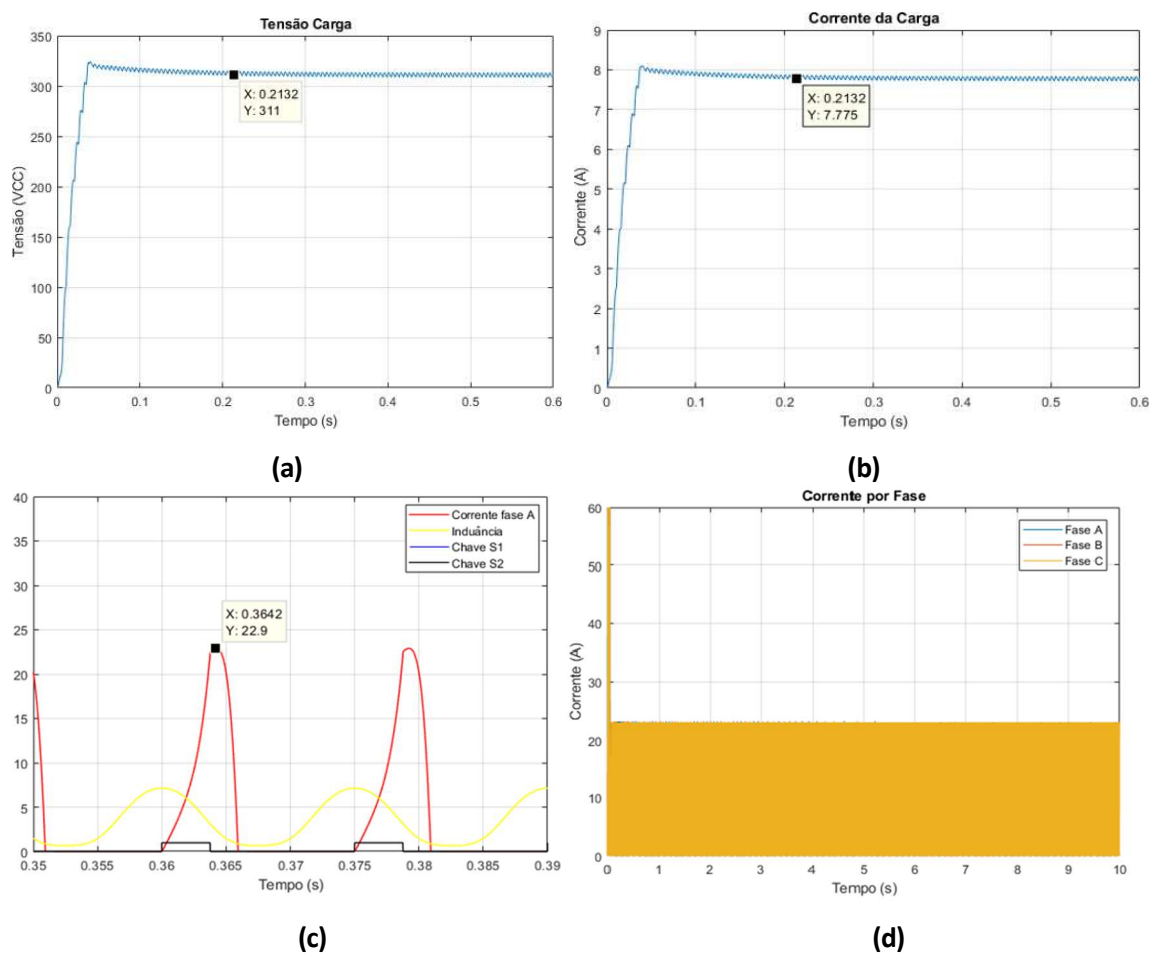


Figura 2.67 - Resultados da simulação em malha fechada método Convencional, com velocidade 1000 RPM (a) Tensão gerada (b) Tensão na carga (c) Corrente gerada (d) Corrente na carga

6.3.8 Caso 08: Excitação: 200 VCC – Velocidade: 1000 rpm –carga: 40 Ω (Método *Flux boosting*)

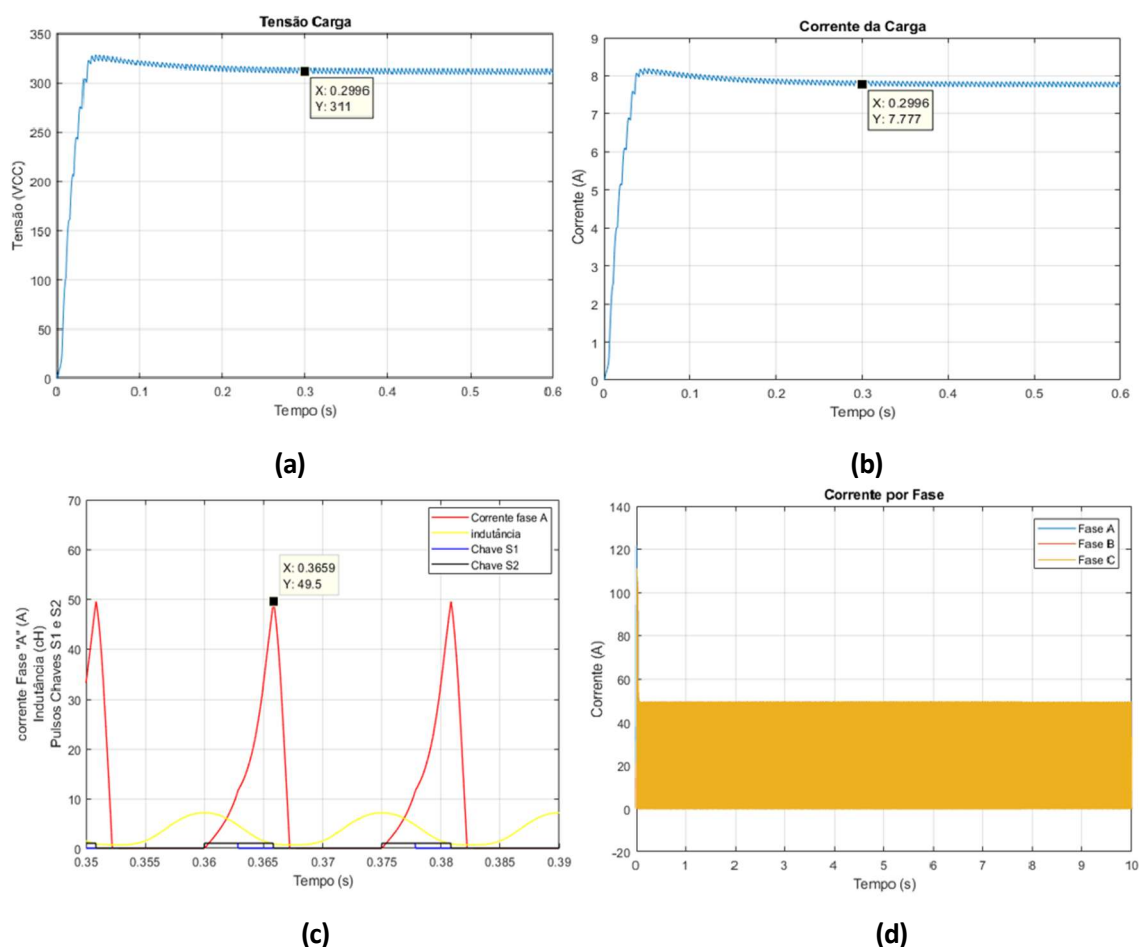


Figura 2.68 - Resultados da simulação em malha fechada método *Flux boosting*, com velocidade alterada 1000 RPM (a) Tensão gerada (b) Tensão na carga (c) Corrente gerada (d) Corrente na carga

6.3.9 Caso 09: Excitação: 200 VCC – Velocidade: 1250 rpm –carga: 40 Ω (Método Convencional)

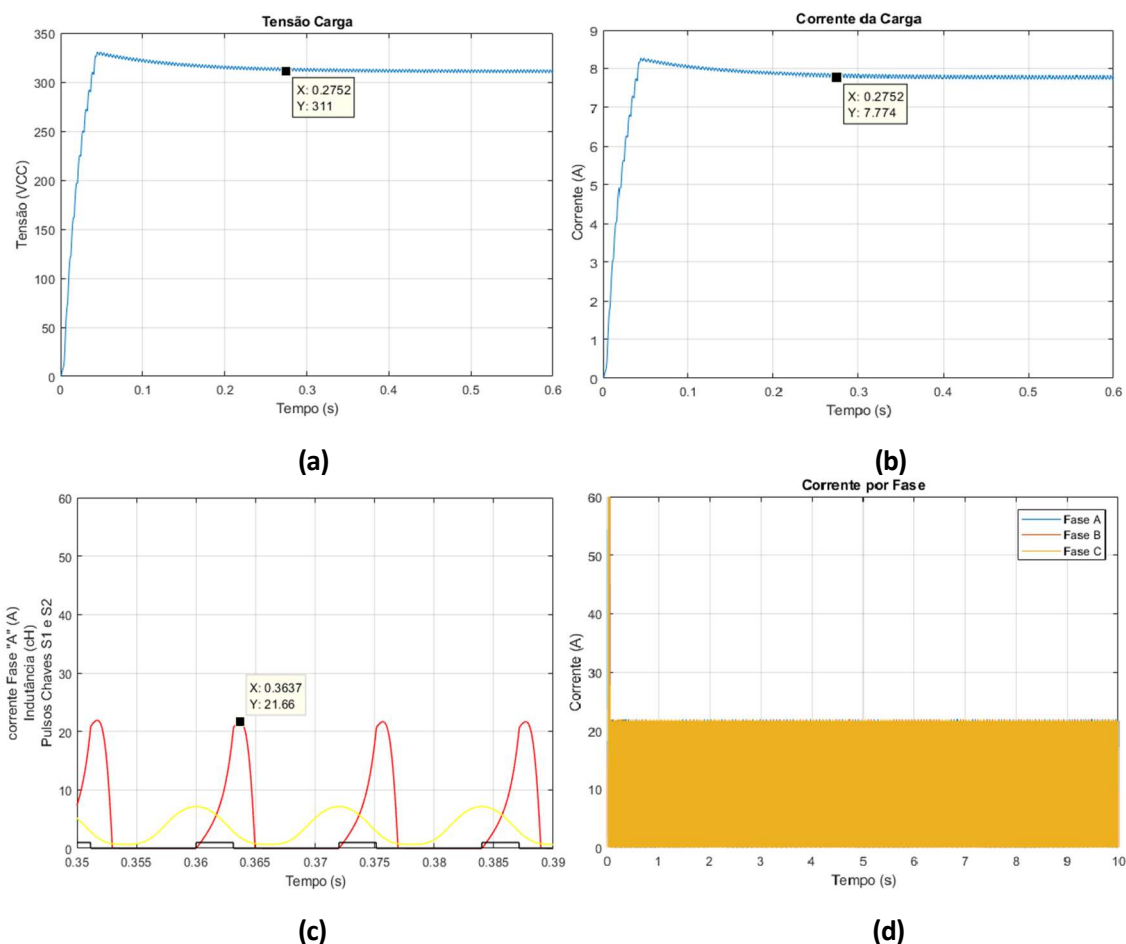


Figura 2.69 - Resultados da simulação em malha fechada método Convencional, com velocidade 1250 RPM (a) Tensão gerada (b) Tensão na carga (c) Corrente gerada (d) Corrente na carga

6.3.10 Caso 10: Excitação: 200 VCC – Velocidade: 1250 rpm –carga: 40 Ω (Método *Flux boosting*)

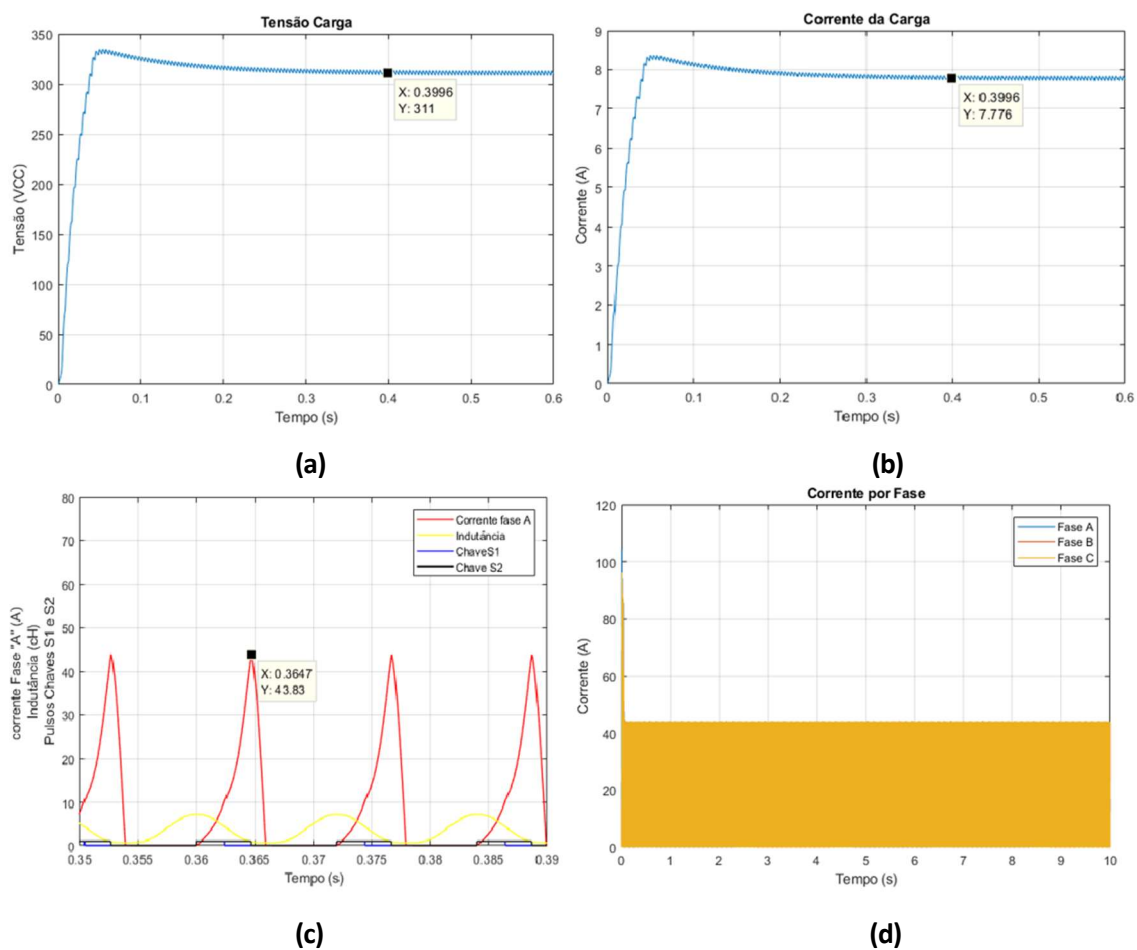


Figura 2.70 - Resultados da simulação em malha fechada método *Flux boosting*, com velocidade alterada 1250 RPM (a) Tensão gerada (b) Tensão na carga (c) Corrente gerada (d) Corrente na carga

6.3.11 Caso 11: Excitação: 200 VCC – Velocidade: 2000 rpm –carga: 40 Ω (Método Convencional)

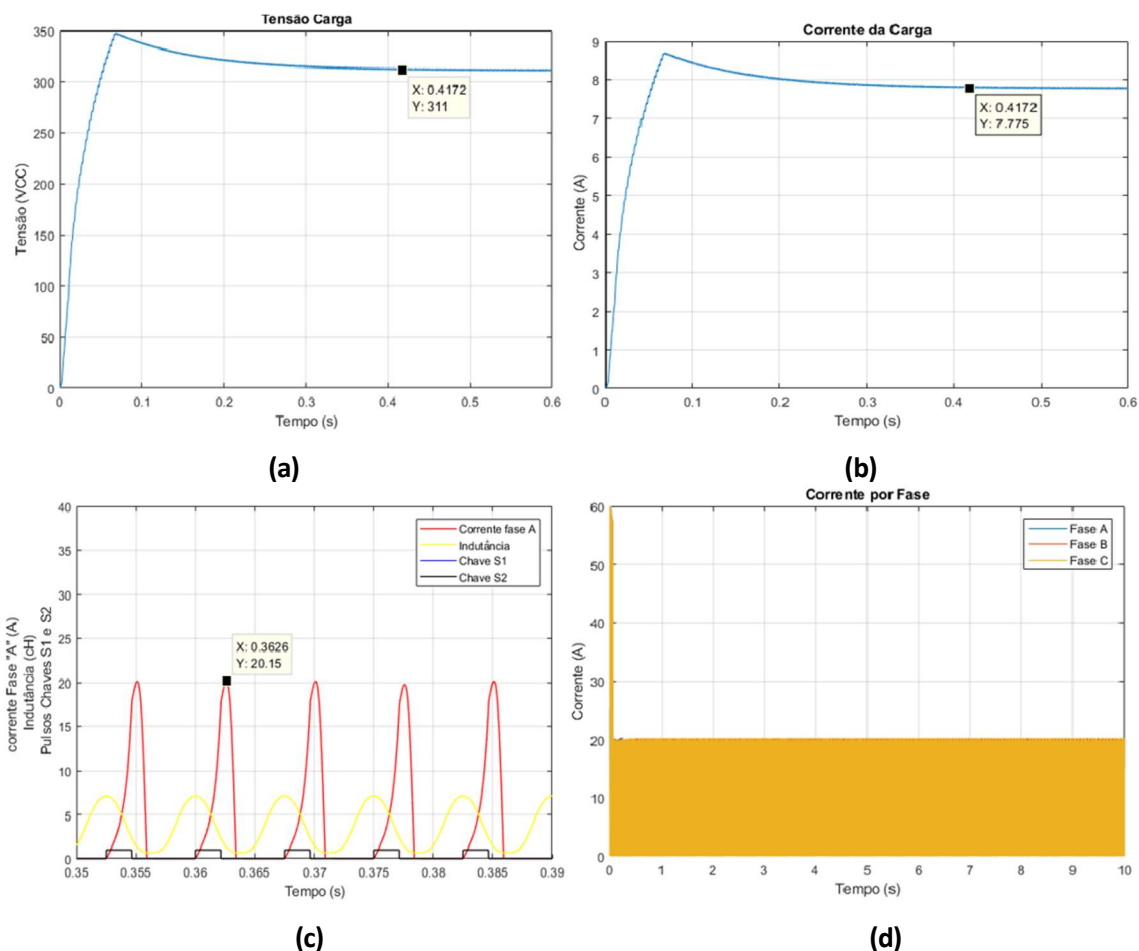


Figura 2.71 - Resultados da simulação em malha fechada método Convencional, com velocidade alterada 2000 RPM (a) Tensão gerada (b) Tensão na carga (c) Corrente gerada (d) Corrente na carga

6.3.12 Caso 12: Excitação: 200 VCC – Velocidade: 2000 rpm –carga: 40 Ω (*Flux boosting*)

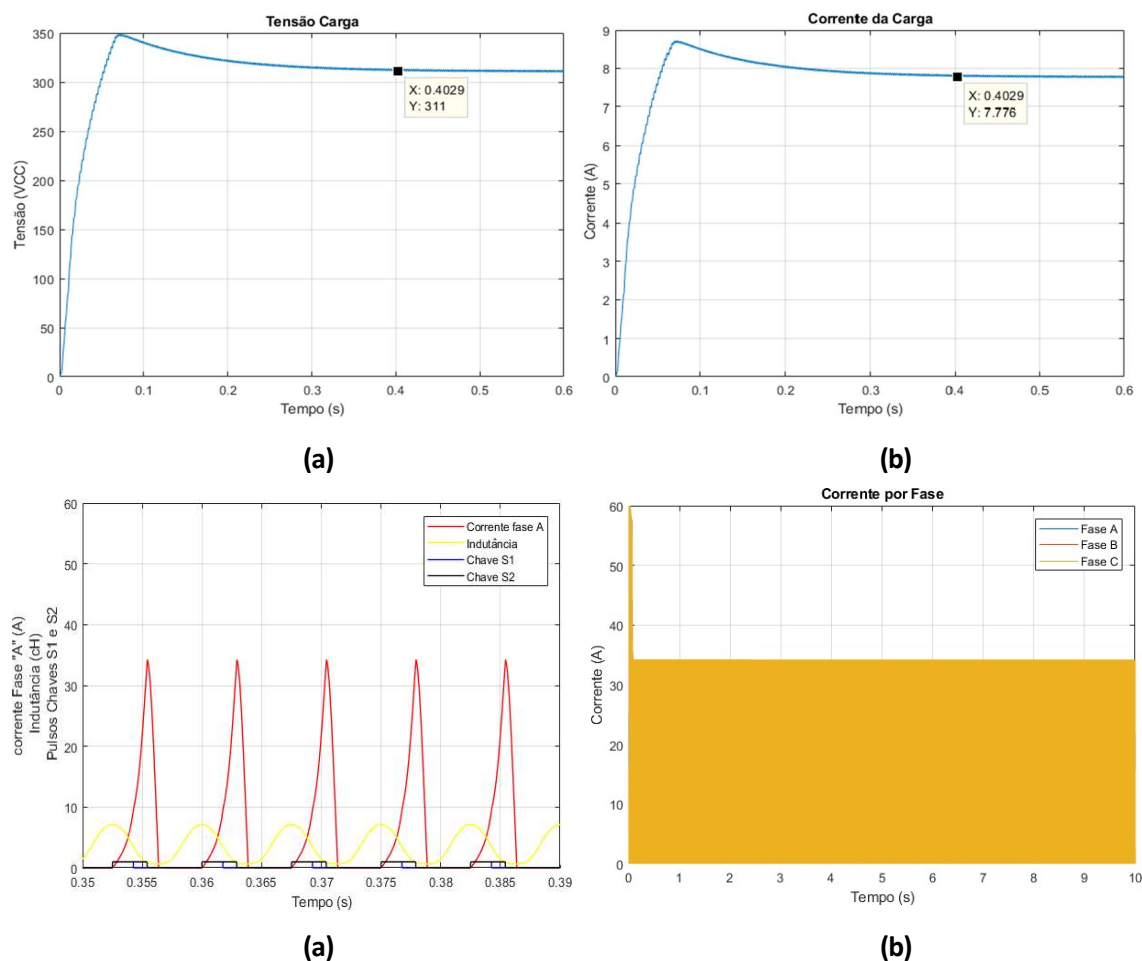


Figura 2.72 - Resultados da simulação em malha fechada método Convencional, com velocidade 2000 RPM (a) Tensão gerada (b) Tensão na carga (c) Corrente gerada (d) Corrente na carga

Para as simulações apresentadas nos casos de 01 a 06, continua a velocidade constante em 1500 rpm e realizar alterações na tensão de excitação variando de 100 V a 250 V, obteve-se comportamentos distintos, onde a tensão de excitação influencia diretamente na tensão gerada, demonstrando claramente no caso 01 e 02, com a tensão de excitação em (100 V), não foi possível atingir a tensão setada para a carga de (311 V), perdendo completamente a função de controle PI com a chave atuada em seu limite de controle. Para os demais casos de alteração de tensão de excitação demonstrado nos casos 03 a 06, o controle de tensão manteve a estabilidade esperada para os dois métodos adotados, ressaltado o tempo de estabilidade da tensão, que demonstra sinais inversamente

proporcional a tensão de excitação inserida, maior a tensão menor o tempo para a tensão da carga atingir valores de controle lineares, no caso da simulação 311 VCC.

Demonstrado nos casos 07 a 12 a alteração de velocidade da máquina de 1000 rpm a 2000 rpm, mantendo constante a tensão de excitação em 200 V e a carga em 40 ohms, obtendo valores satisfatórios de análises, onde em ambos os métodos encontrou-se a estabilidade da tensão após determinado período. Reforçando de forma intuitiva que o gerador a relutância variável tem a disponibilidade de trabalhar com diversas velocidades, mantendo o controle para a carga e desenvolvendo a potência necessária, tendo assim a velocidade pouca ação na tensão gerada.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Desenvolveu-se um estudo sobre o funcionamento e comportamento da Máquina a Relutância Variável, focada a aplicação a gerador. Explanado um breve estudo das vantagens e desvantagens em relação às outras máquinas elétricas em utilização atualmente.

Desenvolveu-se um modelo matématico que considera o aspecto de não linearidade do material magnético. um modelo computacional que representa com fidelidade todos os aspectos físicos de comportamento do gerador com controle de tensão dos metodos adotados, baseados na variação do ângulo de magnetização teta off.

O modelo citado no decorrer deste trabalho apresentam-se capazes de simular de forma consistente o comportamento dinâmico do Gerador a Relutância Variável em diversos regimes de operação como: Alteração da tensão de excitação, alteração da velocidade em malha aberta e malha fechada apresentado um estabilidade na tensão dos terminais, mantendo-se constante.

Realizou-se um estudo dinâmico do comportamento da tensão fornecida pelo Gerador a Relutância Variável frente a variação do ângulo de desmagnetização sendo proposta e desenvolvida computacionalmente uma técnica de controle de tensão baseado na variação deste ângulo, utilizando controle PI, aplicados a dois metodos de acionamento para analisar o comportamento denominado neste trabalho como método convencional e método *flux boosting*, com finalidade de buscar o máximo desempenho da máquina

As dificuldades encontradas durante o desenvolvimento deste trabalho se devem ao aspecto multidisciplinar do trabalho, a pandemia que trouxe um agravante da impossibilidade de contato com a máquina física para gerar os dados obtidos, e garantir na prática os resultados obtidos na simulação.

Baseado no desenvolvimento do modelo computacional para acionamento e simulação da Máquina a Relutância Variável 6/4 operando como gerador com controle de tensão no modelo PI, seguem algumas sugestões de temas a serem desenvolvidos em trabalhos futuros:

- Controle de velocidade do motor a partir da variação dos ângulos de desmagnetização;
 - Estudo de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*);
 - Estudo de injeção de potência na rede elétrica;
 - Controle de velocidade do motor a partir do controle de corrente no motor;
 - Acionamento da MRV como motor/gerador (Aplicações Veiculares);
 - Acionamento da MRV como gerador auto-excitado;
 - Controle da tensão gerada como gerador auto-excitado;
 - Ensaios acerca dos melhores pontos de operação e rendimento, operando como gerador ou como motor.
 - Investigação do comportamento da tensão gerada para grandes velocidades de acionamento.
 - Utilização do acionamento da MRV para o estudo de técnicas de injeção de potência ativa na rede.
 - Estudo comparativo entre a performance do acionamento da MRV quando acionada por FPGA e pelo controlador em tempo real.
 - Estudo comparativo entre os diferentes conversores eletrônicos de potência.
 - Estudo e implementação de técnicas de acionamento sensorless.
-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] UMANS, D. S, " **Maquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**", Máquinas elétricas, Vol. 7, 2014.
- [2] COELHO, A., " **Simulação, Projeto e Teste de um Gerador a Relutância Chaveado Trifásico 6x4**", Dissertação Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.
- [3] FLEURY, A. V. S., " **Modelagem, Construção, testes e Análise de Desempenho de um Gerador a Relutância Chaveado**", Tese de Doutorado, UFU - Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- [4] VIAJANTE, G. P., " **Gerador a Relutância Variável em Conexão Com a Rede Elétrica Para Injeção de Potência Ativa**", Tese de Doutorado, UFU - Universidade Federal de Uberlândia, 2013.
- [5] FIDELIS, R. T., " **Desenvolvimento de uma Plataforma Experimental Para o Acionamento da Máquina a Relutância Variável 6x4 Operando Como Gerador**", Trabalho de Conclusão de Curso, IFG - Instituto Federal de Goiás, 2015.
- [6] SILVEIRA A. F. V. " **Modelagem, Construção, Testes e Análise de Desempenho de um Gerador a Relutância Chaveado.**", Uberlândia, UFU, tese de doutorado, 2008.
- [7] SILVA, D. P. A., " **Desenvolvimento de uma Plataforma Experimental para o Acionamento da Máquina a Relutância Variável 6/4 Operado como Motor**", Trabalho de Conclusão de Curso, IFG - Instituto Federal de Goiás, 2016.
- [8] FIDELIS, R. T., " **Modelagem Matemática e Sistema Embarcado em DSP/FPGA para Acionamento e Controle de um GRV 8/6 com Estimativa em Tempo Real das Curvas de Indutância e Conjugado**", Dissertação de Mestrado, UFU - Universidade Federal de Uberlândia, 2018.
-

-
- [9] DIAS, J. R., "**Motores a Relutância Variável 6x4 e 6x6. Estudo Comparativo de Operação e Desempenho.**", Dissertação de Mestrado, UFU - Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- [10] BERNARDELI, V. R., "**Estudo Sobre o Comportamento do Gerador a Relutância Variável Operando no Modo Autoexcitado**", Tese de Doutorado, UFU - Universidade Federal de Uberlândia, 2014.
- [11] FERNANDES. C. B., "**Inversores para Veículos Elétricos: Aplicação do Controle Vetorial sem Sensor para um Motor de Indução**", Tese de Graduação, UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.
- [12] LEMES, L. J., "**Análise Dinâmica do Gerador Relutância Variável 6x4 Autoexcitado Operado em Malha Aberta**", Trabalho de Conclusão de Curso, IFG - Instituto Federal de Goiás, 2019.
- [13] JÚNIOR, L. C. M., "**Projeto e Implementação de um Sistema de Controle da Tensão Gerada para um Gerador Relutância Variável 6x4**", Trabalho de Conclusão de Curso, IFG - Instituto Federal de Goiás, 2017.
- [14] MELO, F. F. S., "**Encoder**", Trabalho de Instrumentação Eletrônica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008
- [15] CAI W., YI F. "**An integrated multi-port power converter with small capacitance requirement for switched reluctance motor drive,**" IEEE Trans. Power Electron., vol. 31, no. 2, pp. 3016–3026, Apr. 2016,
- [16] YI F., CAI W. "**Modeling, Control, and Seamless Transition of the Bidirectional Battery-Driven Switched Reluctance Motor/Generator Drive Based on Integrated Multiport Power Converter for Electric Vehicle Applications**", Transactions on Power Electronics, IEEE, Vol. 31, Issue 10, pag. 7099-7111, Oct. 2016,
- [17] FARADJIZADEH F., TAVAKOLI R., AFJEI E. S. "**Accumulator Capacitor Converter for a Switched Reluctance Generator**" IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, Issue 1, pag. 501-512, Jan. 2018,
-

-
- [18] RADIMOV N., BEN-HAIL N., RABINOVICI R. **“Switched Reluctance Machines as Three-Phase AC Autonomous Generator”**, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 11, pag. 3760-3764, November 2006,
- [19] KIM J., HÁ K., KRISHNAN R. **“Single-Controllable-Switch-Based Switched Reluctance Motor Drive for Low Cost, Variable-Speed Applications”**, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, Issue 1, pag. 379-387, Jan 2012.],
- [20] NETO, P. J. S., **“Otimização de desempenho do gerador de relutância variável aplicado em sistemas eólicos: uma abordagem via planejamento de experimento computacional”**, Dissertação Mestrado, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2017.
- [21] A. W. F. V. Silveira, D. A. Andrade, L. C. Gomes, C. A. B. JR e H. d. Paula, **“Generated voltage control in a switched reluctance motor/generator,”** Eletrônica de Potência, vol. 15, 2010.
- [22] H. Chen e G. J. J, **“Implementation of the Three-Phase Switched Reluctance Machine System for Motors and Generators,”** IEEE Transactions on Mechatronics, vol. 15, pp. 521-432, June 2010.
- [23] H. Peng e Y. Lingzhi, **“Increasing Output Power of Switched Reluctance Generator With Three-level Power Converter,”** Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011
- [24] BORGES. T. T., AZEVEDO, H. R. & ANDRADE, D. A., **"An Application of Fuzzy Logic for Reluctance Motor Drive"**, IEEE - International Electric Machines and Drives Conference Record. May, 1997, pp. TB1/10.1 - TB1/10.3.
- [25] ARAÚJO, W. R. H., **"Projeto e Construção de um Protótipo e Implementação de Estratégias de Chaveamento de um Motor à Relutância Chaveado"**, Dissertação Mestrado, UFG - Universidade Federal de Goiás, 2006.
-

[26] SOBREIRA. F. B., **"Controle de Velocidade Aplicado a um Sistema de Acionamento com Motor de Relutância Variável"**, Dissertação Mestrado, UFC - Universidade Federal do Ceará, 2008.

[27] BORGES. T. T., **"Motor a Relutância Chaveado com Controle Fuzzy e Detecção Indireta de Posição"**, Tese de Doutorado, UFU - Universidade Federal de Uberlândia, 2002.
