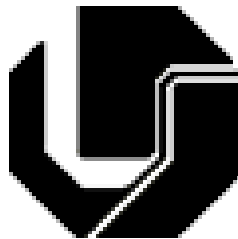


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**ESTUDO SOBRE O COMPORTAMENTO DO GERADOR A RELUTÂNCIA
VARIÁVEL OPERANDO NO MODO AUTOEXCITADO**

VICTOR RÉGIS BERNARDELI

JULHO

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TESE DE DOUTORADO

ESTUDO SOBRE O COMPORTAMENTO DO GERADOR A RELUTÂNCIA
VARIÁVEL OPERANDO NO MODO AUTOEXCITADO

Tese de doutorado apresentada por **Victor Régis Bernardeli** à Universidade Federal de Uberlândia para a **obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica** realizada em 03/07/2014 pela Banca Examinadora:

Prof. **Darizon Alves de Andrade**, PhD (UFU) – Orientador

Prof. Augusto W. F. V. Silveira, Dr. (UFU)

Prof. Luiz Carlos Gomes de Freitas, Dr. (UFU)

Prof. Kleiber David Rodrigues, Dr. (UFU)

Prof. Luis Guilherme Barbosa Rolim, PhD (COPPE/UFRJ)

Prof. Ivan Eduardo Chabu, Dr. (USP-São Paulo)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO SOBRE O COMPORTAMENTO DO GERADOR A RELUTÂNCIA
VARIÁVEL OPERANDO NO MODO AUTOEXCITADO**

TESE APRESENTADA POR VICTOR RÉGIS BERNARDELI À UNIVERSIDADE
FEDERAL DE UBERLÂNDIA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

DARIZON ALVES DE ANDRADE, PhD
Orientador

EDGARD A. LAMOUNIER JUNIOR, PhD
Coordenador do Programa de Pós-graduação stricto sensu em Engenharia Elétrica da UFU

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistemas de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil

B522e Bernardeli, Victor Régis, 1982-
2014 Estudo sobre o comportamento do gerador a relutância variável
operando no modo autoexcitado / Victor Régis Bernardeli. - 2014.
160 f. : il.

Orientador: Darizon Alves de Andrade.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia Elétrica - Teses. 2. Motores de Relutância Teses. I.
Andrade, Darizon Alves de, 1956 - II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDU: 621.3

DEDICATÓRIA

*Dedico esta tese a minha esposa Aline Vieira D.
Bernardeli que teve persistência e coragem de
mostrar o caminho, e também dado apoio nos
momentos mais difíceis, e as nossas filhas Alice
e Elisa, amo vocês.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria, antes de tudo, agradecer a deus por ter orientado em todas as etapas deste trabalho.

Gostaria de agradecer ao professor Darizon Alves de Andrade pela oportunidade, pelos ensinamentos, pelas sugestões.

Aos meus pais, Valdemar Bernardeli e Vera Lúcia Bernardeli.

Aos meus irmãos, Juliana Paula Bernardeli e Alex Sousa Bernardeli (*in memoriam*).

A todos meus familiares, pelo apoio incentivo e paciência.

Aos colegas e amigos, em especial prof. Augusto W. V. F. Silveira, Ghunter Paulo Viajante e Luciano Coutinho Gomes.

A todos os colegas do LACE, em especial Josemar Júnior, Felipe Santos, Marcos José de Moraes, Elvis Luiz Rodrigues.

Ao professor Haroldo Rodrigues Azevedo, pelos ensinamentos durante a graduação.

Por fim, não poderia de deixar agradecer aos funcionários da FEELT.

*“Senhor,
Tu és o Bom Pastor.
Eu sou a Tua ovelha,
Em alguns dias, estou sujo;
Em outros, estou doente.
Em alguns dias, me escondo;
Em outros, me revelo.
Sou uma ovelha ora mansa, ora agitada.
Sou uma ovelha ora perdida, ora reconhecida.
Eu sou Tua ovelha, Senhor.
Eu conheço a Tua voz.
É que às vezes a surdez toma conta de mim.
Eu sou tua ovelha, Senhor.
Não permita que eu me perca,
que eu me desvie do Teu rebanho.
Mas se eu me perder, eu Te peço, Senhor,
Vem me encontrar.
Amém.”*

Padre Marcelo Rossi

RESUMO

Bernardeli, V. R. Estudo sobre o comportamento do gerador a relutância variável operando no modo autoexcitado, Uberlândia, UFU, 2014.

Este trabalho apresenta uma contribuição ao estudo sobre o comportamento do Gerador a Relutância Variável operando no modo autoexcitado (GRVA). É realizado um extenso levantamento bibliográfico sobre o GRVA, e apresentada modelagem matemática que inclui a saturação do circuito magnético para representar a máquina. Aspectos da operação dinâmica da máquina a relutância variável trabalhando como gerador autoexcitado são explorados. Um capacitor carregado com uma tensão inicial, instalado em paralelo com a carga é utilizado como fonte de energia para iniciar a excitação da máquina. O gerador entrega à carga tensão e corrente CC. É feita uma análise do gerador com a aplicação de cargas resistivas em seus terminais e verificado teste de escorvamento para diferentes cargas com o gerador operando em malha aberta e posteriormente é feito o controle de corrente de fase e tensão gerada do gerador. Todo o conjunto é simulado utilizando o ambiente MatLab/Simulink® e resultados experimentais são incluídos para validar as discussões apresentadas.

Palavras-chave: *Gerador autoexcitado, máquina a relutância variável, modelagem matemática, controle de tensão, controle de corrente, velocidade variável, energia eólica.*

ABSTRACT

Bernardeli, V. R. Study on the behavior of Switched Reluctance Generator in self-excited operation mode, UFU, 2014.

Operation of a switched reluctance machine (SRM) as a self-excited generator is focused in this work. The investigation is supported by a thorough literature review, and uses a mathematical model that accounts for the non linearity between flux linkages and currents, a requirement to correctly represent the generator operation in the proposed mode. The method chosen to start the process of self excitation is the use of a partially charged capacitor, placed in parallel with the generator phases and also with the electrical load. This capacitor is also used to smooth the steady state D.C. generated voltage, delivered to the load. Beyond generated voltage build up characteristics, a comprehensive investigation on the generator operation, considering different primary speeds, variable primary speeds, different electrical loads, load rejection, phase loss is carried out. Generated voltage and current control circuits to accommodate the generator operation are proposed. A bench test platform developed to verify the theoretical finds is used and all the results obtained in the work are experimentally checked and found to be in good accordance with theoretical expectations. As a whole, the investigation shows that the use of SRM as a self excited generator is rather feasible and does not require unattainable circuitry or control strategies.

Keywords: *Self-Excited Generator, Switched Reluctance Machine, mathematical model, current control, voltage control, wind power.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Vistas em perspectiva e frontal do gerador a relutância variável 6x4.....	7
Figura 2.2 - Perfil genérico de indutância e corrente de fase em função da posição	8
Figura 2.3 - Diagrama de classificação dos principais métodos de excitação para o gerador a relutância variável.....	13
Figura 2.4 - Circuito do GRV representando uma fase, estratégia de excitação da fase com capacitor em série com as fases da máquina e com a carga	14
Figura 2.5 - Circuito do GRV representando uma fase, estratégia de excitação da fase com capacitor em paralelo com as fases da máquina e com a carga.	14
Figura 2.6 - Seção transversal da MRV evidenciando a adição de ímã permanente no estator.	15
Figura 2.7 - Circuito de conexão do GRV com o neutro conectado (a) e com o neutro desconectado (b).....	16
Figura 2.8 – Corrente de fase com o neutro conectado (a) e corrente de fase com o neutro desconectado (b) [16]	17
Figura 2.9 – Curva de fluxo concatenado por corrente [31].....	18
Figura 2.10 – Tensão no capacitor e análise harmônica da tensão [31]	18
Figura 2.11 - Diagrama de blocos de um GRV interligado a um veículo. [1]	22
Figura 2.12 – Diagrama de Blocos do SAEC. [66]	26
Figura 3.1 – Sistema de geração autoexcitado.	29
Figura 3.2 – Circuito de magnetização das fases do GRV no modo autoexcitado.....	29
Figura 3.3 – Circuito de desmagnetização das fases do GRV no modo autoexcitado	30
Figura 3.4 – Tensão gerada e corrente fase durante escorvamento	30
Figura 3.5 – Tensão gerada e corrente de fase evidenciando excitação e geração.....	31
Figura 3.6 – Curva de magnetização do gerador para diferentes posições e correntes.	32

Figura 3.7 – Circuito equivalente do GRV para uma fase.....	33
Figura 3.8 – Curva de magnetização típica para uma fase do gerador. [27]	34
Figura 3.9 – Representação Aproximada da Curva da Indutância utilizando “j” Segmentos de Linhas Retas.	37
Figura 3.10 - Indutância em função da posição dividida por segmentos de linhas retas [62] ..	41
Figura 3.11 – Perfil indutância obtido por meio da série de Fourier para diferentes valores de corrente e posição.	42
Figura 3.12- Perfil indutância (mH) obtido por meio da série de Fourier para diferentes valores de corrente e posição em três dimensões.	42
Figura 3.13 – Perfil de fluxo obtido por meio da série de Fourier para diferentes valores de corrente e posição.	44
Figura 3.14 – Perfil de conjugado obtido por meio da série de Fourier para diferentes valores de corrente e posição em três dimensões.....	46
Figura 3.15 – Corrente de fase [A] , Indutância incremental [H] - Resultados com o modelo que inclui a saturação magnética	47
Figura 3.16 - Tensão na carga -Resultados com o modelo que contempla a saturação magnética.....	47
Figura 3.17 - Tensão na carga - Resultados obtidos de simulação com modelo que não contempla a saturação magnética	48
Figura 3.18 - Curva de fluxo por corrente – Resultados obtidos de simulação que não contempla a saturação magnética	48
Figura 3.19 – Curva de fluxo por corrente – Resultados com o modelo que contempla a saturação magnética.....	49
Figura 4.1 - Diagrama de bloco do GRV.....	52
Figura 4.2 – Conversor HB utilizado	53

Figura 4.3 - Etapa 1: Excitação da fase A do gerador.	53
Figura 4.4 - Etapa 2: Excitação da fase A do gerador.	54
Figura 4.5 – Protótipo da MRV construída no Laboratório de Acionamentos Elétricos da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU.....	55
Figura 4.6 – Diagrama de blocos da plataforma de simulação implementada em ambiente MatLab	56
Figura 4.7 - Conversor HB implementado em ambiente Simulink.	57
Figura 4.8 - Diagrama de blocos da lógica de disparo das chaves	58
Figura 4.9 - Conjunto completo do gerador a relutância variável no ambiente <i>Simulink</i>	59
Figura 4.10 - Diagrama de blocos do subsistema para resolução das equações de estados utilizando s-function.....	60
Figura 4.11 - Circuito representativo, do gerador e do banco de capacitores.	61
Figura 4.12 - Tensão gerada e corrente na carga - Transitório de escorvamento.....	62
Figura 4.13 – Tensão e corrente na fase.	62
Figura 4.14 - Tensão e Corrente de carga 400 RPM- 40 ohm.....	63
Figura 4.15 - Tensão e Corrente de carga 600 RPM - 40 ohms	64
Figura 4.16 - Tensão e Corrente de carga 800 RPM - 40 ohms	64
Figura 4.17 - Tensão e Corrente de carga 1000 RPM - 40 ohms	64
Figura 4.18 - Tensão e Corrente de carga 1200 RPM - 40 ohms	65
Figura 4.19 - Tensão e Corrente de carga 1400 RPM - 40 ohms	65
Figura 4.20 - Tensão e Corrente de carga 1600 RPM - 40 ohms	65
Figura 4.21 - Tensão e Corrente de carga 1800 RPM - 40 ohms	66
Figura 4.22 - Tensão e Corrente de carga 2000 RPM - 40 ohms	66
Figura 4.23 - Tensão e Corrente de carga 2200 RPM - 40 ohms	66
Figura 4.24 - Tensão e Corrente de carga 2400 RPM - 40 ohms	67

Figura 4.25 - Curva de tensão gerada por velocidade para diferentes valores de carga.....	67
Figura 4.26 – Tensão [V] e corrente [A] na carga durante transitório de escorvamento	69
Figura 4.27 – Corrente nas fases A, B e C no transitório de escorvamento	69
Figura 4.28 – Corrente instantânea e média na fase A em regime permanente	70
Figura 4.29 - Tensão nas fases A, B e C no transitório de escorvamento	70
Figura 4.30 - Tensão nas fases A, B e C [V] em regime permanente	71
Figura 4.31 – Corrente no capacitor [A] no transitório de escorvamento	71
Figura 4.32 – Corrente no capacitor [A] – regime permanente.....	71
Figura 4.33 – Curva tensão na carga e corrente na carga	72
Figura 4.34 – Correntes nas fases A, B e C.....	73
Figura 4.35 – Correntes nas fases A, B e C.....	73
Figura 4.36 – Tensão na carga, correntes nas fases A, B e C.....	74
Figura 4.37 – Tensão na carga e correntes nas fases no momento rejeição de carga.....	74
Figura 4.38 – Tensão na carga e corrente nas fases no momento que volta a carga	75
Figura 4.39 – Tensão na carga e correntes nas fases.....	75
Figura 4.40 – Tensão na carga e correntes nas fases.....	76
Figura 5.1 – Região de excitação.....	80
Figura 5.2 – EIEG.....	80
Figura 5.3 – Região de geração	80
Figura 5.4 - Representação em diagrama de blocos do sistema completo	81
Figura 5.5 - Operação sem roda livre intermediária. Corrente da Fase A e Pulsos S_1 e S_2	83
Figura 5.6 - Tensão na carga transitório (a), regime permanente (b), tensão na fase A transitório (c), regime permanente (d).....	84
Figura 5.7 - Operação com EIEG. Corrente da Fase A e Pulsos S_1 e S_2	85

Figura 5.8 - Tensão na carga transitório (a), regime permanente (b), tensão na fase A transitório (c) e em regime permanente (d).	85
Figura 5.9 – Tensão na carga, correntes nas fases A,B e C.....	86
Figura 5.10 – Diagrama de blocos sistema de controle de corrente proposto	87
Figura 5.11 – Tensão na carga a), correntes nas fases b), corrente no banco de capacitores c) e tensão na fase A.....	88
Figura 5.12 – Diagrama de blocos sistema de controle de tensão e corrente.	89
Figura 5.13 – Tensão gerada, corrente fase A – Tensão Referência 80 V	89
Figura 5.14 - Tensão gerada, corrente fase A – Tensão Referência 100 V	90
Figura 5.15 - Tensão gerada, corrente fase A – Tensão Referência 120 V	90
Figura 5.16 – Velocidade máquina primária (turbina), Tensão na carga, Corrente na Fase A.	91
Figura 5.17 - Velocidade máquina primária (turbina), Tensão na carga, Corrente na Fase A.	92
Figura 6.1 – Visão geral da bancada experimental.....	95
Figura 6.2 – Bancada de testes do gerador a relutância variável.....	96
Figura 6.3 – Suporte, disco e sensores óticos de posição do rotor.	96
Figura 6.4 – Fontes isoladas para ataque de gatilho das chaves.....	97
Figura 6.5 – Circuito de disparo das chaves.....	97
Figura 6.6 – Diagrama circuito desenvolvido para ataque de gatilho das chaves.	98
Figura 6.7 – Esquema do circuito de ligação dos módulos IGBT.....	99
Figura 6.8 – Módulo <i>IGBT da Fuji Electric</i> , tipo 6MBI100S-060 (600V,100A).....	99
Figura 6.9 - Circuito equivalente do módulo IGBT	99
Figura 6.10 – Descrição geral do conversor Half-Bridge, fontes e circuito de disparos das chaves.	100
Figura 6.11 - Esquema geral do processador digital de sinais TMSF28335	102
Figura 6.12 – Esquema dos barramentos de dados, memória e de periféricos.....	102

Figura 6.13 – Foto do TMS320F28335 <i>eZdsp Starter Kit</i>	103
Figura 6.14 – Tensão na carga em regime permanente	104
Figura 6.15 – Tensão na fase em regime permanente.	104
Figura 6.16 – Transitório de tensão na carga (escorvamento).....	105
Figura 6.17 – Corrente (Canal 1) e tensão (Canal 2) na fase A em regime permanente.	106
Figura 6.18 - Tensão na carga (Canal 2) e corrente no capacitor (Canal 1) em regime permanente.....	106
Figura 6.19 - Corrente no banco de capacitores (canal 1) (a) e tensão na carga (canal 2) (b) no transitório de escorvamento.....	107
Figura 6.20 - Corrente no capacitor (canal 1) (a) e Tensão carga (canal 2) (b) em regime permanente.....	107
Figura 6.21 - Corrente na fase A (canal 1) (a) e tensão na fase A (canal 2)(b) em regime permanente.....	108
Figura 7.1 – Diagrama de Blocos do sistema implementado no DSP.....	111
Figura 7.2 - Placa de condicionamento de sinais digitais.....	113
Figura 7.3 - Placa de condicionamento de sinais analógicos.	113
Figura 7.4 – Fluxograma do código implementado.....	114
Figura 7.5 – Forma de onda corrente (canal 2 e 4) e tensão (canal 1 e 3) obtida para velocidade 1800 RPM e carga de 120 Ω (20 A).....	115
Figura 7.6 – Forma de onda corrente (canal 2 e 4) e tensão (canal 1 e 3) obtida para velocidade 1800 RPM e carga de 120 Ω (30 A).....	115
Figura 7.7 – Forma de onda corrente (canal 2 e 4) e tensão (canal 1 e 3) obtida para velocidade 1800 RPM e carga de 120 Ω (40 A).....	116
Figura 7.8 – Curva de tensão gerada por velocidade.....	116
Figura 7.9 – Fluxograma controle tensão	117

Figura 7.10 – Resultados controle de tensão velocidade 1800 RPM carga de 60 ohm referência 120 volts.	118
Figura 7.11 - Resultados controle de tensão velocidade 1800 RPM carga de 60 ohm referência 100 volts.	118
Figura 7.12 - Resultados controle de tensão velocidade 1800 RPM carga de 60 ohm referência 80 volts.	119
Figura 7.13 - Resultados controle de tensão velocidade 1800 RPM carga de 60 ohm referência 110 volts 1500 RPM a 2300 RPM.....	119
Figura 7.14 – Comportamento do gerador em velocidade variável com carga de 30 Ω	121
Figura 7.15 – Comportamento do gerador com velocidade variável com carga de 60 Ω	121
Figura 7.16 – Comportamento do gerador com degrau de carga	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Características do GRV	55
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CA	Corrente Alternada [A]
CC	Corrente Contínua [A]
T_{emag}	Conjugado eletromagnético [N.m]
T_m	Conjugado de carga [N.m]
D	Coeficiente de atrito viscoso [N.m.s/rad]
e	Força contra-eletromotriz gerada [V]
i	Corrente de fase [A]
I_a	Corrente na fase “a” [A]
I_{ref}	Corrente de referência [A]
J	Momento de inércia [Kg.m ²]
L	Indutância de fase [H]
L_a	Indutância máxima [H]
L_d	Indutância mínima [H]
m	Número de fases do motor à relutância
GRV	Gerador a Relutância Variável
GRVA	Gerador a relutância variável autoexcitado
MRV	Máquina a relutância variável
N_r	Número de pólos do rotor
p_e	Potência de entrada [W]
p_{ent}	Potência no entreferro [W]
R_f	Resistência de fase do motor [Ω]
RPM	Rotações por minuto

t	Tempo em segundos [s]
V	Tensão aplicada na fase do motor [V]
V_{dc}	Tensão do barramento de corrente contínua [V]
W	Watts (unidade de potência)
W'	Coenergia [J]
W	Energia armazenada no campo [J]
ω_m	Velocidade angular do rotor [rad/s]
λ	Fluxo enlaçado pela fase [Wb]
θ	Ângulo de deslocamento do rotor em radianos
HB	<i>Half-Bridge</i>
DSP	Processador Digital de Sinais
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
LACE	Laboratório de Acionamentos Elétricos
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
MLRV	Motor Linear a Relutância Variável
GMR	Grupo Motor de Partida a Relutância Variável
PWM	Pulse Width Modulation
SAEC	Sistema Armazenador de Energia Cinética
FEM	Força Eletromotriz

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	1
1.1 - Considerações iniciais	1
1.2 - Objetivo do presente trabalho	3
1.3 - Apresentação do conteúdo do trabalho	3
 CAPÍTULO 2.....	 6
2.1 - Introdução	6
2.2 - Estrutura da máquina a relutância variável	6
2.3 - Produção científica recente.....	8
2.3.1 - Âmbito nacional e internacional	8
2.3.2 - Âmbito Local.....	10
2.4 - Tipos de estratégia de excitação do gerador a relutância variável para produção de energia elétrica.....	12
2.4.1 – Estratégia de excitação através da adição de ímãs permanentes no estator.....	14
2.4.2 – Estratégia de excitação através da configuração do capacitor em série com o enrolamento de fase	16
2.4.3 – Estratégia de excitação através da configuração do capacitor em paralelo com o enrolamento de fase	17
2.5 - Aplicações da máquina a relutância variável	19
2.5.1 - Aeronáutica.....	19
2.5.2 - Veículos elétricos	21
2.5.3 - Energia eólica	22
2.5.4 - Armazenador Cinético de Energia (<i>Flywheel</i>).....	24
2.6 - Conclusão	26

CAPÍTULO 3..... 28

3.1 - Introdução	28
3.2 – Justificativa para utilização do modelo proposto	28
3.3 – Equações elétricas e mecânicas	32
3.4 – Representação do perfil de indutância por meio da série de Fourier.....	36
3.4.1 - Dependência da indutância com a corrente – indutância incremental	40
3.4.2 - Expressão analítica da co-energia levando em conta a saturação do circuito magnético	43
3.4.3 - Expressão analítica do conjugado levando em conta a saturação do circuito magnético.	45
3.5 – Resultados preliminares com o modelo proposto.....	46
3.6 - Conclusões	49

CAPÍTULO 4..... 51

4.1 - Introdução	51
4.2 - Conversor estático utilizado no acionamento.....	52
4.3 – Protótipo utilizado	54
4.4 – Modelo Computacional	55
4.5 – Análise de transitório elétricos	60
4.5.1 - Escorvamento	61
4.5.2 – Escorvamento com a inclusão de carga resistiva nos terminais da máquina.....	63
4.6 – Análise dinâmica do gerador	68
4.6.1 - Ensaio com o gerador operando com velocidade fixa	68
4.6.2 - Ensaio com o gerador operando com falta de fase.....	72
4.6.3 - Ensaio com o gerador operando com perda de carga.....	73
4.6.4 - Ensaio com o gerador operando com Rejeição de carga	75
4.6.5 - Ensaio com o gerador operando com curto-Circuito	75

4.7 - Conclusão	77
CAPÍTULO 5.....	78
5.1 - Introdução	78
5.2 - Controle de tensão.....	78
5.2.1 - Resultados de simulação em malha aberta.....	82
5.2.2 - Resultados de simulação em malha fechada	84
5.3 - Controle de corrente	86
5.4 - Controle de tensão e corrente	88
5.5 - Operação do GRV autoexcitado em velocidade variável.....	90
5.6 - Conclusões	92
CAPÍTULO 6.....	94
6.1 - Introdução	94
6.2 – Bancada de experimentos	95
6.3 – Processador Digital de Sinais (DSP)	100
6.4 - Resultados experimentais em malha aberta	103
6.4.1 – Resultados com carga de 40 ohms	105
6.4.2 – Resultados com carga de 60 ohms	106
6.5 - Conclusão	108
CAPÍTULO 7.....	110
7.1 - Introdução	110
7.2 - Descrição geral do sistema implementado	111

7.3 - Placa de condicionamento de sinais	112
7.4 - Controle de corrente	113
7.5 - Controle de tensão	117
7.6 - Ensaio em velocidade variável	120
7.7 - Ensaio com degrau de carga	121
7.8 - Conclusão	122
CAPÍTULO 8.....	124
8.1 - Conclusões finais	124
8.2 – Sugestão para trabalhos futuros	125

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a crescente demanda por fontes alternativas de energia houve um despertar na comunidade científica no sentido de investigar novas topologias de conversores eletromecânicos para produção mais eficiente de energia elétrica.

Entre esses novos conversores em estudo encontra-se a máquina a relutância variável (MRV) operando como gerador.

A MRV tem se mostrado uma forte candidata a ser utilizada como gerador devido às suas características intrínsecas, que são: robustez, ausência de enrolamentos e ímãs permanentes no rotor, boa relação peso/potência, capacidade de operar com falta de uma das fases, baixo custo de manutenção e fabricação.

Estas características positivas da MRV fizeram com que as investigações de caráter científico, relatando contribuições para o avanço de sua tecnologia, aumentasse significativamente do ano 2000 até o presente momento [01].

A grande maioria das investigações avaliam técnicas de controle da máquina operando como motor. Os trabalhos relacionados com a MRV operando como gerador são mais recentes.

A proposta desta tese está no estudo da operação da máquina a relutância variável como **gerador operando no modo autoexcitado**. Trabalhos anteriores desenvolvidos por esse grupo de pesquisa e outros pesquisadores [01-07] já demonstraram a eficácia da operação dessa máquina como gerador excitado por fontes externas de energia elétrica. As aplicações potenciais, a exemplo dos geradores autoexcitados tradicionais, são em locais isolados sem

atendimento de redes de energia elétrica, em veículos autônomos tais como aeronaves, veículos marítimos e terrestres.

Este trabalho se propõe contribuir com a análise e estudo detalhado do comportamento do GRV operando no modo autoexcitado em ambientes com velocidades de acionamento variáveis.

Como **motivação para o estudo** dessa alternativa estão:

- ✓ Avaliação de novas opções de conversores eletromecânicos para a produção de energia elétrica com vistas ao atendimento de comunidades isoladas e veículos autônomos;
 - ✓ Estudo de diferentes formas de acionamento para o GRV;
 - ✓ Aproveitamento da robustez da máquina a relutância variável;
 - ✓ Possibilidade de otimização de circuitos conversores estáticos para essas finalidades;
 - ✓ Otimização e ampliação das técnicas de controle digitais aplicadas a conversores eletromecânicos;
 - ✓ Projeto e montagem de um conversor estático utilizando chaves IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) controlado por DSP (*Digital Signal Processor*) adequado para o acionamento do GRV no modo autoexcitado em regime de velocidades variáveis e com diferentes valores de cargas.
-

1.2 - OBJETIVO DO PRESENTE TRABALHO

O objetivo principal do trabalho é o de ter uma ampla compreensão do comportamento da máquina a relutância variável (MRV), bem como a viabilidade técnica da operação como gerador autoexcitado. Para atingir tal objetivo os seguintes passos são seguidos:

- ✓ Compreensão do princípio básico de funcionamento do GRV, evoluindo posteriormente para representá-lo operando adequadamente no modo autoexcitado;
- ✓ Construção de um modelo matemático para operação da máquina neste modo;
- ✓ Desenvolvimento de uma plataforma para modelagem computacional;
- ✓ Simulação da operação do GRV procurando detalhar a dinâmica de operação da máquina;
- ✓ Ampliação e compreensão da operação dessa máquina no modo autoexcitado;
- ✓ Construção de um conversor e seus respectivos circuitos de acionamento a fim de obter comprovações nos desenvolvimentos experimentais;
- ✓ Desenvolver estratégias de controle adequadas para grandezas da máquina, a fim de obter tensão fixa nos terminais do gerador e verificar a estabilidade do controle;
- ✓ Por fim, este trabalho tem também o objetivo de preencher parcialmente os requisitos exigidos para a obtenção do Título de Doutor em Ciências do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

1.3 - APRESENTAÇÃO DO CONTEÚDO DO TRABALHO

A fim de alcançar os objetivos mencionados, o relatório dos resultados da pesquisa está organizado na seguinte forma:

O **capítulo II** mostra uma ampla revisão bibliográfica sobre a MRV operando no modo autoexcitado com a intenção de familiarizar com o assunto e escolher qual seria a filosofia da estratégia de excitação adotada para realização do trabalho.

O **capítulo III** apresenta o funcionamento dinâmico do gerador. O conceito de indutância incremental é apresentado, bem como, seu desenvolvimento e evolução para a apresentação do modelo que leva em conta a não-linearidade das relações fluxo-corrente e sua respectiva representação no espaço de estados.

O **capítulo IV** tem como objetivo principal analisar a operação dinâmica do gerador no modo autoexcitado, bem como apresentar resultados de simulação para diferentes variações de cargas conectadas nos terminais da máquina. Toda plataforma implementada em simulação é descrita e apresentada. Aqui, também, é justificada a aplicação do modelo não-linear na operação no modo autoexcitado.

O **capítulo V** apresenta uma proposta de controle de tensão aplicada ao gerador operando no modo autoexcitado. Os resultados obtidos com e sem controle de tensão são mostrados e comparados. É proposta, também, uma estratégia para controle de corrente de fase.

O **capítulo VI** apresenta o hardware utilizado para a construção da bancada de experimentos para acionamento da máquina. Os resultados experimentais obtidos são analisados e comparados com aqueles obtidos nas simulações computacionais.

O **capítulo VII** apresenta a operação do gerador em malha fechada. Os sinais de corrente de fase e tensão gerada são inseridos em uma malha de controle. A proposta é realizar o controle de corrente nas fases do gerador e também controlar a tensão gerada.

No **capítulo VIII** são apresentadas as conclusões finais do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL OPERANDO NO MODO AUTOEXCITADO: ESTADO DA ARTE

2.1 - INTRODUÇÃO

A máquina a relutância variável (MRV) existe desde os primórdios do desenvolvimento de máquinas elétricas em geral. Trata-se de uma máquina de saliência dupla cujo acionamento adquiriu confiabilidade com o advento e o desenvolvimento da eletrônica de potência. O acionamento elétrico dessa máquina como gerador recebeu atenção da comunidade científica nos últimos 15 anos. O foco da máquina em estudo visa principalmente aplicações que envolvem velocidades variáveis. O presente capítulo apresenta, em aspectos gerais, a utilização desse tipo de máquina para geração de energia elétrica, ou seja, a máquina operando como gerador. Este capítulo visa, também, situar o leitor sobre as contribuições significativas do estudo proposto, e apresenta os diferentes tipos de estratégias de excitação do gerador para produção de energia elétrica. A revisão bibliográfica tem como base artigos técnicos publicados e acessíveis, especialmente através da base de dados do sítio do *IEEE*.

2.2 - ESTRUTURA DA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

Um rotor e um estator, laminados, com polos salientes e bobinas restritas aos polos do estator caracterizam a Máquina a Relutância Variável (MRV) [08,09]. Um ou mais pares de polos opostos do estator formam uma fase [10,11] cujas bobinas, em enrolamentos concentrados, usualmente estão conectadas em série e, por isso, são percorridos pela mesma corrente [12-14]. Construtivamente é um conversor eletromecânico de estrutura simples como mostra a Figura 2.1. Seu acionamento requer uma fonte de excitação em corrente contínua

(CC), um conversor para seu acionamento e um circuito adequado para disparo das chaves. Deve-se observar que, o fluxo magnético nesse tipo de máquina sofre variações constantes com a posição rotórica e com a corrente de fase. As fases são tipicamente energizadas uma por vez e em sequência.

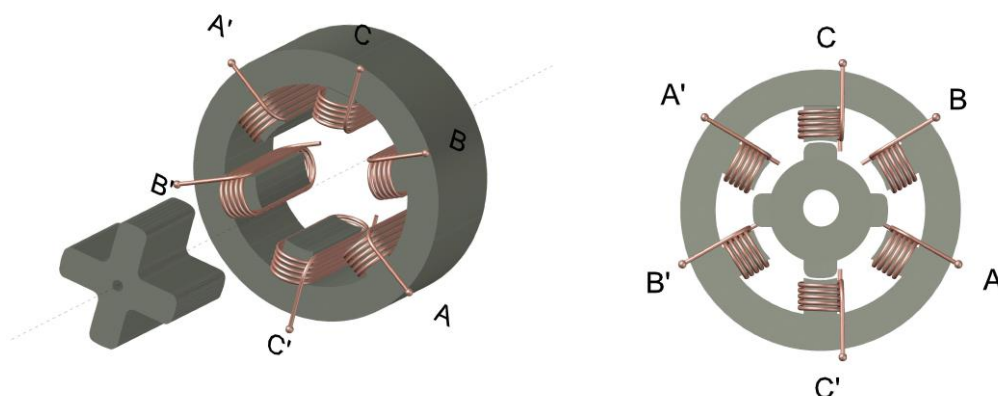


Figura 2.1 – Vistas em perspectiva e frontal do gerador a relutância variável 6x4

A exemplo de outros conversores eletromecânicos tradicionais, a máquina a relutância variável pode operar com fluxo bidirecional de energia, isto é, convertendo energia elétrica em mecânica (motor) ou convertendo energia mecânica em elétrica (gerador). A mudança de modo de operação se dá com o controle do período de condução de corrente nas fases, apropriadamente sincronizada com a variação das respectivas indutâncias, que ocorre como função da posição rotórica [15]. A figura 2.2 mostra o perfil de indutância idealizada com as respectivas correntes de fase da máquina operando como motor (indutância crescente) e gerador (indutância decrescente).

Este é o princípio fundamental de operação das máquinas a relutância variável. O gerador a relutância variável (GRV) destaca-se por sua robustez, baixo custo de produção e manutenção devido à ausência de escovas e enrolamentos no rotor, alta confiabilidade [16] e adequação a sistemas que operam com velocidades variáveis [17-19].

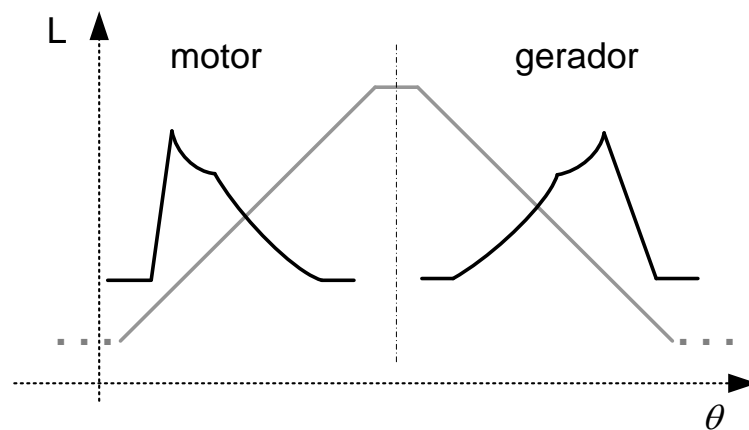


Figura 2.2 - Perfil genérico de indutância e corrente de fase em função da posição

2.3 - PRODUÇÃO CIENTÍFICA RECENTE

O início da produção científica no campo das MRV, tanto para motor quanto para gerador deu-se mais propriamente nos anos 1990 e aumentou significativamente a partir do início deste século.

Com o objetivo investigar as principais contribuições acerca do estudo da MRV, esta seção traz de forma breve e sucinta, uma revisão dos últimos trabalhos realizados em âmbito nacional e internacional. Por fim, a seção mostra também os trabalhos realizados com o tema pelo Laboratório de Acionamento Elétricos da UFU.

2.3.1 - Âmbito nacional e internacional

Do ano de 2010 até o momento foram publicados 636 artigos em conferências e 124 artigos em revistas segundo sítio do *IEEE Explorer* (*Switched Reluctance Machine*) relacionados a MRV. Para operação dessa máquina como gerador autoexcitado foram 9 artigos publicados no sítio do *IEEE Explorer* (*Self Excited Switched Reluctance Machine*).

Um dos primeiros trabalhos que estudam a MRV e sua dualidade como motor e gerador é tratado por Radun [12]. O trabalho aborda a operação da máquina em altas velocidades (17.500 RPM) para aplicações em aeronáutica.

O trabalho de Chen [02] apresenta um estudo sobre a operação da MRV operando como motor e gerador aplicada em tração elétrica. Características da operação em quatro quadrantes são tratadas e mostradas no trabalho.

Outros trabalhos tratam o estudo da MRV para aplicações automotivas [45-58, 75], a principal motivação do estudo é a operação em ambiente de velocidade variável.

A empresa fabricante de máquinas elétricas Weg, trabalha com motor de relutância variável aplicado em um carro modelo Land Rover. Segundo Curcio [74], a máquina ganhou espaço devido à alta do preço de materiais, terra-raras. Facilidades de manutenção, e ausência de ímã permanente, tem ganhado interesse para utilização deste tipo de máquina na área de veículos elétricos [74].

O trabalho de Oliveira [76] apresenta um estudo sobre a MRV operando como gerador. Comportamento da tensão e corrente para vários pontos de operação são apresentados. Testes experimentais foram realizados com um protótipo e mostram que o GRV pode ser robusto, eficiente e promissor para aplicações especiais.

A comparação entre diferentes topologias de MRV é feita por Coelho [77]. O trabalho propõe uma análise comparativa entre o GRV 6x4 e o GRV 6x6. A análise foi realizada e observou que ambas as topologias se adequam em ambiente de velocidade variável.

A investigação da operação da MRV controlada é tratada por Torrey [09]. O processo de conversão eletromecânica com controle é observado. A estrutura do controlador para aplicações em ambiente de velocidade variável é discutida. Controles de velocidade e tensão são implementados para acionar motor de partida/alternador em veículos elétricos.

O trabalho de Sozer [79] apresenta uma nova abordagem para o controle do GRV, a técnica é baseada no controle dos ângulos de comutação do gerador. É desenvolvido um algoritmo que determina os ângulos ótimos para produção da máxima potência gerada.

Existem na literatura outros trabalhos que abordam o controle do GRV visando extrair a máxima potência gerada [33, 36, 55], porém o foco é para aplicações eólicas.

Um novo método de controle para otimização da máxima eficiência de um sistema de geração utilizando a MRV é proposto por Husain [44]. O gerador em estudo é utilizado para carregamento de baterias.

Em [80] é feito um estudo sobre a estabilidade da tensão gerada, o sistema é autoexcitado. Ajustes dos ângulos de magnetização do gerador são feitos observando o comportamento da tensão gerada. Todos os testes são realizados com o gerador operando em malha aberta.

2.3.2 - Âmbito Local

O presente trabalho explora a máquina operando como gerador, contudo diversos trabalhos foram desenvolvidos no LACE (Laboratório de acionamentos elétricos) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) ao longo dos anos relacionados com esse tipo de máquina. O primeiro trabalho teve início, em 1998, com Borges [10] tendo o mesmo, papel importante no desenvolvimento de todos os trabalhos realizados. Este trabalho foi responsável pelo projeto e construção da MRV 6x4 (Seis polos no estator e quatro no rotor), com ensaio e levantamento dos parâmetros da máquina, e simulação dinâmica da mesma operando como motor. Nesta etapa teve a participação de Hwang [20], que estudou a implementação de controle de velocidade utilizando lógica Fuzzy e de uma técnica indireta de detecção da posição do rotor.

Modelagem, projeto, construção e o acionamento de um motor linear a relutância variável (MLRV) são tratados por Domingos [21], com o desenvolvimento de um modelo

matemático utilizando série de Fourier, o que permitiu simular a dinâmica do motor. Este deu base para implementar a modelagem não linear que será abordada no próximo capítulo.

A aplicação do motor a relutância variável no acionamento de cargas de potência fracionária é tratada por Costa [22]. A motivação principal é a perspectiva de economia de energia, conforme comprovado em Andrade et al [24], onde verificou-se que o motor a relutância variável é mais econômico do que o motor de indução gaiola no acionamento de cargas fracionárias. Neste trabalho, para a otimização do projeto do motor, técnicas de elementos finitos foram utilizadas.

Estudo sobre diferentes topologias de conversores estáticos é tratado por Teixeira [23] de uma maneira simples, permitindo acesso rápido às informações relevantes para o acionamento de MRV. Estratégia para a simulação completa, envolvendo a máquina, conversor e fonte, foi implementada e mostrada passo a passo. Foram escolhidas algumas topologias comumente utilizadas e seu respectivo controle foi montado e permitiu acionar motores a relutância variável de até três fases.

O problema de oscilação de conjugado é tratado por Bernardeli [25] com uma ampla revisão das estratégias de redução das oscilações de conjugado e implementação de um sistema de controle que permite o controle de conjugado. O trabalho propõe também um novo estimador de conjugado que permite avaliar o conjugado de MRV de até três fases.

Por fim, o último trabalho tratado pelo grupo com a máquina operando como motor foi desenvolvido por Dias [26], no qual são comparados dois motores a relutância variável de topologias diferentes 6x6 e 6x4, verificando vantagens e desvantagens de cada um deles.

A operação como gerador teve seu primeiro trabalho desenvolvido por Fleury [27], no qual foi apresentado um estudo sobre o gerador a relutância variável, e uma análise dinâmica de funcionamento, construção de um novo conversor para melhorar a eficiência de geração,

estudos sobre a aplicação deste tipo de máquina na geração eólica, e projeto e construção de um novo protótipo para melhorar a eficiência do processo de conversão eletromecânica.

O segundo trabalho sobre o tema foi realizado por Silveira [01], o autor faz um estudo da MRV operando como motor e gerador e sua aplicação na área automotiva. Apresenta, também, seis diferentes estratégias de controle para manter fixa a tensão na carga do gerador.

Nos trabalhos mencionados anteriormente que usam a MRV operando como gerador, a excitação é feita através de uma fonte de tensão contínua externa. A próxima seção mostra as diferentes formas de excitação do GRV.

2.4 - TIPOS DE ESTRATÉGIA DE EXCITAÇÃO DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Existem dois tipos de estratégia para excitar o GRV, conforme mostrado no diagrama de blocos da Figura 2.3, a primeira consiste em colocar uma fonte de corrente contínua (excitação independente) com uma tensão fixa [1],[4],[27] e a outra consiste em estratégia de operação no modo autoexcitado.

A primeira estratégia para propiciar a operação no modo autoexcitado consiste em adicionar ímãs permanentes na máquina durante o processo de fabricação. São inseridos ímãs permanentes no núcleo do estator de tal forma que este ímã cria um fluxo magnético e excita a máquina [28,29]. Esta estratégia apresenta algumas desvantagens, sendo a principal delas que, dependendo da velocidade da máquina primária que aciona o gerador, o fluxo magnético do ímã permanente não consegue excitá-lo.

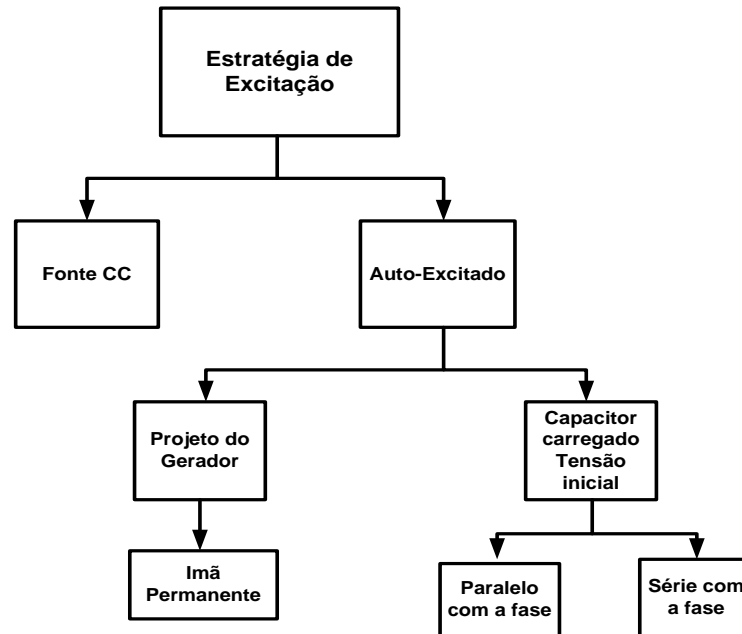


Figura 2.3 - Diagrama de classificação dos principais métodos de excitação para o gerador a relutância variável.

A segunda opção para iniciar o processo de autoexcitação do GRV é apresentada por [16],[30-33] que consiste em colocar o capacitor carregado com uma tensão inicial, em série com a carga, conforme pode ser visto na Figura 2.4, processo natural em que o circuito entra em ressonância gerando correntes e tensões alternadas (CA).

A terceira estratégia de excitação do gerador, apresentada no presente trabalho, é adicionar um capacitor parcialmente carregado em paralelo com os enrolamentos da máquina e com a carga, conforme pode ser visto na Figura 2.5, sendo que esta estratégia produz em seus terminais tensão e corrente CC. Uma grande vantagem em relação à colocação dos ímãs permanentes, é o de não intervir na fabricação da máquina e também pode ser utilizado em qualquer máquina.

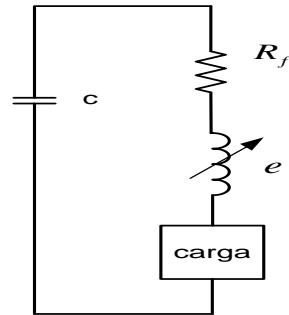


Figura 2.4 - Circuito do GRV representando uma fase, estratégia de excitação da fase com capacitor em série com as fases da máquina e com a carga

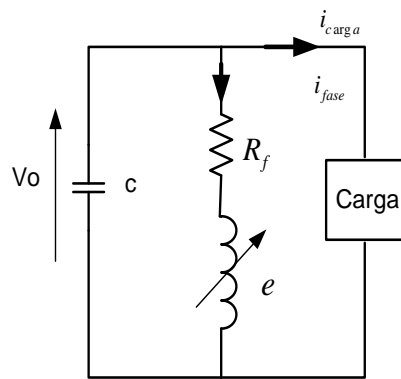


Figura 2.5 - Circuito do GRV representando uma fase, estratégia de excitação da fase com capacitor em paralelo com as fases da máquina e com a carga.

Tanto a estratégia de excitação com capacitor em série com o enrolamento de fase, e estratégia de excitação com capacitor em paralelo com o enrolamento de fase, podem ser utilizadas para produção CA. A principal diferença que para produção CC é utilizado um conversor estático para acionamento e para produção CA não é utilizado o conversor estático.

A seguir será mostrado um resumo sobre as três estratégias de operação da máquina dando ênfase para operação no modo autoexcitado.

2.4.1 - ESTRATÉGIA DE EXCITAÇÃO ATRAVÉS DA ADIÇÃO DE IMÃS PERMANENTES NO ESTATOR

A máquina a relutância variável operando como gerador não tem a capacidade de autoexcitação [28]. A adição de imã permanente nas várias posições do núcleo do estator é capaz de fornecer a excitação necessária para funcionamento da máquina no modo

autoexcitado. Este autor desenvolve uma verificação experimental desse novo princípio de autoexcitação. Simulações computacionais do novo princípio de autoexcitação usando um pequeno ímã permanente também foram conduzidas em estudos preliminares por Lipo [28]. Os ímãs permanentes podem ser colocados em várias posições do estator para prover o caminho do fluxo magnético e podem, também, ter vários tamanhos e formas. Resultados de simulações mostram que a quantidade necessária de fluxo magnético para excitar a máquina pode ser obtida fixando ímã permanente em cima dos polos da máquina. A Figura 2.6 mostra a seção transversal de uma MRV 6/4 evidenciando a adição de ímã permanente no estator. A proposta desse trabalho [28] é verificar experimentalmente a utilização do ímã permanente (cobalto) na autoexcitação do GRV e determinar a quantidade mínima requerida de fluxo magnético.

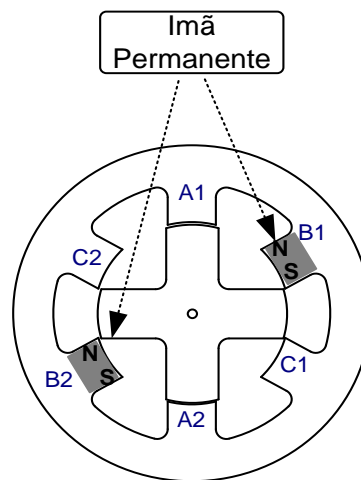


Figura 2.6 - Seção transversal da MRV evidenciando a adição de ímã permanente no estator.

O processo de operação do GRV no modo autoexcitado através da adição de ímãs permanentes foi realizado com sucesso para as configurações realizadas colocando o núcleo dos ímãs permanentes de lados opostos por fase.

Esta estratégia apresenta desvantagens, sendo as principais descritas a seguir:

- ✓ Dependendo da velocidade da turbina (máquina primária) que aciona o GRV e o valor da carga, o fluxo produzido pelo imã não consegue excitar a máquina;
- ✓ Aumento do custo de fabricação da máquina;
- ✓ Intervenção na fabricação da máquina;

2.4.2 - ESTRATÉGIA DE EXCITAÇÃO ATRAVÉS DA CONFIGURAÇÃO DO CAPACITOR EM SÉRIE COM O ENROLAMENTO DE FASE

O trabalho de Radimov [16],[32] apresenta a operação da máquina a relutância variável como um gerador trifásico autoexcitado, utilizando a configuração do capacitor em série com a fase. Dois circuitos são propostos, conforme é mostrado na Figura 2.7. O circuito consiste de apenas um capacitor por fase e carga e não contém qualquer fonte de alimentação.

São apresentados estudos por meio de simulações computacionais do GRV autoexcitado de três fases. É feita uma análise da influência do terceiro harmônico na corrente da fase sobre a qualidade da potência gerada.

Resultados de simulação e resultados experimentais são apresentados através de dois tipos de conexões, uma conexão Y-Y com o neutro ligado e uma conexão Y-Y com neutro isolado, conforme mostrado pelas Figuras 2.7(a) e 2.7(b), respectivamente.

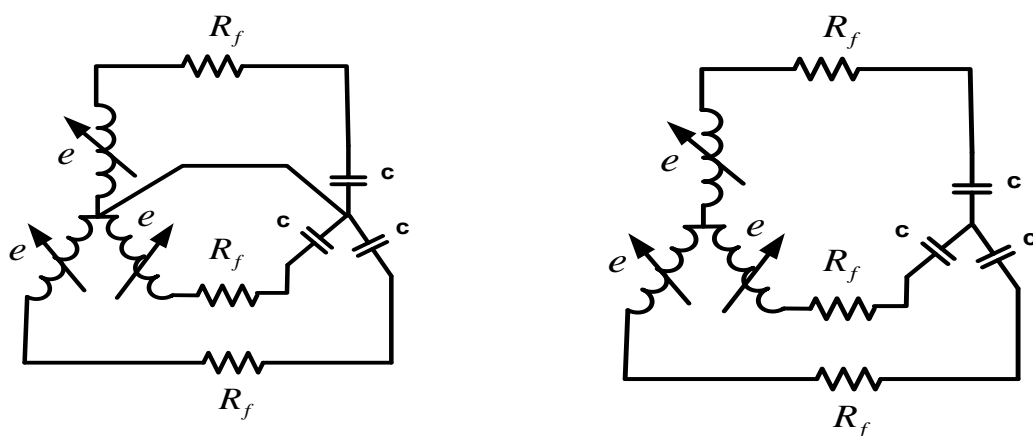


Figura 2.7 - Circuito de conexão do GRV com o neutro conectado (a) e com o neutro desconectado (b)

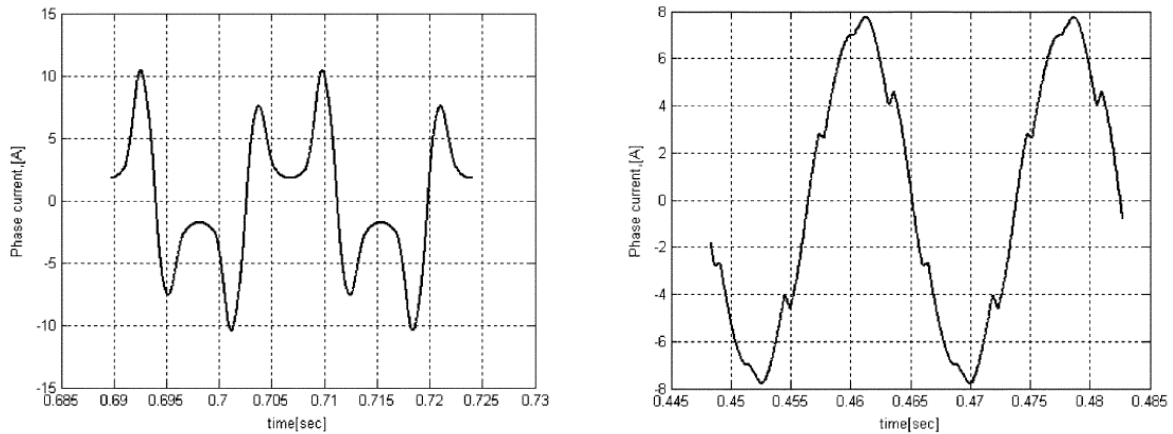


Figura 2.8 – Corrente de fase com o neutro conectado (a) e corrente de fase com o neutro desconectado (b) [16]

As conclusões da investigação são que, o terceiro harmônico é que influencia fortemente no perfil de corrente da fase na configuração Y-Y com neutro ligado, conforme pode ser observado pela figura 2.8(a). A rejeição no terceiro harmônico na corrente da fase, no GVR trifásico com neutro isolado, produz um efeito indesejado, conforme observado pela figura 2.8(b). Ele causa na operação do GRV uma alta saturação magnética no estator na posição de alinhamento do rotor. As perdas nos enrolamentos crescem e, como resultado, o fator de potência e eficiência diminui. A potência de saída do gerador com o neutro conectado é melhor para a geração do que com o neutro desconectado. Portanto, o circuito de conexão com o neutro foi o preferido devido ao elevado fator de potência na saída e menores perdas.

2.4.3 - ESTRATÉGIA DE EXCITAÇÃO ATRAVÉS DA CONFIGURAÇÃO DO CAPACITOR EM PARALELO COM O ENROLAMENTO DE FASE

O trabalho de Martinez [30, 31, 35] descreve o comportamento da máquina a relutância variável operando como gerador autoexcitado. O princípio de operação para geração é feito através da inclusão do capacitor parcialmente carregado em paralelo com a fase e com a carga. A estratégia adotada é usada na geração de tensão e corrente alternada pelo princípio de ressonância obtida pelo circuito RLC paralelo. O trabalho descreve passo a passo as regiões

de operação da máquina dentro do ciclo de ressonância. A frequência da forma de onda da tensão e corrente de saída da máquina é dada pela seguinte equação:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{MAX} \cdot C}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{MIN} \cdot C}} \quad (2.1)$$

Onde L_{MAX} e L_{MIN} é a indutância máxima e mínima respectivamente, C é o valor da capacitância e f é a frequência de operação da máquina primária.

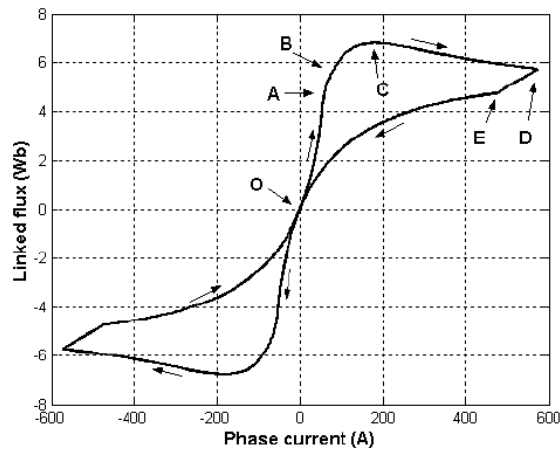


Figura 2.9 – Curva de fluxo concatenado por corrente [31]

A figura 2.9 mostra a curva de fluxo concatenado por corrente para operação do GRV em corrente alternada. A operação do gerador obedece a uma trajetória que é definida pelos valores de indutância máxima e mínima, capacitância, velocidade de operação do gerador e carga.

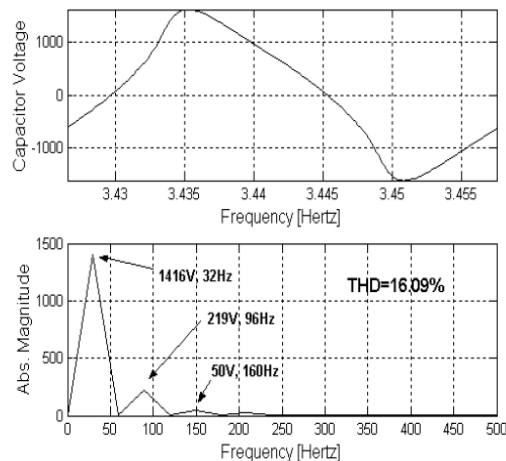


Figura 2.10 – Tensão no capacitor e análise harmônica da tensão [31]

A figura 2.10 mostra a tensão no capacitor e respectiva análise harmônica para a forma de onda. De acordo com os autores, neste ensaio a taxa de distorção harmônica foi de 16,9%. Esta taxa elevada é um dos problemas encontrados para operação do gerador em corrente alternada.

Outro problema também encontrado neste tipo de estratégia está na frequência da tensão e corrente gerada, que é em função da velocidade de operação do gerador, ou seja, a estratégia torna-se possível para aplicações com velocidade fixas no eixo do gerador.

O segundo trabalho apresentado por Kioskeridis [36] apresenta uma investigação sobre o problema do ajuste do ponto ótimo para obter a máxima eficiência de conversão eletromecânica. O controle determina os ângulos ótimos “teta on” e “teta off” no modo pulso simples de tensão. A estrutura do controle, não é baseada no conhecimento das curvas de magnetização. Esse método possibilita a operação do gerador em uma ampla faixa de variação de velocidade.

2.5 - APLICAÇÕES DA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

A seção anterior apresentou uma revisão sobre investigações da MRV, apresentando os trabalhos desenvolvidos sobre motor e gerador. Na aplicação da máquina como gerador foi investigado sobre a necessidade de uma fonte elétrica ou magnética para excitação do gerador. A configuração capacitor em paralelo com a fase será a utilizada devido a sua adequação para operação em velocidade variável. De acordo com a literatura, o GRV encontra aplicações potenciais em: aeronáutica, veículos elétricos, energia eólica e armazenamento cinético de energia.

2.5.1 - Aeronáutica

Em grande medida foi o programa More Electric Aircraft (MEA), da Força Aérea Americana, que provocou o início de trabalhos e experimentos, especialmente os relacionados

à operação desta máquina como, Gerador Motor de Partida a Relutância (GMR) [38] acoplado diretamente ao eixo das turbinas de aviões e, também, como Motor a Relutância (MR) integrante de futuros sistemas auxiliares substitutos dos sistemas hidráulicos usados nas aeronaves. As metas estabelecidas pelo MEA foram: eliminar os componentes hidráulicos, diminuir peso e volume, aumentar a confiabilidade e a resistência a impactos em operações, diminuir custos de apoio especializado e alimentar novos dispositivos militares a bordo. Por se tratar de sistema de defesa, a quantidade de empresas e de recursos envolvidos foi proporcional às metas. Segundo [39], nesse cenário, com suas características e vantagens, o GMR acoplado diretamente ao eixo da turbina é uma possibilidade interessante como principal fonte de alimentação elétrica das futuras aeronaves. Neste caso, a tensão de serviço foi fixada em 270 V CC [40].

De modo paralelo, com as potências chegando ao patamar de 150 kVA e previsão de crescimento acentuado de demanda nos próximos anos – estima-se até 500 kVA [41], o abastecimento elétrico de aeronaves civis também chamou a atenção da comunidade científica e das empresas. A máquina síncrona é a mais usual em aviões comerciais e militares. Entretanto, funciona com transmissão mecânica variável para resolver a estabilização da frequência (400 Hz). Isso resulta em peso, custo elevado e ineficiência; além de impactar a confiabilidade do sistema gerador [41].

Segundo Skvarenina [41], na ocasião ainda eram insuficientes os trabalhos desenvolvidos para que fosse fixada a opção pela MRV nas aeronaves.

Detalhes de simulações com MRV para MEA aparecem em [42]. O controle em regime de velocidade variável do GMR acoplado diretamente à turbina do avião é tratado em [44]. Um projeto desta máquina foi apresentado em [43] e contempla o conversor. Um protótipo foi construído para operar na faixa que vai do repouso da aeronave até 48.000 rpm. Essa máquina opera como GMR. Funcionando como motor, a máquina mantém a turbina na rotação de

espera e, quando solicitada, acelera a turbina até o ponto de ignição. Os resultados experimentais mostraram a manutenção do torque e da potência gerada ao longo de toda a faixa de velocidades operacionais do GMR. Uma vez disponível potência mecânica suficiente na turbina, o GMR atua como gerador, alimentando cargas a bordo. O controle desenvolvido atua sobre a largura e o avanço do pulso de excitação tendo como objetivo a estabilização do torque no modo motor e da corrente no modo gerador.

A referência ao fato de uma MRV mudar facilmente o seu modo de operação entre motor e gerador é recorrente e decorre das investigações sobre sua possível aplicação como GMR em aeronáutica [45]. Esta dualidade incentiva estudos de aplicações para atender a cargas específicas como as automotivas. Esse atrativo, em paralelo com vários outros já citados, também sugere o emprego dessas máquinas em programas espaciais, como pode ser visto em [46]. Há, ainda, estudo sobre o uso de GRV em veículos não tripulados. Os requisitos desejados são: tamanho, peso e baixa emissão eletromagnética para evitar detecção [47].

2.5.2 - Veículos elétricos

A indústria automobilística vem incorporando novas cargas aos automóveis visando segurança, desempenho e conforto. Controle de direção, de frenagem e de tração, acelerador eletrônico, suspensão ativa, catalisador eletrostático e função *stop and go* para diminuir a poluição são exemplos [27].

O redimensionamento dos sistemas elétricos automotivos atuais está em curso e o gerador e motor a relutância variável (GMRV) surge como opção. Além das vantagens já mencionadas, bom conjugado de partida, alta eficiência em um cenário de correntes mais intensas, menor número de peças, operação em altas temperaturas e menor vibração são vantagens adicionais citadas em favor do GMR pela indústria automotiva [47]. O desejado é a integração do motor de partida com o alternador usando o GMRV. Em [48] é apresentada

uma estratégia de controle em uma máquina pequena 6/4 e foi encontrada uma relação empírica para a máxima corrente gerada pela máquina.

A Figura 2.11 mostra o diagrama de blocos de um GMRV interligado a um veículo, a elevação do barramento de 14V para 42V, permite reduzir a corrente elétrica necessária para suprir a demanda crescente de potência. Com isso a bitola dos fios diminui, o que leva a uma economia e redução de peso e custo de instalação [01]

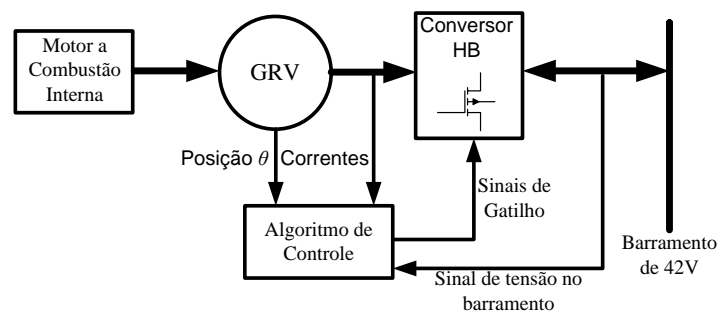


Figura 2.11 - Diagrama de blocos de um GRV interligado a um veículo. [1]

2.5.3 - Energia eólica

Os limites das reservas de petróleo conhecidas e o poder poluente excepcionalmente agressivo da carbonização da matriz energética mundial provocam esforços contínuos para a viabilização de fontes alternativas de energia primária limpa, entre elas a energia eólica. O vento tem regime instável e o GRV pode funcionar bem em regime de velocidades variáveis. É por isto que as investigações sobre o GRV eólico são intensas.

Particularmente a China, com sua imensa população, apresenta taxas de crescimento econômico elevadas, crescente urbanização, uma matriz energética baseada no carvão e relativamente poucos sítios propícios ao aproveitamento hidrelétrico. A faixa costeira do país é extensa e tem vários sítios com regime eólico favorável, *on-shore* e *off-shore*. Assim, é natural que a China esteja se empenhando muito no aproveitamento da energia eólica. Aerogeradores são máquinas tipicamente lentas, de elevado torque e regime de velocidade

sempre variável. Seu limite de potência amplia-se continuamente desde a intensificação das aplicações, especialmente na Alemanha e na Dinamarca. Máquinas assim, colocadas em torres de mais de cem metros de altura, podem exigir uma caixa de câmbio avantajada, pesada, de manutenção frequente e difícil. Isto compromete a estrutura da torre, a eficiência e a confiabilidade do sistema, além de estreitar a faixa de velocidades operacionais. Como o GRV é intrinsecamente uma máquina em CC à velocidade variável, a conjugação da possibilidade de eliminar ou aliviar o peso da caixa de câmbio, instalada no alto da torre e de produzir CA através de um inversor colocado no solo justifica os esforços dos cientistas para viabilizar aplicações práticas do GRV eólico.

Foram selecionados onze artigos sobre essa aplicação: [49-59]. Chen *et al* (2001) apresentaram um sistema eólico [50], com GRV em velocidade variável. Usaram duas estratégias de controle da potência de saída: ângulo de condução fixo com controle PWM ou ângulo de acionamento variável com cortes fixos. Os experimentos mostraram alta eficiência e baixo pico de corrente de fase numa ampla faixa de velocidades, com controle PWM. No entanto [07] contesta o uso do controle PWM em situações de velocidade largamente variável.

Estudando controle em um GRV eólico de 7,5 kW [49] reporta custo competitivo em relação ao motor de indução em gaiola. Também reporta eficiência e confiabilidade superiores e acionamento mais barato e sugere que esse tipo de máquina ainda não foi bem investigado.

Nesse campo, eliminar a transmissão mecânica variável e sustentar o rendimento elétrico em níveis mais elevados tem sido o foco das pesquisas. Em [52,53] é apresentado estudo sobre a influência do número de pólos no rotor e no estator de um GRV (12/16) eólico operando a baixa velocidade (100 rpm). Em [52] é apresentado um sistema que utiliza o GRV eólico, com uma proposta de redução da tensão de excitação de 110 V para 24 V, o trabalho mostra que a redução da tensão de excitação reduz o pico de corrente da fase consequentemente aumenta o rendimento do gerador.

Em [54] é apresentado um GRV monofásico para geração eólica, controle de corrente PWM foi utilizado para aumentar o rendimento do gerador. Em [55] é apresentado um novo sistema de geração de energia eólica, a turbina é emulada utilizando um motor de indução com controle vetorial. Com os testes realizados foi possível obter o ponto de máximo de eficiência do sistema de geração.

O trabalho de [56] apresenta um sistema híbrido automotivo e eólico, a turbina eólica é integrada ao sistema aerodinâmico do veículo e interligada no mesmo barramento do banco de baterias do carro. Em [57] é feito um melhoramento no projeto magnético do gerador para adequação em geração eólica. O trabalho de [58] apresenta um novo estimador de posição. O estimador utiliza a medida da corrente da fase e redes neurais artificiais para obtenção dos valores. O estimador foi montado e validado em um sistema eólico e a conclusão é de que os resultados são promissores.

Em [59] é tratado sobre o conversor e circuito de controle do GRV eólico, o problema da oscilação de tensão é discutido. Com o circuito de controle é possível reduzir o efeito desta oscilação. Controle de tensão e corrente do gerador é simulado e montada uma bancada de experimentos para validação do sistema.

Os trabalhos apontam para as grandes potencialidades do GRV que viabilizam a realização da pesquisa.

2.5.4 - Armazenador Cinético de Energia (*Flywheel*)

Um Sistema Armazenador de Energia Cinética (SAEC), ou *flywheel*, consiste de um volante de inércia que está acoplado mecanicamente a um motor/gerador elétrico [5], [63-67]. O acionamento elétrico tem como função converter a energia elétrica em mecânica, quando a demanda do sistema elétrico é relativamente pequena (acelerando o eixo) e transformar a energia armazenada no volante em elétrica, quando solicitado. A energia cinética armazenada

no volante é proporcional ao momento de inércia (J) e ao quadrado da velocidade angular (ω) [66], dada pela equação 2.1:

$$E_c = \frac{J \cdot \omega^2}{2} \quad (2.1)$$

Um aumento na velocidade angular aumenta consideravelmente a energia armazenada no volante de inércia e a densidade de energia do sistema. As perdas em vazio, que são o atrito viscoso com o ar e o atrito por contato nos mancais mecânicos, serão mais elevadas prejudicando a eficiência do sistema. Além disto, as partes girantes do sistema devem suportar tensões mecânicas elevadas devido à alta rotação a que são submetidas.

As limitações encontradas nos SAEC já foram superadas segundo Ribeiro et. Al [66]. O desenvolvimento e a implementação de uma nova geração de SAECs possui desempenho muito superior aos anteriores, pois a velocidade de rotação pode atingir dezenas de milhares de rpm (aproximadamente 60.000 rpm). Desta forma, conforme Ribeiro et. Al [66] cresce o numero de possibilidades para o emprego de flywheels, sendo que a nova geração possui densidades de energia e potência superiores às baterias [66].

Dentre as aplicações para este equipamento, podem-se citar:

- Alimentação ininterrupta de energia (sistemas UPS);
- Fornecimento de energia extra no caso de aumento na demanda;
- Compensação de afundamentos de tensão;
- Fornecimento de energia em sistemas aeroespaciais (NASA);
- Alimentação de cargas elétricas que demandam pulsos de energia, tais como, catapultas eletromagnéticas (EMALS).

A figura 2.12 mostra o diagrama de blocos de conexão do SAEC com a rede elétrica, os principais blocos destacados são: conversor estático, MRV e conversor de conexão com a rede e carga.

Um estudo detalhado realizado por [66] sobre a MRV em SAEC, mostrou como uma excelente opção para o emprego neste tipo de sistema, devido ao atendimento dos requisitos necessários de sistema que são: a operação em ampla faixa de velocidades incluindo operação em altíssimas velocidades [67], suporte ao estresse mecânico devido às elevadas velocidade de rotação (rotor sem enrolamentos) e elevada confiabilidade e robustez.

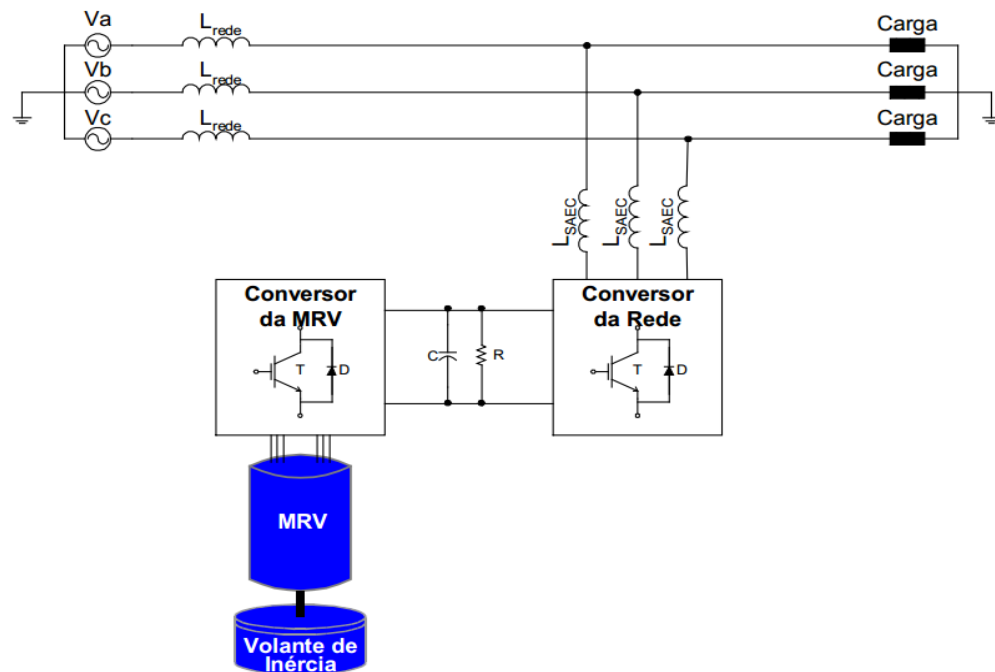


Figura 2.12 – Diagrama de Blocos do SAEC. [66]

2.6 - CONCLUSÃO

Neste capítulo foi mostrada a estrutura básica de funcionamento da máquina a relutância variável, operando como motor e como gerador. A produção científica recente mostra a potencialidade deste tipo de máquina para produção de energia elétrica.

Foi evidenciado que a máquina necessita de uma fonte de excitação para geração elétrica (campo elétrico através do capacitor) ou magnética (campo magnético através de ímas permanentes). Dentro dos diferentes tipos de excitação, as estratégias foram divididas em duas: excitação independente e autoexcitação. O estudo possibilitou situar o trabalho no

âmbito nacional e internacional das diversas estratégias adotadas pelos pesquisadores, visando à eliminação da fonte de excitação CC, ou seja, a operação do gerador como autoexcitado.

Dentro da estratégia de operação do gerador para o modo autoexcitado existem basicamente três configurações: adição de ímã permanente, capacitor em série com o enrolamento de fase para geração CA, e capacitor em paralelo com o enrolamento da fase e com a carga para geração CC.

Essas conclusões permitiram definir a estratégia adotada no trabalho. A configuração capacitor em paralelo com a carga, foi a escolhida. Esta estratégia leva a produção de tensão e corrente contínua nos terminais do gerador. As vantagens em relação às outras são: operação em velocidade variável, ausência de ímas permanentes, propostas de controle de tensão desenvolvidas permitindo que o gerador conecte-se com a rede de energia elétrica, o que torna o sistema totalmente autônomo.

Finalmente, as aplicações potenciais foram divididas em quatro: aeronáutica, veículos elétricos, energia eólica e armazenador cinético de energia. O trabalho foi desenvolvido com vistas à aplicação do gerador em energia eólica em sistemas isolados sem atendimento de energia elétrica.

Na sequência, será apresentado o modelo matemático utilizado para simulação do comportamento dinâmico do gerador operando no modo autoexcitado. O que se busca é uma plataforma de simulação que se aproxime tanto quanto possível da operação real do sistema.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM MATEMÁTICA DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL INCLUINDO A SATURAÇÃO MAGNÉTICA

3.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo é dedicado à apresentação do modelo matemático da máquina a relutância variável incluindo a saturação magnética. Alguns trabalhos encontrados na literatura utilizam modelos lineares [21, 22, 24, 60] e outros utilizam modelos não lineares [5, 9, 20, 36, 61, 62], sendo que a grande parte dedica-se na operação da máquina como motor.

A partir dos parâmetros obtidos com o protótipo construído é possível, para determinada região de operação, obter resultados com o modelo linear e isto depende do valor da corrente de fase que a máquina estiver operando. Dependendo do valor desta corrente o circuito magnético estará operando na região linear de atuação da máquina. Entretanto, considerando que as investigações apresentadas são realizadas para o modo de operação autoexcitado, o modelo matemático deve considerar as relações não lineares entre fluxo magnético e corrente, se resultados teóricos que representem a realidade da operação da máquina são desejados.

A seguir será detalhado o modelo do circuito elétrico e mecânico do gerador juntamente com as equações de estados que mostram o comportamento dinâmico da máquina, com a representação da indutância por meio da série de Fourier e evoluindo para representação da indutância incremental. Finalmente serão apresentados os primeiros resultados da operação com o modelo proposto.

3.2 - JUSTIFICATIVA PARA UTILIZAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

A figura 3.1 apresenta a estrutura do sistema de geração, utilizando o inversor Half-Bridge. A característica do sistema autoexcitado é vista devido à corrente que alimenta a

máquina durante o período de excitação e é proveniente do mesmo barramento CC que recebe a energia gerada.

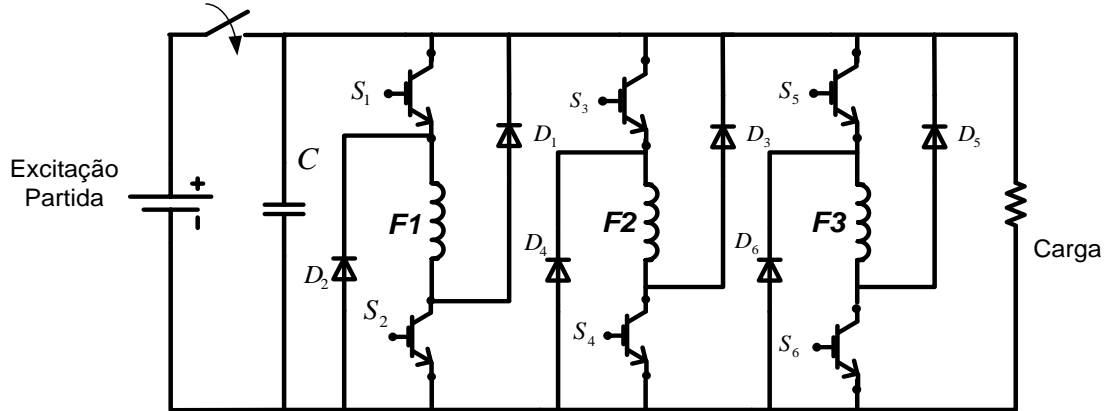


Figura 3.1 – Sistema de geração autoexcitado.

O escorvamento é o transitório que ocorre no gerador, desde a tensão inicial com o pré-carregamento do capacitor, até o ponto de operação estável, onde se estabelece o regime permanente de tensão.

Para explicar esse processo, a figura 3.2 apresenta o circuito elétrico de magnetização de uma das fases do gerador. A corrente proveniente do capacitor é dividida em duas, parte dela alimenta o enrolamento do gerador (excitação) e a outra alimenta a carga. A corrente no enrolamento da máquina cresce devido a excitação e também pela ação da força contra-eletromotriz.

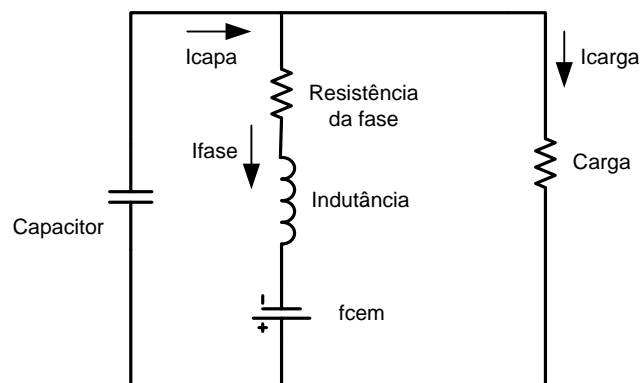


Figura 3.2 – Circuito de magnetização das fases do GRV no modo autoexcitado

Para o mesmo processo, com a abertura das chaves do conversor, conforme mostrado pelo circuito elétrico da figura 3.3, a corrente de fase do gerador se divide em duas: uma parcela alimenta a carga (geração) e outra carrega o capacitor, iniciando novamente o processo.

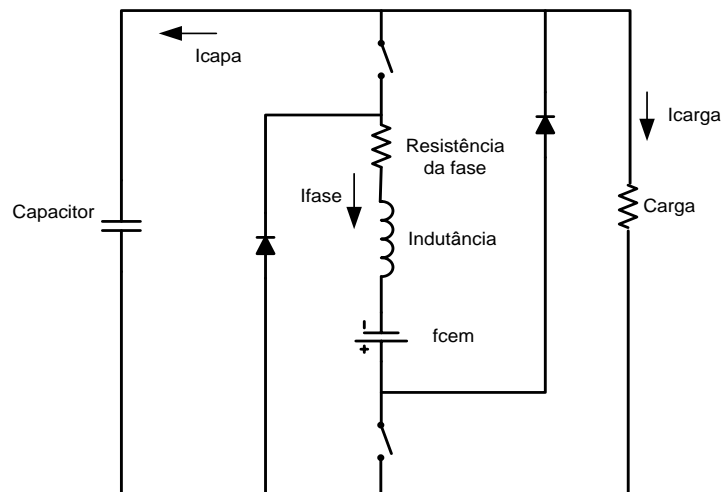


Figura 3.3 – Circuito de desmagnetização das fases do GRV no modo autoexcitado

Na figura 3.4 é apresentado o comportamento da corrente de fase e tensão gerada durante o escorvamento, em um certo intervalo de tempo. Os incrementos da corrente de excitação que levam a incrementos no fluxo magnético são propiciados pelos incrementos da tensão gerada.

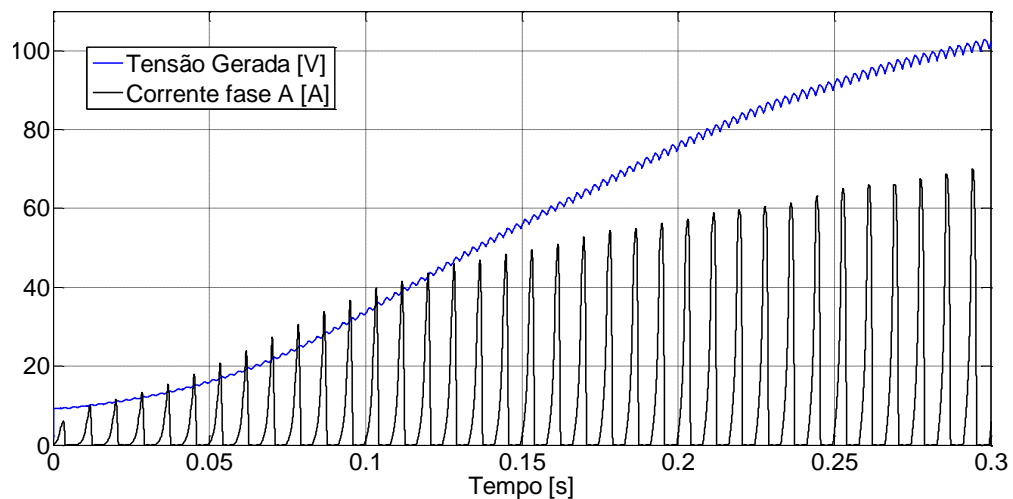


Figura 3.4 – Tensão gerada e corrente fase durante escorvamento

A figura 3.5 mostra o instante que a corrente aumenta e consequentemente um aumento na tensão gerada. Isso ocorre até que a máquina atinja a saturação do circuito magnético, quando não havendo mais incremento de fluxo magnético, não há incremento da tensão gerada e o sistema se estabiliza.

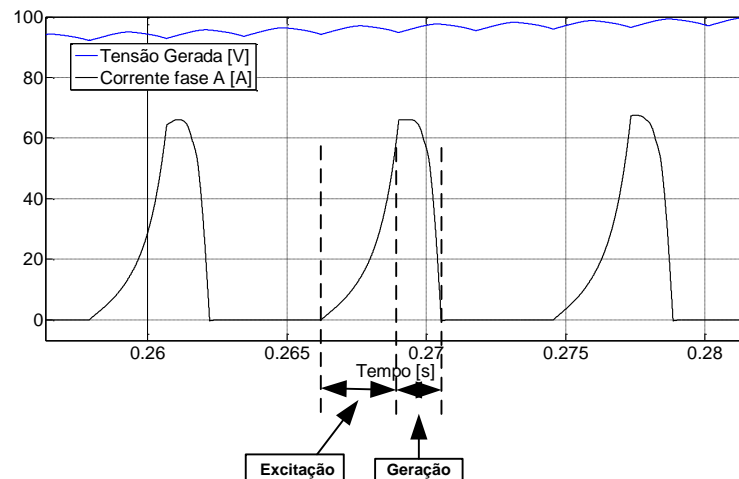


Figura 3.5 – Tensão gerada e corrente de fase evidenciando excitação e geração

Para correta representação matemática da operação do sistema autoexcitado, é necessário que o modelo matemático do gerador contemple a saturação do circuito magnético. Se o circuito magnético não satura, a corrente de fase cresce infinitamente, e como consequência a tensão também cresce infinitamente, fato que não corresponde a valores na prática.

Levando em consideração a saturação magnética a corrente de fase cresce até que ocorra a saturação, o que estabiliza os valores de fluxo e de tensão gerada.

A figura 3.6 mostra a curva de magnetização do gerador, representando o fluxo concatenado para diferentes valores de posição e corrente. Existem duas regiões de operação do gerador, região linear e região saturação. Para o caso do gerador operando em malha aberta necessariamente a sua operação será na região de saturação. Existe, também, a possibilidade

de operação do gerador na região linear, bastando para tal fazer o devido controle de correntes nesta região.

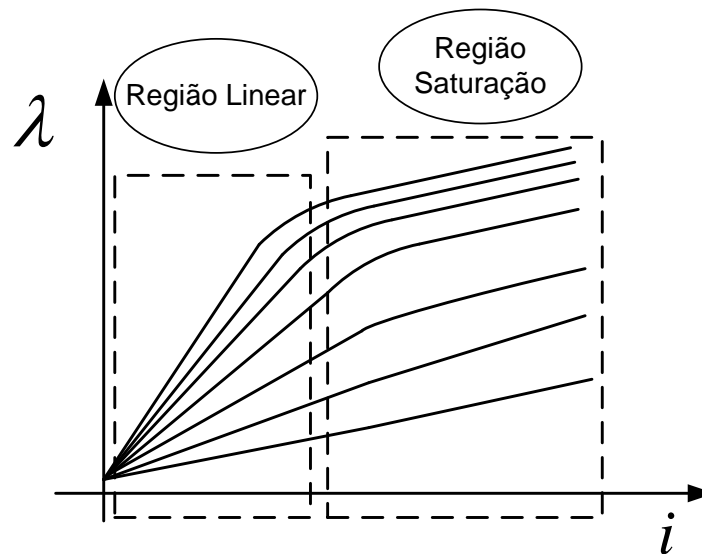


Figura 3.6 – Curva de magnetização do gerador para diferentes posições e correntes.

Desta forma, conclui-se que o gerador a relutância variável operando no modo autoexcitado em malha aberta, ou seja, sem controle dos ângulos de chaveamento, funciona sempre em condições não lineares quanto a sua magnetização (condição de saturação).

O objetivo fundamental deste capítulo é apresentar um modelo matemático que represente a máquina a relutância variável, suas equações elétricas e mecânicas, representação do perfil de indutância, indutância incremental, fluxo, co-energia e conjugado. A utilização desse modelo é de suma importância para o desenvolvimento do trabalho e isso será observado neste capítulo.

3.3 - EQUAÇÕES ELÉTRICAS E MECÂNICAS

Um circuito equivalente básico pode ser obtido negligenciando-se a indutância mútua entre as fases [10]. A tensão aplicada é igual à soma da queda de tensão na resistência e a taxa de variação de fluxo enlaçado pela fase, sendo sua expressão dada por:

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

Para velocidade constante, a equação da tensão na fase pode ser escrita como:

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

onde v é a tensão aplicada, i é a corrente da fase, R é a resistência da fase, L é a indutância incremental (dinâmica) da fase e θ é a posição do rotor. Denomina-se indutância neste trabalho o valor de indutância em função da posição, a variação dessa mesma indutância para diferentes valores de posição e de corrente passa a ser chamado de indutância incremental.

Nesta equação, os três termos do lado direito representam, respectivamente, a queda de tensão no resistor, a queda de tensão no indutor e a força eletromotriz (fem) induzida, na Figura 3.7.

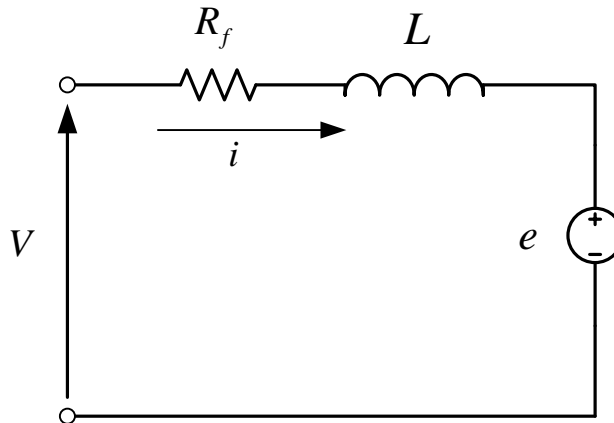


Figura 3.7 – Circuito equivalente do GRV para uma fase

O terceiro termo do lado direito da igualdade é a força contra eletromotriz e , que isoladamente pode ser escrita como:

$$e = i\omega \frac{\partial L(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (3.3)$$

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

A equação mecânica da máquina pode ser obtida a partir da análise da sua dinâmica de movimento. Observa-se que no gerador, a máquina primária deve fornecer conjugado

mecânico (T_m) capaz de equilibrar o conjugado eletromagnético resistente. Deve, também, vencer a inércia rotacional nas variações de velocidade e o atrito dinâmico nos mancais de sustentação e guia do rotor. O conjugado eletromagnético é de natureza resistente, isto é, atua de forma a se opor à causa que o provocou, de modo que é intrinsecamente negativo em relação ao sentido de rotação do GRV. Assim, a equação do conjugado no GRV se apresenta na forma:

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

onde: T_m = conjugado mecânico aplicado; T_{emag} = conjugado eletromagnético; ω = velocidade angular; J = momento de inércia; D = coeficiente de atrito viscoso.

Para obter uma equação para o conjugado eletromagnético considere a Figura 3.8 que mostra a curva de magnetização típica para uma fase de um GR em uma certa posição θ do rotor. Esta curva mostra a saturação do material magnético.

A co-energia (W^{co}) da fase de ordem j , para a posição θ do rotor, é dada por:

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

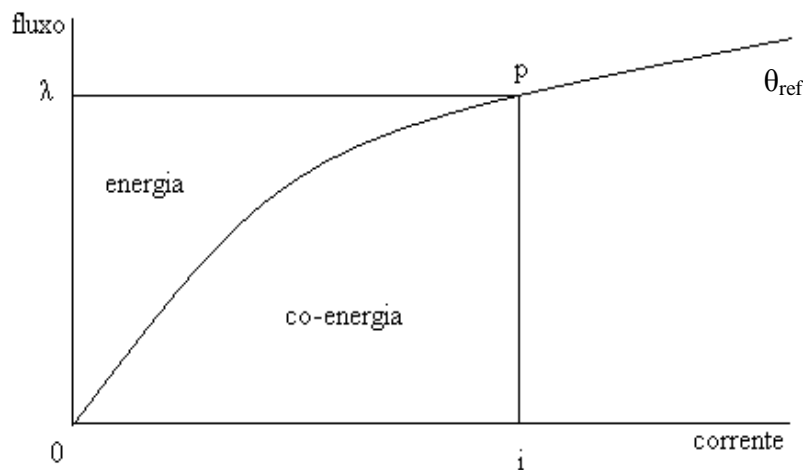


Figura 3.8 – Curva de magnetização típica para uma fase do gerador. [27]

Como esta equação se aplica a cada fase da máquina, a co-energia instantânea do GR será dada por:

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

Ou, mais formalmente, por:

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

O torque eletromagnético instantâneo é dado pela equação:

$$T_{emag} = \frac{\partial W^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^i L(\theta, i) di = \frac{\partial}{\partial \theta} L(\theta, i) \int_0^i di = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (3.8)$$

cuja expansão é:

$$T_{emag} = \frac{\partial W_1^{co}}{\partial \theta} + \frac{\partial W_2^{co}}{\partial \theta} + + \frac{\partial W_F^{co}}{\partial \theta} \quad (3.9)$$

A substituição da equação 3.4 na equação 3.9 resulta em:

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

As equações elétricas 3.1, 3.2 e 3.3 e a equação mecânica do GRV podem ser agrupadas e reescritas na forma matricial, conforme mostrado na sequência, o que facilita o emprego de métodos numéricos para sua solução.

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

onde

$$r_1 = \frac{1}{2} \cdot i_a \cdot \frac{\partial L_a(i, \theta)}{\partial \theta}$$

$$r_2 = \frac{1}{2} \cdot i_b \cdot \frac{\partial L_b(i, \theta)}{\partial \theta}$$

$$r_3 = \frac{1}{2} \cdot i_c \cdot \frac{\partial L_c(i, \theta)}{\partial \theta}$$

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

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

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

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

Esta equação de estados é capaz de descrever completamente o estado de cada fase da máquina a qualquer instante. É possível observar que as matrizes $[R]$ e $[L]$ dependem de parâmetros construtivos da máquina. Trata-se de uma equação diferencial e para cada matriz de entrada $[V]$ é possível encontrar a matriz de saída $[I]$. A solução desse tipo de sistema é acessível através de métodos numéricos computacionais iterativos.

3.4 - REPRESENTAÇÃO DO PERFIL DE INDUTÂNCIA POR MEIO DA SÉRIE DE FOURIER

A expansão da indutância por meio da Série de Fourier [62], tornou-se muito atrativa pelo fato de representar com precisão os efeitos devido a saturação do circuito magnético. A

implementação deste método permite simular computacionalmente a operação dinâmica do GRV trabalhando no modo autoexcitado.

A estratégia adotada para representar o perfil da indutância incremental para diferentes correntes e posições do rotor, é baseada na aproximação da curva utilizando segmentos de linhas retas, conforme pode ser visto pela Figura 3.9. Na Figura foi adotada esta representação para a indutância por conveniência matemática.

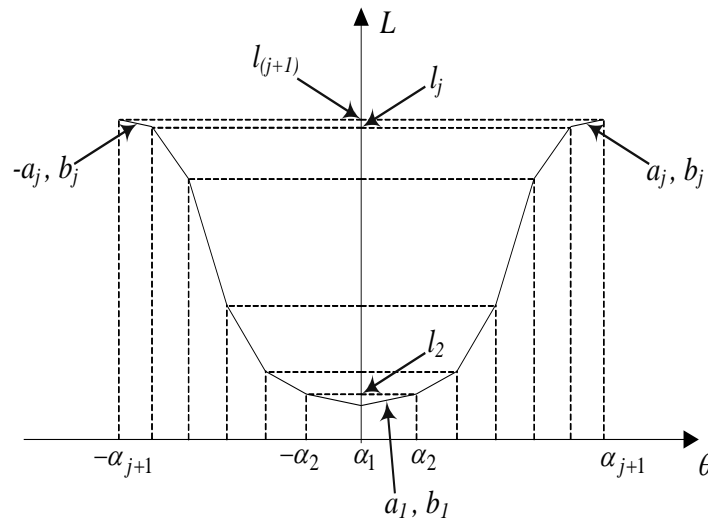


Figura 3.9 – Representação Aproximada da Curva da Indutância utilizando “j” Segmentos de Linhas Retas.

As equações que representam a indutância como função da posição a partir da Figura 3.9 podem ser escritas como:

$$L(\theta) = -a_j\theta + b_j \quad (3.14)$$

para o j' éximo segmento de $\theta < \alpha_1$

$$L(\theta) = a_j\theta + b_j \quad (3.15)$$

para o j' éximo segmento de $\theta > \alpha_1$, onde

$$\begin{cases} a_j = \frac{l_{(j+1)} - l_j}{\alpha_{(j+1)} - \alpha_j}, \\ b_j = l_j - a_j \cdot \alpha_j, \end{cases}$$

Sendo l_j a indutância para o j 'ésimo segmento, e α a posição associada a esta indutância.

Devido à simetria par na forma de onda, a Série de Fourier contém apenas termos de cosseno e isto vem simplificar a equação final que fornece os valores da indutância analiticamente. Logo, para uma máquina com P_r polos na parte móvel, a indutância de fase é descrita por

$$L(\theta) = L_0 + \sum_{n=1}^{\infty} L_n \cos(nP_r \theta) \quad (3.16)$$

onde L_0 é um termo constante, L_n é um coeficiente associado à ordem harmônica, n é a ordem harmônica, θ é a posição e P_r é um valor associado ao número de polos do rotor. Este último está relacionado ao período da indutância G por meio de

$$G = \frac{2\pi}{P_r} \quad (3.17)$$

O termo constante L_0 é calculado por meio de

$$L_0 = \frac{1}{G} \int_{-G/2}^{G/2} L(\theta) d\theta = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^m \left(\int_{-\alpha_{(j+1)}}^{-\alpha_j} (-a_j \theta + b_j) d\theta + \int_{\alpha_{(j)}}^{\alpha_{(j+1)}} (a_j \theta + b_j) d\theta \right) \quad (3.18)$$

onde m é o número de segmentos de linhas retas. Através de algumas manipulações matemáticas a equação 3.18 resulta em

$$L_0 = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^m [l_{(j+1)} + l_j] \cdot [\alpha_{(j+1)} - \alpha_j] \quad (3.19)$$

O coeficiente L_n da equação 3.16 é deduzido como

$$L_n = \frac{2}{G} \int_{-G/2}^{G/2} L(\theta) \cos(nN_r \theta) d\theta = \quad (3.20)$$

$$\frac{2}{G} \sum_{j=1}^m \left(\int_{-\alpha_{(j+1)}}^{-\alpha_j} (-a_j \theta + b_j) \cos(nP_r \theta) d\theta + \int_{\alpha_j}^{\alpha_{(j+1)}} (a_j + b_j) \cos(nP_r \theta) d\theta \right)$$

Desenvolvendo os termos que constituem o coeficiente L_n na equação anterior e fazendo algumas simplificações matemáticas a equação 3.20 transforma-se em

$$L_n = \sum_{j=1}^m \left[l_{(j+1)} \cdot A_{(j,n)} - l_j \cdot B_{(j,n)} \right] \quad (3.21)$$

onde

$$A_{(j,n)} = \frac{2}{n\pi} \left\{ \text{sen}[nP_r \alpha_{(j+1)}] + \frac{\cos[nP_r \alpha_{(j+1)}] - \cos[nP_r \alpha_j]}{nP_r [\alpha_{(j+1)} - \alpha_j]} \right\} \quad (3.22)$$

e

$$B_{(j,n)} = \frac{2}{n\pi} \left\{ \text{sen}[nP_r \alpha_{(j+1)}] + \frac{\cos[nP_r \alpha_{(j+1)}] - \cos[nP_r \alpha_j]}{nP_r [\alpha_{(j+1)} - \alpha_j]} \right\} \quad (3.23)$$

Por fim, a indutância $L(\theta)$ do enrolamento pode ser obtida realizando as substituições da equação 3.18 até a 3.23 na equação 3.16, resultando na expressão:

$$L(\theta) = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^m (l_{(j+1)} + l_j) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \quad (3.24)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m (l_{(j+1)} A_{(j,n)} - l_j B_{(j,n)}) \right) \cos(nP_r \theta)$$

A equação 3.24 permite a construção do perfil de indutância em função da posição obtida a partir de dados com softwares de análise de elementos finitos e, também, de dados reais conseguidos experimentalmente da máquina projetada. Isto torna possível sua representação pela série de Fourier.

3.4.1 - Dependência da indutância com a corrente – indutância incremental

Na máquina real, a relação fluxo enlaçado por corrente depende também da corrente de fase. Essa dependência ocorre devido ao efeito de saturação magnética do material que constitui o circuito magnético.

A Figura 3.10 mostra o perfil de indutância para diferentes valores de corrente, sendo i_1 o menor valor e i_3 o maior. Na operação da máquina, as correntes variam de valores baixos a valores elevados dentro de um ciclo de operação e, portanto, a curva deve ser ajustada.

Conforme mencionado anteriormente, à dependência do fluxo enlaçado com a posição do rotor e a corrente, é dado o nome de indutância incremental.

A relação fluxo por corrente depende da posição do rotor e da corrente de fase. Na equação 3.24 existe a dependência da posição do rotor, termos (α_j) , pelo número de segmentos de linhas retas. A Figura 3.10 mostra o perfil idealizado do perfil de indutância dividido em segmentos em função da posição para diferentes valores de corrente.

A curva da indutância incremental em função da corrente corresponde aos termos l_j da equação 3.24. Estes valores mudam para cada corrente sendo possível representa-los analiticamente dentro da equação 3.24 através de $l_j = l_j(i, \alpha_j)$, obtendo-se a indutância incremental $L(i, \theta)$. O último passo para representar a indutância incremental é fazendo um ajuste polinomial através de uma interpolação de terceira ordem, a qual serve para adequar os valores medidos com a série de Fourier. A expressão $l_j = l_j(i, \alpha_j)$ é dada por:

$$l_j(i, \alpha_j) = C_{3j}i^3 + C_{2j}i^2 + C_{1j}i + C_{0j} \quad (3.25)$$

Finalmente, ao substituir a equação 3.24 em 3.25 obtém-se a expressão da indutância incremental:

$$L(i, \theta) = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^m (l_{(j+1)}(i, \alpha_j) + l_j(i, \alpha_j)) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m (l_{(j+1)}(i) A_{(j,n)} - l_j(i) B_{(j,n)}) \right) \cos(nP_r \theta) \quad (3.26)$$

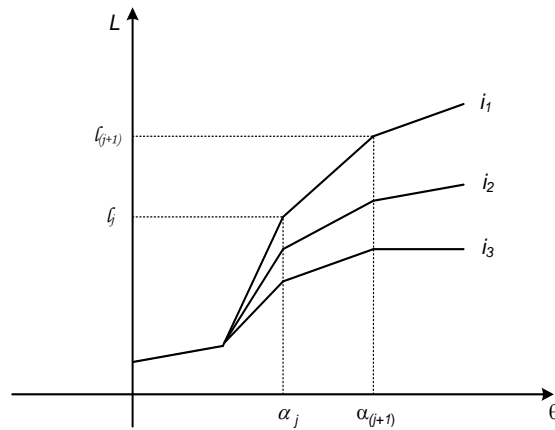


Figura 3.10 - Indutância em função da posição dividida por segmentos de linhas retas [62]

Com este modelo matemático é possível obter resultados factíveis que levam em consideração a saturação do circuito magnético. A Figura 3.11 mostra a indutância incremental utilizada no trabalho obtida através da série de Fourier, em que foram utilizados 6 harmônicos para sua representação. É importante ressaltar que o programa para construção desse perfil de indutância por meio da série é capaz de representar qualquer tipo de máquina. No trabalho foram escolhidos os valores de corrente de 5 ampères a 50 ampères.

A Figura 3.12 mostra esse mesmo perfil de indutância incremental em uma superfície de três eixos, destacando os valores de indutância/corrente/posição.

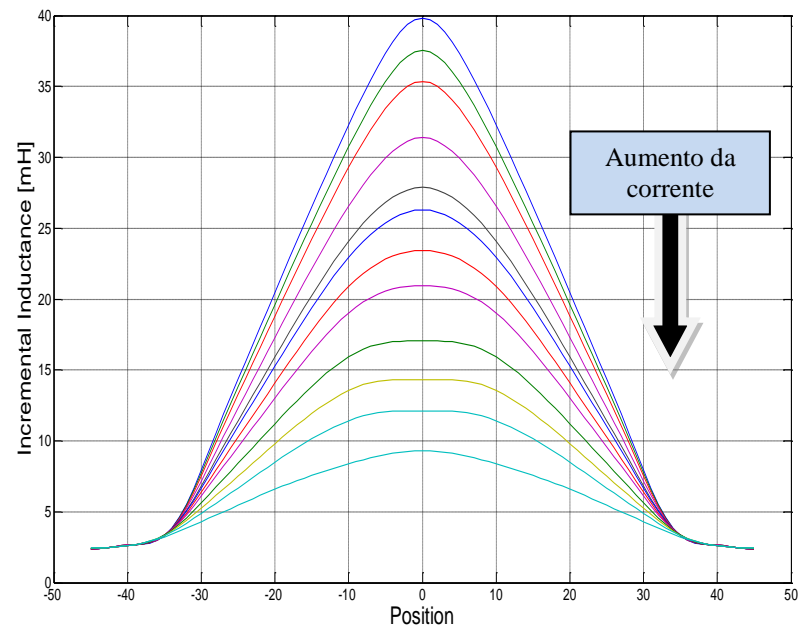


Figura 3.11 – Perfil indutância obtido por meio da série de Fourier para diferentes valores de corrente e posição.

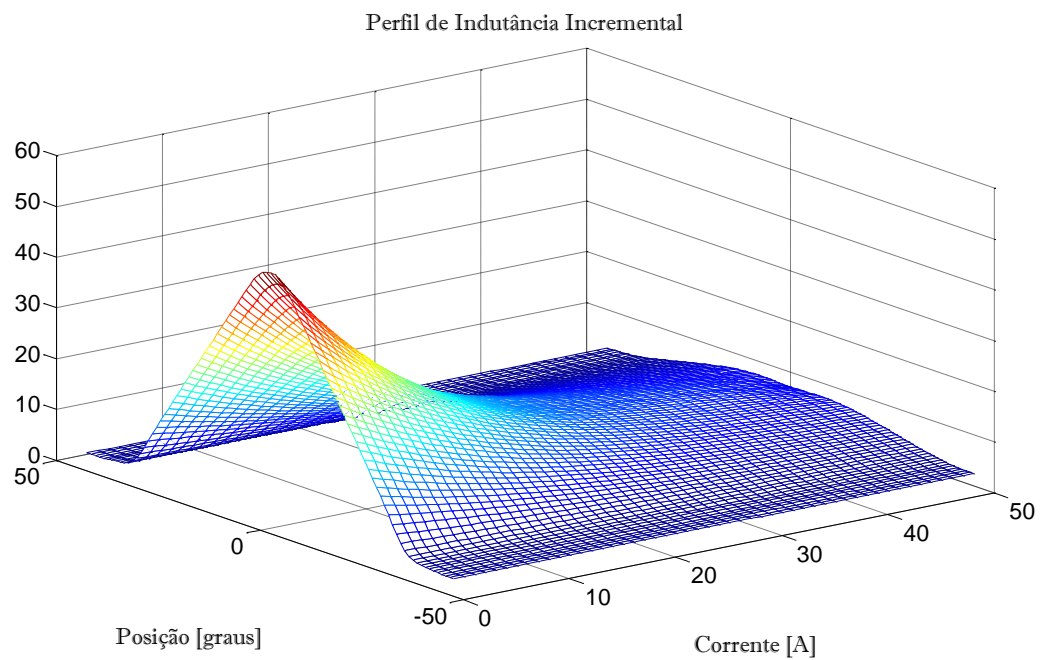


Figura 3.12- Perfil indutância (mH) obtido por meio da série de Fourier para diferentes valores de corrente e posição em três dimensões.

3.4.2 - Expressão analítica da co-energia levando em conta a saturação do circuito magnético

Com base na equação 3.26 a expressão que relaciona o fluxo pela corrente e posição pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} \lambda(i, \theta) = L(i, \theta)i = & \\ \frac{1}{G} \sum_{j=1}^m \left(\frac{(C_{3(j+1)} + C_{3j})i^4 + \dots + (C_{0(j+1)} + C_{0j})i}{(C_{3(j+1)} + C_{3j})i^4 + \dots + (C_{0(j+1)} + C_{0j})i} \right) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + & \\ \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m (C_{3(j+1)}i^4 + \dots + C_{0(j+1)}i)A_{(j,n)} - (C_{3j}i^4 + \dots + C_{0j}i)B_{(j,n)} \right) \cos(nP_r\theta) & \end{aligned} \quad (3.27)$$

Após apresentar a equação de fluxo, a expressão foi implementada através de linhas de programas em ambiente MatLab e mostrada pela Figura 3.13.

A figura 3.13 mostra o perfil de fluxo concatenado em duas regiões: alinhamento e desalinhamento. Na região de alinhamento, o fluxo satura a partir de 15 amperes e não aumenta mais devido a característica do material ferromagnético. Na região de desalinhamento, o fluxo é linear devido à característica de que a maior parte desse fluxo não enlaça a fase, pois essa região é composta pelo ar.

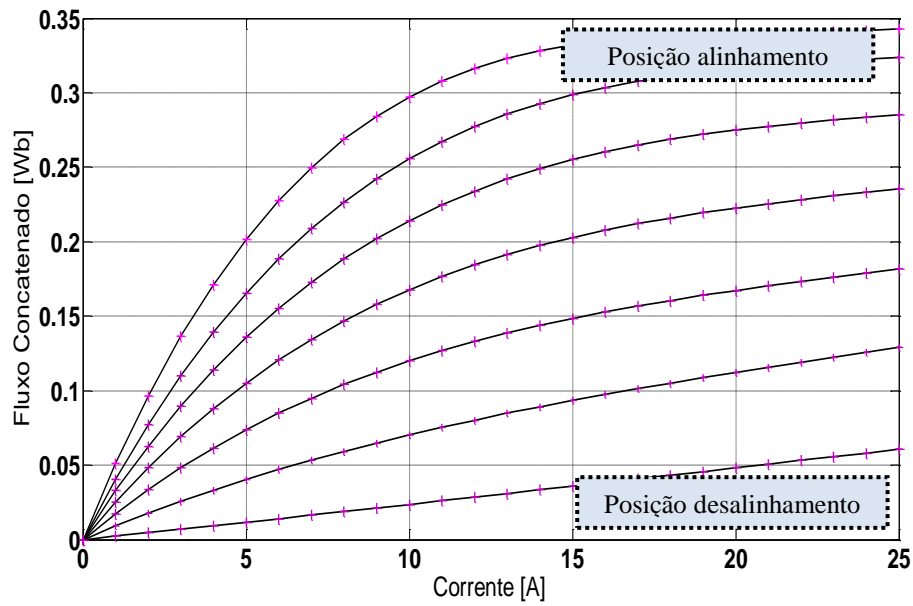


Figura 3.13 – Perfil de fluxo obtido por meio da série de Fourier para diferentes valores de corrente e posição.

Agora, integrando a equação 3.27 é possível obter a expressão analítica da co-energia levando em conta a saturação do material magnético. Esta expressão é apresentada na equação 3.28.

$$\begin{aligned}
 W'(i, \theta) &= \int_0^i \lambda(i, \theta) di = \\
 &\frac{1}{G} \sum_{j=1}^m \left(\left(\frac{C_{3(j+1)} + C_{3j}}{5} \right) i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0(j+1)} + C_{0j}}{2} \right) i^2 \right) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \\
 &\sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m \left(\left(\left(\frac{C_{3(j+1)}}{5} \right) i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0(j+1)}}{2} \right) i^2 \right) A_{(j,n)} \right) - \left(\left(\frac{C_{3j}}{5} \right) i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0j}}{2} \right) i^2 \right) B_{(j,n)} \right) \cos(nP_r \theta)
 \end{aligned} \tag{3.28}$$

3.4.3 - Expressão analítica do conjugado levando em conta a saturação do circuito magnético.

A equação do conjugado é escrita a partir da expressão 3.28 que representa a co-energia.

Assim, o conjugado é exposto analiticamente como:

$$\begin{aligned}
 T_{e_{mag}} &= \frac{\partial W'(i, \theta)}{\partial(\theta)} = \\
 &= -nP_r \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m \left(\left(\left(\frac{C_{3(j+1)}}{5} \right) i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0(j+1)}}{2} \right) i^2 \right) A_{(j,n)} \right) \right. \\
 &\quad \left. - \left(\left(\frac{C_{3j}}{5} \right) i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0j}}{2} \right) i^2 \right) B_{(j,n)} \right) \sin(nP_r \theta)
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

A grande importância de se expressar analiticamente as relações não lineares de fluxo, corrente e posição na MRV é que através da indutância incremental pode-se expressar analiticamente a co-energia e, também, o conjugado, abrindo caminho para estudos futuros de projetos e de implementação de observadores de fluxo e conjugado.

A Figura 3.14 mostra a superfície obtida através da equação 3.29, que foi implementada em ambiente MatLab. Essa curva mostra o perfil de conjugado para diferentes correntes e posições.

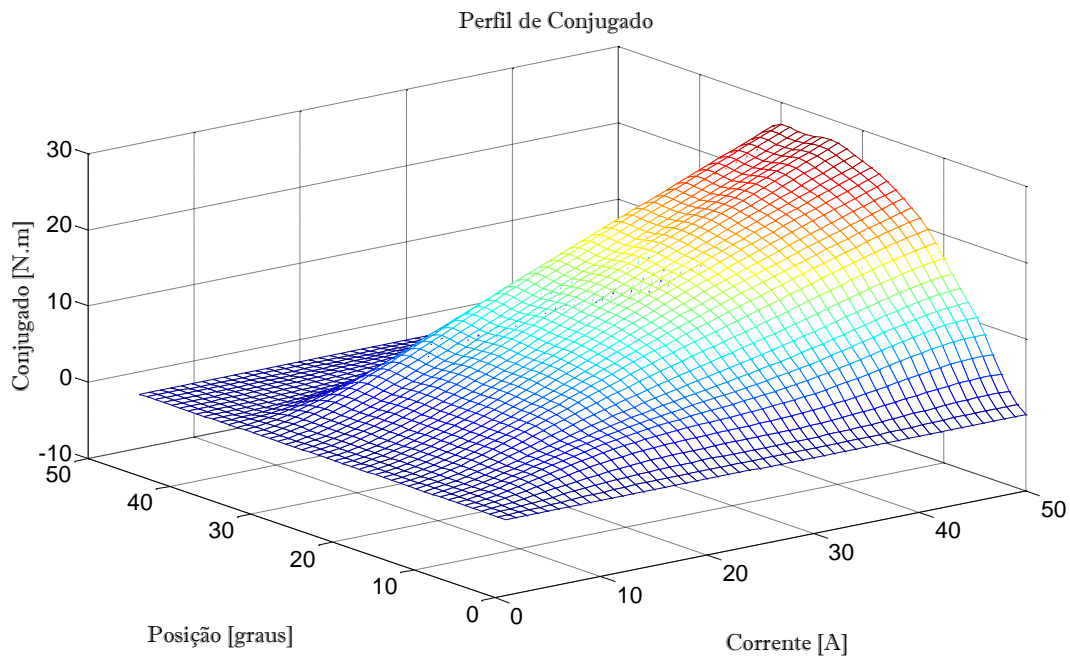


Figura 3.14 – Perfil de conjugado obtido por meio da série de Fourier para diferentes valores de corrente e posição em três dimensões.

3.5 - RESULTADOS PRELIMINARES COM O MODELO PROPOSTO

A equação de estado apresentada e a construção do perfil de indutância incremental possibilitaram construir um ambiente de simulação dinâmica permitindo a análise de transitórios elétricos e mecânicos do gerador. O desenvolvimento completo deste ambiente será mostrado no próximo capítulo.

Os primeiros testes realizados com o modelo proposto foram obtidos para uma máquina a relutância variável trifásica 6/4 (seis polos no estator e quatro polos no rotor). A velocidade da turbina acoplada ao gerador foi fixada em 1800 rpm, a carga ligada aos terminais do gerador foi de 40 ohms e a tensão de excitação inicial de 30 V.

A Figura 3.15 mostra o comportamento da indutância incremental para um ciclo de geração. A Figura 3.16 apresenta o comportamento da tensão gerada para o modelo que incorpora a saturação magnética. Pode ser observado que a partir do instante de excitação inicial a tensão começa a crescer até atingir valor próximo de 98 volts e não conseguindo mais

aumentar devido a saturação do circuito magnético. A Figura 3.17 mostra o comportamento da tensão gerada que não inclui a saturação magnética. Pode-se observar que no instante inicial a tensão começa a crescer, não convergindo para um valor fixo e tendendo ao infinito.

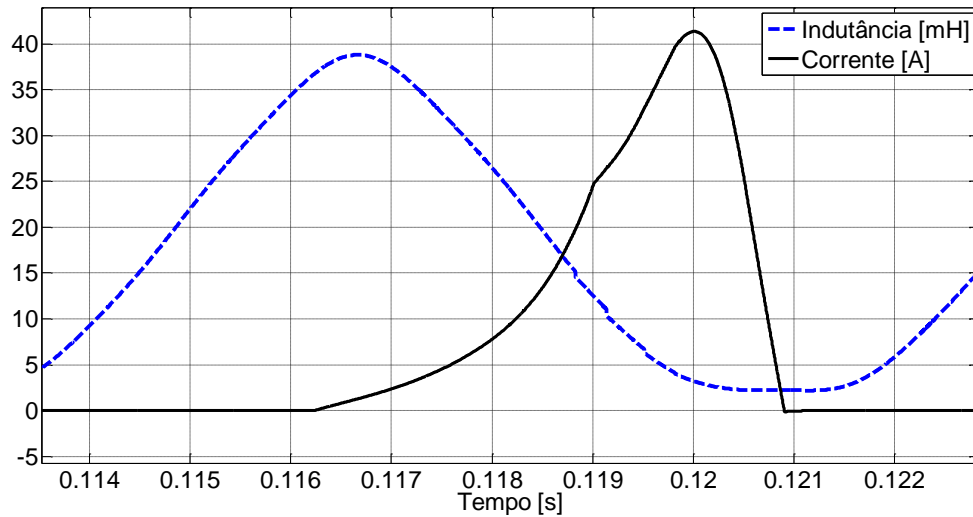


Figura 3.15 – Corrente de fase [A] , Indutância incremental [H] - Resultados com o modelo que inclui a saturação magnética

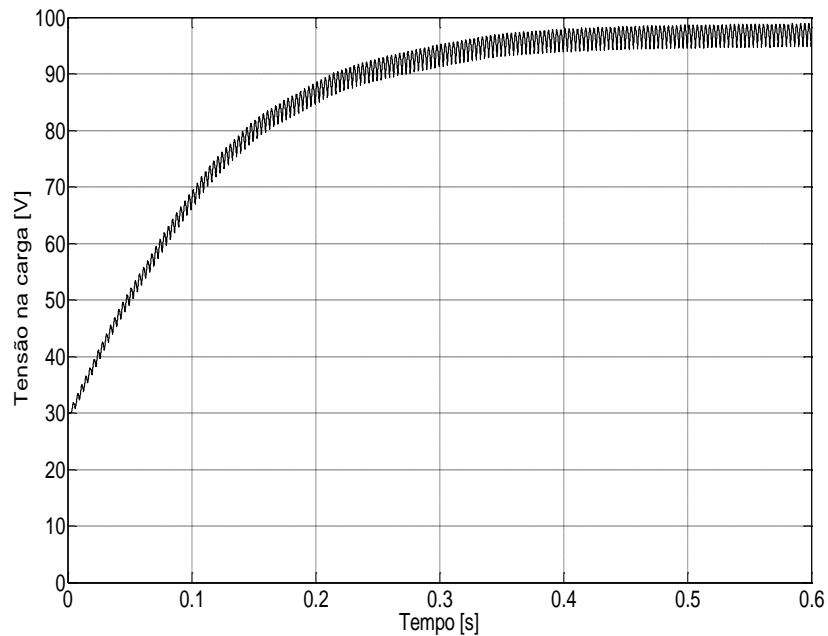


Figura 3.16 - Tensão na carga -Resultados com o modelo que contempla a saturação magnética

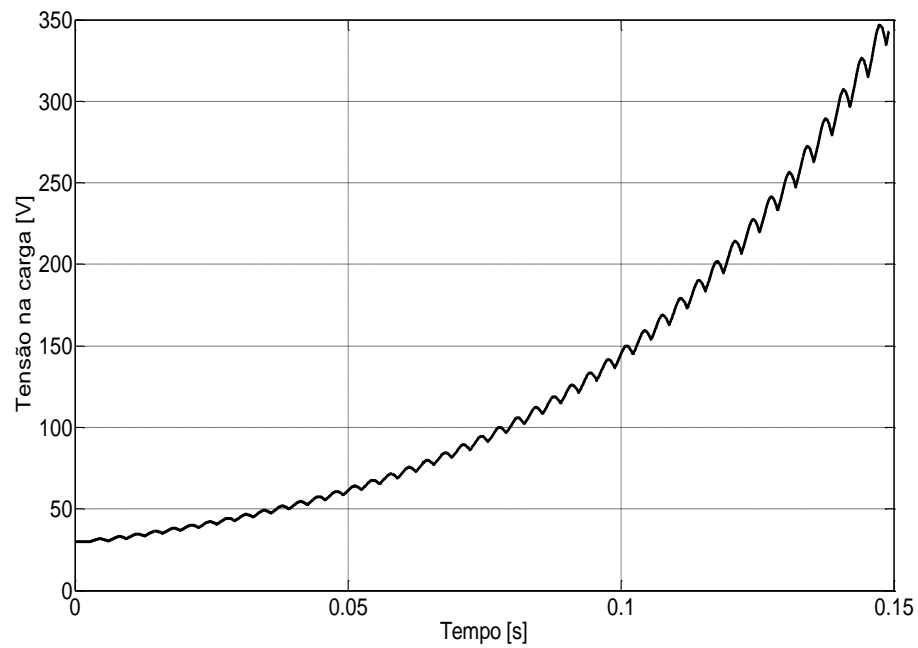


Figura 3.17 - Tensão na carga - Resultados obtidos de simulação com modelo que não contempla a saturação magnética

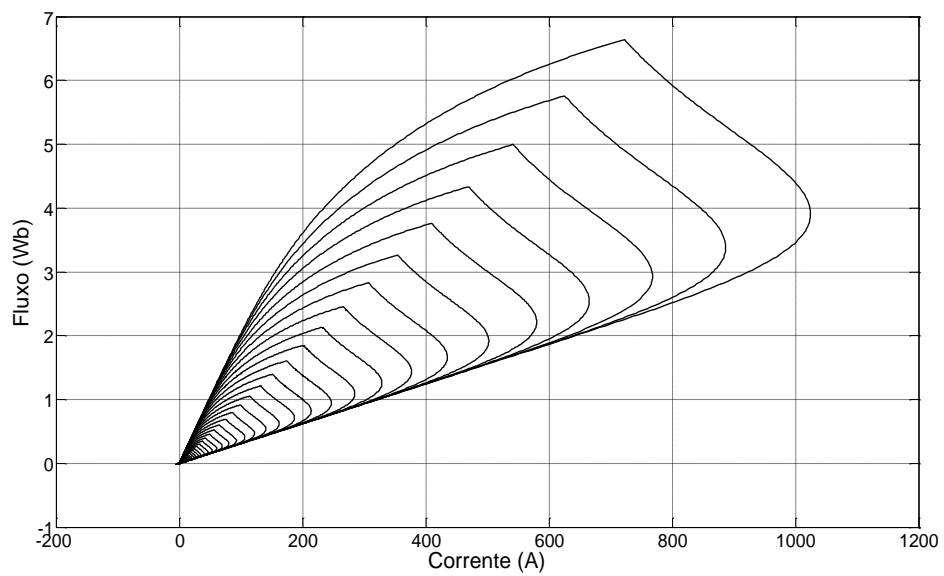


Figura 3.18 - Curva de fluxo por corrente – Resultados obtidos de simulação que não contempla a saturação magnética

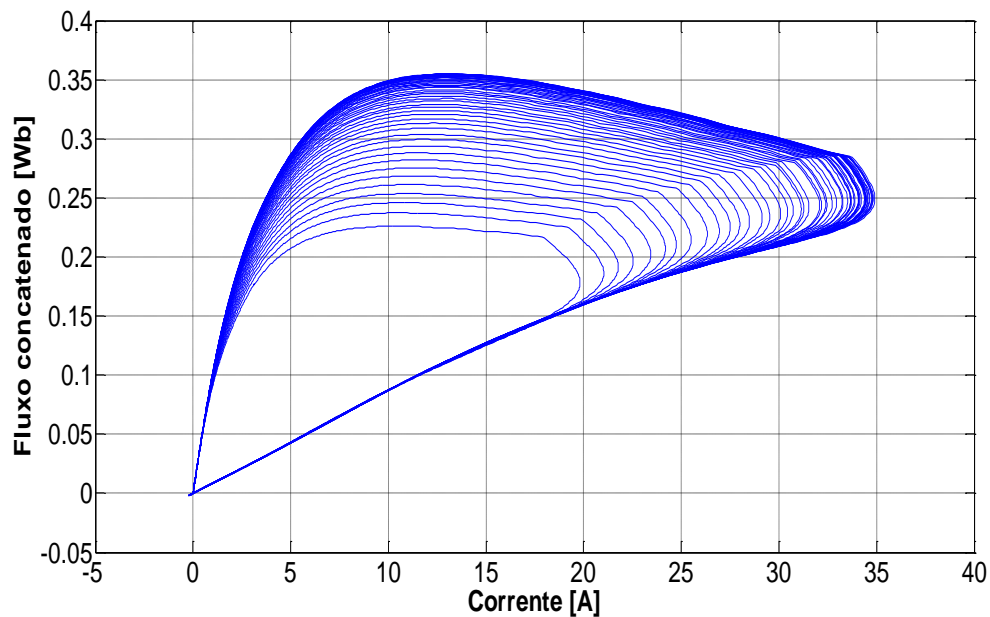


Figura 3.19 – Curva de fluxo por corrente – Resultados com o modelo que contempla a saturação magnética

Para a mesma situação mostrada pelas Figuras 3.16 e 3.17, foram levantadas as curvas de fluxo concatenado por corrente para o modelo que inclui a saturação e desconsidera a saturação. A Figura 3.18 mostra o perfil de fluxo concatenado de uma fase da máquina para a mesma situação simulada e demonstrada pela Figura 3.17 para o modelo linear. O fluxo cresce infinitamente atingindo níveis de fluxo e correntes fora da realidade, resultados esses que não são factíveis. A mesma situação foi simulada e incluída a saturação do circuito magnético. A Figura 3.19 mostra que o fluxo chega próximo de 0.35 Wb estabelecendo um fluxo máximo para esta operação.

3.6 - CONCLUSÕES

Foi apresentada uma justificativa para utilização do modelo matemático do gerador a relutância variável que contempla a saturação do circuito magnético. Sendo que este capítulo dedicou-se à obtenção deste modelo. O desenvolvimento completo deste modelo torna viável a obtenção de resultados de simulação dinâmica compatíveis com a operação real da máquina na condição de gerador autoexcitado. Uma vez que as equações foram implementadas em

linguagem computacional, o que facilitou seu estudo e análise em regime permanente e transitório.

A representação do perfil de indutância em função da posição e sua evolução para indutância incremental em função da posição e da corrente por meio da série de Fourier tornou possível a inclusão da saturação magnética no modelo matemático por meio de equações de estados. Com esse modelo foi possível fazer a representação analítica de indutância, indutância incremental, fluxo, co-energia e conjugado.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DA OPERAÇÃO DINÂMICA DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL AUTOEXCITADO, SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

4.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta resultados de simulação para o gerador a relutância variável operando no modo autoexcitado em regime permanente e transitório. O modelo matemático desenvolvido no capítulo anterior é utilizado. A plataforma de simulação foi desenvolvida utilizando o software MatLab no ambiente *Simulink*, juntamente com o pacote de eletrônica de potência *SimpowerSystems*.

A Figura 4.1 mostra o diagrama de todo o processo de conversão eletromecânica, evidenciando os blocos: máquina primária, GRV, Conversor HB, Capacitor e carga.

A representação por diagrama de blocos de todo o sistema permite observar que o conversor estático tem papel fundamental na operação do gerador, governando adequadamente o fluxo de potência durante as diferentes etapas de funcionamento do sistema, que são: carga/descarga do capacitor, excitação das fases. Dessa forma, o conversor é a ligação fundamental entre o gerador e a carga e seu desempenho é decisivo para um bom desempenho do processo de conversão eletromecânica.

A seguir será mostrada a estrutura topológica do conversor estático utilizado no acionamento.

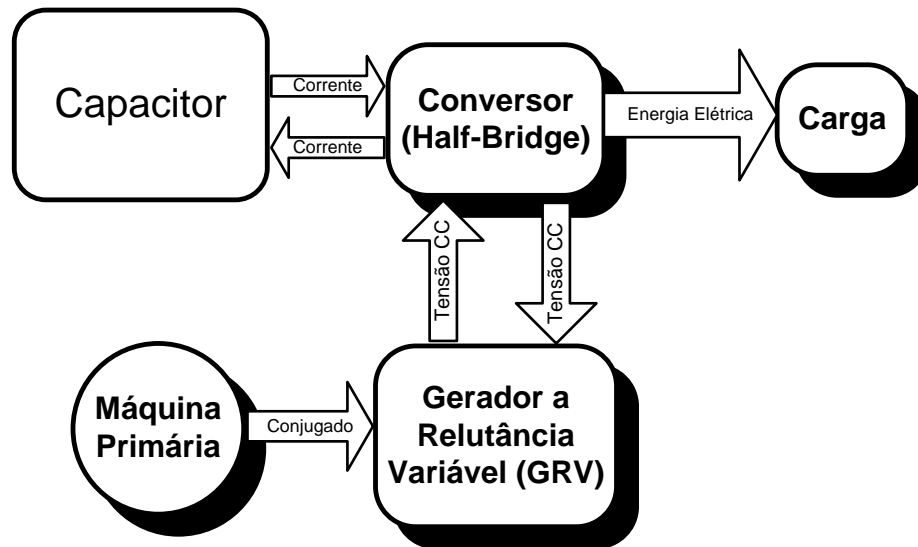


Figura 4.1 - Diagrama de bloco do GRV.

4.2 - CONVERSOR ESTÁTICO UTILIZADO NO ACIONAMENTO

Todos os resultados de simulação que serão apresentados neste capítulo são obtidos através de um único protótipo e conversor. O conversor simulado é o clássico Ponte Assimétrica ou *Half Bridge* (HB), mostrado na Figura 4.2, a operação do gerador autoexcitado utiliza a mesma estrutura para acionamento de motores, a principal diferença para a configuração excitação independente com este modo, é que não existe a separação do circuito de ligação entre a etapa de excitação e geração.

A estratégia de pré-carregamento do banco de capacitores é feita através de uma fonte de corrente contínua com uma tensão fixa e com um diodo ligado em série com a fonte. Esta fonte pode ser proveniente de uma bateria ou de energia solar. O valor da tensão desta fonte é da ordem de 5 a 10% do valor da tensão de operação em regime do gerador. A aplicação de pulsos nas chaves inicia o processo de magnetização da máquina em cada fase e, leva consequentemente, ao escorvamento da tensão em seus terminais. No momento em que a tensão gerada for maior do que a tensão da fonte CC, o diodo fica polarizado reversamente, e a operação da máquina, passa a ser totalmente autônoma.

As etapas de operação do conversor são divididas em duas: excitação e geração. Estas etapas são descritas a seguir:

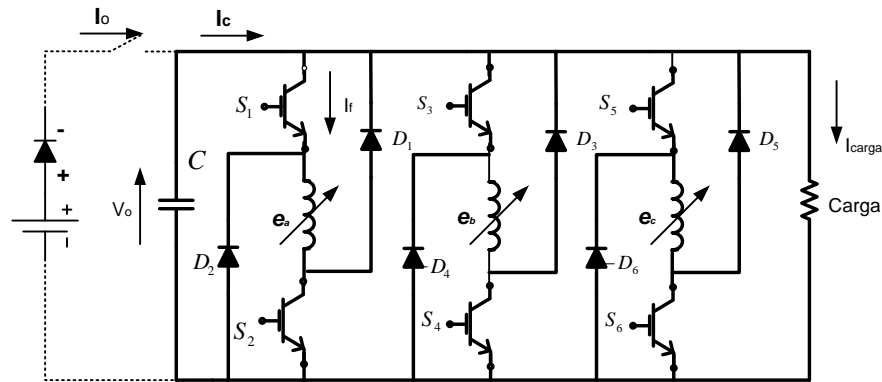


Figura 4.2 – Conversor HB utilizado

Etapa 1 [0-t₀] Excitação inicial: Capacitor carregado com uma tensão inicial

Nesta etapa, o capacitor C está inicialmente carregado com uma tensão inicial V_o , conforme mostra a Figura 4.3. Esta tensão é responsável por gerar o fluxo magnético inicial no enrolamento da máquina. Aqui, foi escolhida a fase A como exemplo, este caminho é visto pela Figura 4.3 e está em negrito, sendo que as chaves S_1 e S_2 estão fechadas.

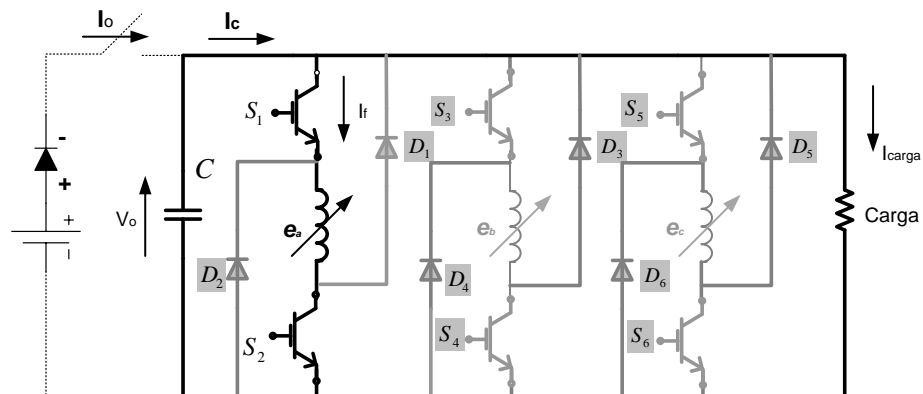


Figura 4.3 - Etapa 1: Excitação da fase A do gerador.

Etapa 2 [t₀-t₁] Geração da fase A

Nesta etapa as chaves S_1 e S_2 são abertas de modo que a energia é armazenada no enrolamento da fase através da excitação e do processo de conversão eletromecânica. Parta da corrente de fase I_f , conforme pode ser observada pela Figura 4.4, é entregue a carga (I_l) e a outra parte carrega o capacitor I_c .

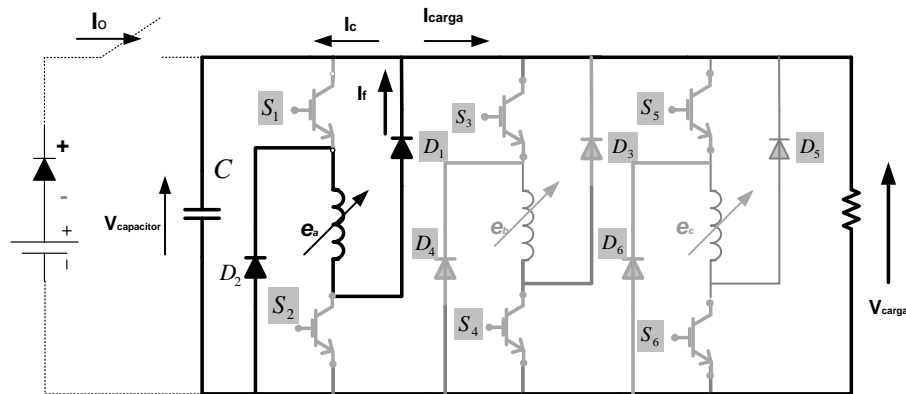


Figura 4.4 - Etapa 2: Excitação da fase A do gerador.

As etapas analisadas para a fase A se repetem para as fases B e C. No tópico a seguir será apresentado o protótipo utilizado.

4.3 - PROTÓTIPO UTILIZADO

O protótipo cujos dados foram usados para as simulações apresentadas neste capítulo é mostrado na Figura 4.5. Esta máquina foi projetada e testada por Borges [10].

Os polos foram enrolados com 50 espiras de fio 15 AWG para suportar uma corrente de aproximadamente 10A. O número de espiras resulta do projeto da máquina.

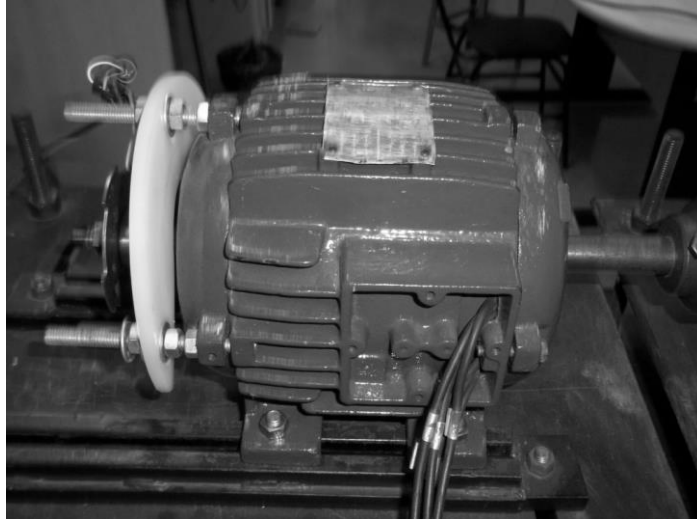


Figura 4.5 – Protótipo da MRV construída no Laboratório de Acionamentos Elétricos da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU.

Tabela 4.1 - Características do GRV

Parâmetros	Valor
Ângulo de Condução	30 graus
Atrito Viscoso	0.026 N.m.s
Culatra do Estator	12 mm
Culatra Rotor	12,4 mm
Comprimento da pilha laminada	107 mm
Dentes do Estator	22,5 mm
Dentes do Rotor	11,7 mm
Diâmetro do Estator	140 mm
Diâmetro do Rotor	70 mm
Gap de Ar	0,4 mm
Largura dos dentes do Estator	19 mm
Largura dos dentes do Rotor	20 mm
Momento de Inércia	0,0028 kg.m ²
Número de espiras por fase	100 volta/fase
Potência Nominal	1 HP
Velocidade Nominal	1200 RPM
Tensão Nominal	220 V
Corrente Nominal	10 A

As etapas de dimensionamento em projeto e de construção resultaram em uma máquina a relutância variável cujas dimensões principais são mostradas na tabela 4.1.

4.4 - MODELO COMPUTACIONAL

A plataforma de simulação foi desenvolvida em ambiente MatLab/Simulink, o fluxograma do processo de implementação é mostrado pela figura 4.6. O programa tem início

com a entrada dos parâmetros elétricos (resistência das fases) e mecânicos (momento de inércia e atrito viscoso). Para resolução da equação de estados do gerador é utilizada ferramenta do MatLab denominada *S-Function*. O fornecimento de dados para resolução desta matriz é obtida pelos blocos: conversor HB, lógica de circuito de disparo das chaves e indutância incremental, sendo que cada um deles tem papel importante para resolução das equações.

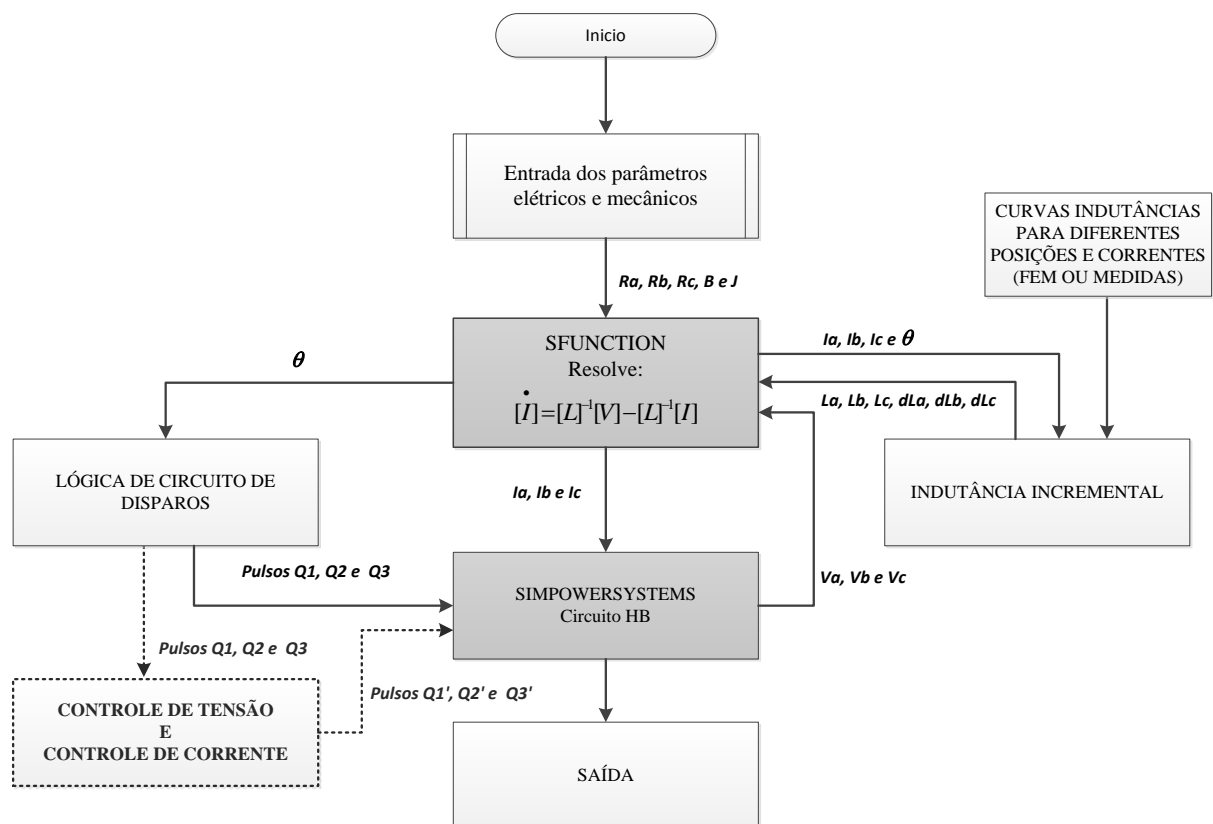


Figura 4.6 – Diagrama de blocos da plataforma de simulação implementada em ambiente MatLab

O bloco conversor é montado através do ambiente de eletrônica de potência *SIMPOWERSYSTEM* que simula as chaves do conversor.

O bloco indutância incremental é desenvolvido através de linhas de programas do MatLab, esse bloco utiliza as expressões matemáticas obtidas no capítulo III. As entradas deste bloco são: correntes das fases e posição do rotor.

O bloco lógico de circuito de disparo é responsável por fornecer os pulsos das chaves do circuito HB, e tem papel fundamental para o correto acionamento do gerador e deve apresentar o instante correto de ligar e desligar as chaves do conversor.

O último bloco do fluxograma, denominado controle de tensão e controle de corrente, é uma estratégia adotada para controlar a tensão gerada e corrente de fase do gerador baseada nos ângulos de magnetização da máquina, influencia somente na operação do gerador em malha fechada.

A obtenção deste fluxograma permite a visualização do sistema geral, o próximo procedimento será detalhar os principais blocos, como conversor HB, lógica do circuito de disparo das chaves e *S-function*.

O conversor utiliza chaves do tipo IGBT e cada enrolamento da máquina usa duas chaves que compreende um braço do conversor, conforme é mostrado na figura 4.7. Os pulsos para o acionamento desta chave são gerados através de um bloco chamado lógica de geração de pulsos de disparos das chaves, a Figura 4.8 mostra o bloco de geração desses pulsos. Cada pulso deste bloco é obtido através do ângulo de condução das chaves que é dependente do perfil da indutância incremental e define a operação da máquina.

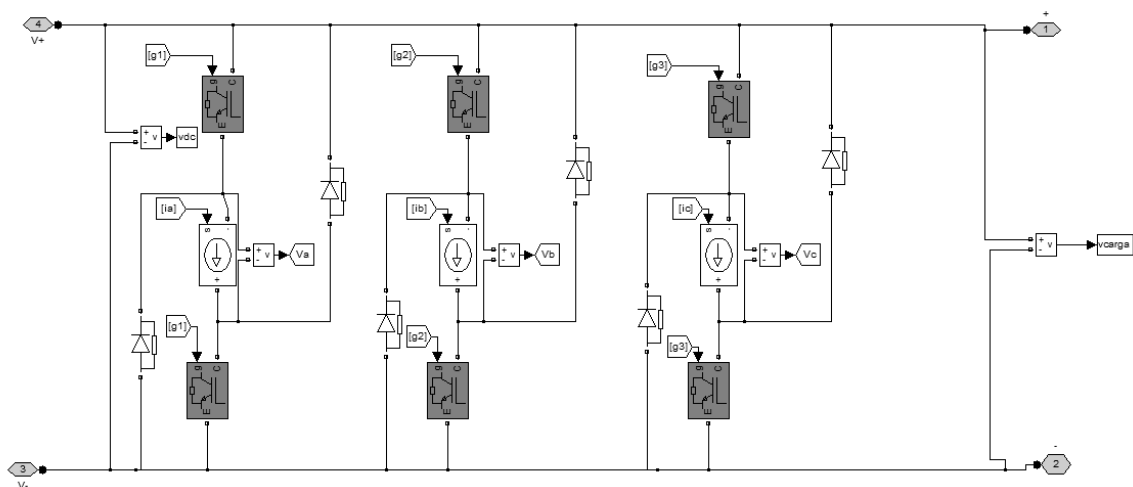


Figura 4.7 - Conversor HB implementado em ambiente Simulink.

Os parâmetros P1, P2, P3 são os sinais de gatilho para as chaves das fases, os quais respondem pelo início e pelo término da excitação em cada uma delas.

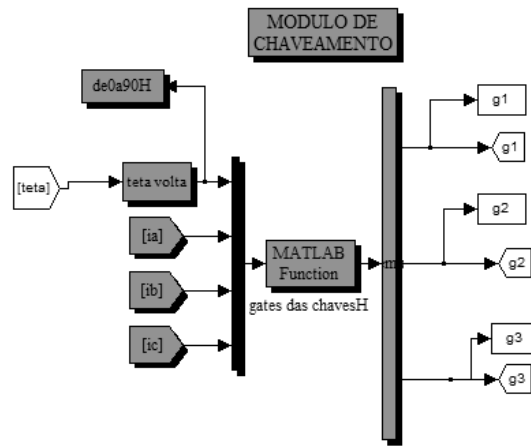


Figura 4.8 - Diagrama de blocos da lógica de disparo das chaves

A Figura 4.9 mostra o ambiente completo de simulação destacando os seguintes blocos: banco de capacitores, carga e modelo do gerador a relutância variável que leva em consideração a saturação do circuito magnético.

A equação de estados é resolvida por integração numérica usando as funções do MatLab, o subsistema computacional utilizado na solução é visto na Figura 4.10.

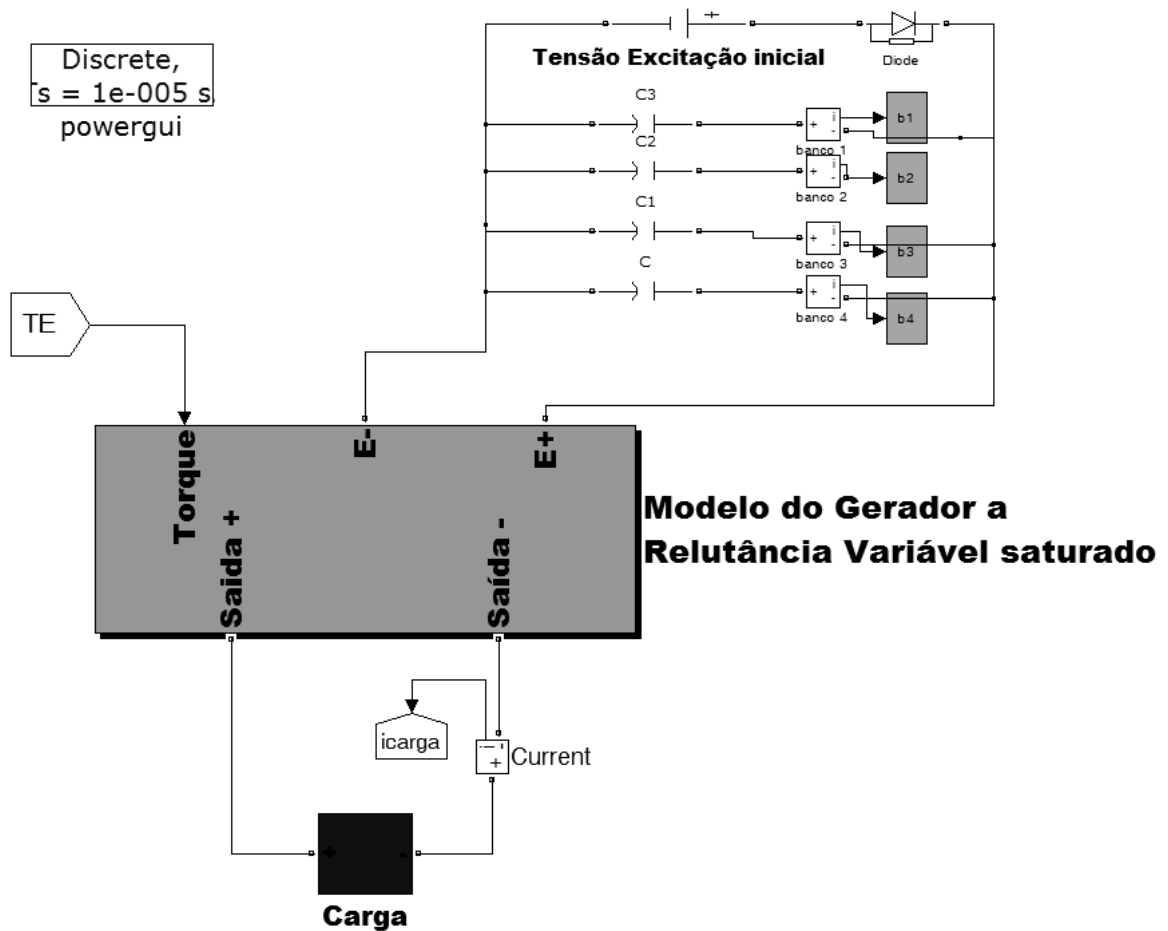


Figura 4.9 - Conjunto completo do gerador a relutância variável no ambiente *Simulink*.

As equações de estados são resolvidas através da função *S-function*. As variáveis de entrada desse subsistema são as tensões nas fases e conjugado, já as variáveis de saída desse subsistema são as correntes das fases, a velocidade angular (ω) e a posição do rotor (θ) que são obtidas a partir dos dados de entrada.

O processo de solução é realizado no domínio do tempo em passo fixo e é feito de modo iterativo, sendo que os valores simulados para tensão em cada fase do gerador realimentam o subsistema para a solução numérica das equações.

A resistência interna da fase, o momento de inércia e o coeficiente de atrito viscoso são parâmetros internos da rotina do GRV.

Esse subsistema simula o enrolamento de cada fase do gerador e serve como ligação para o conversor HB, a ligação entre os dois subsistemas que é responsável pela "interface"

entre o modelo matemático e o modelo do conversor é feita através de um bloco chamado fonte de corrente controlada e cada fonte compreende um enrolamento da máquina.

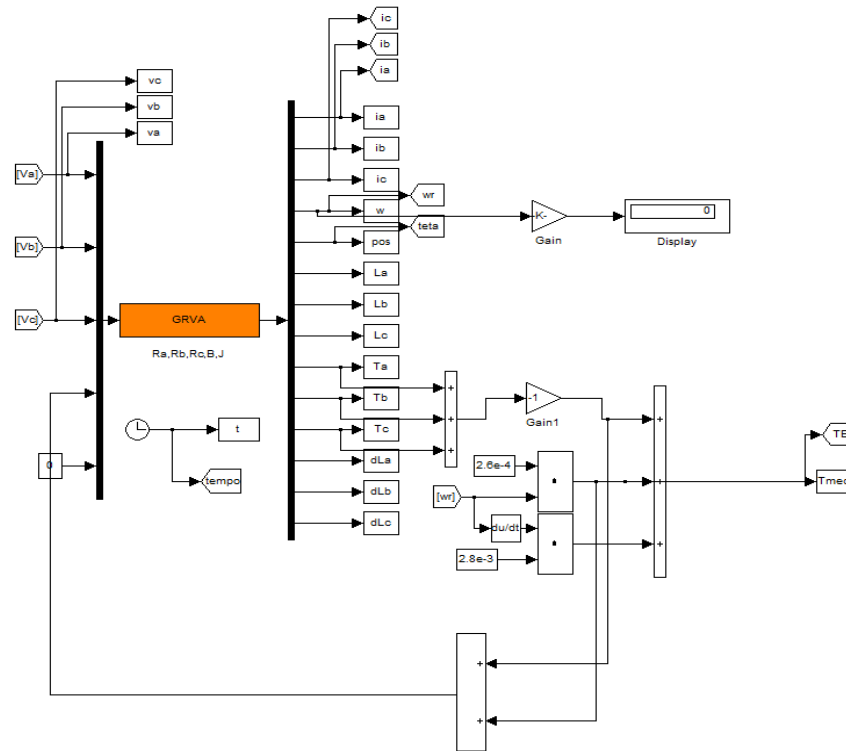


Figura 4.10 - Diagrama de blocos do subsistema para resolução das equações de estados utilizando s-function.

A seguir será feito um estudo sobre o transitório elétrico do gerador.

4.5 - ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELÉTRICOS

Nesta primeira análise, o objetivo é realizar um estudo sobre o transitório elétrico do gerador. Esta análise é feita utilizando a plataforma descrita anteriormente, o primeiro teste é realizado com o gerador operando em vazio e posteriormente são realizados testes com carga resistiva.

4.5.1 - ESCORVAMENTO

O *escorvamento* é o transitório que ocorre no gerador, desde a tensão inicial com o pré-carregamento do capacitor, até o ponto de operação estável, onde se estabelece o regime permanente de tensão.

É importante ressaltar que um conversor eletromecânico operando como gerador em modo autoexcitado, necessariamente se utiliza da característica de saturação magnética. Durante o escorvamento, os incrementos da corrente de excitação que levam a incrementos no fluxo magnético são propiciados pelos incrementos da tensão gerada, num processo de realimentação positiva. Isso ocorre até que a máquina atinja a saturação magnética, quando, então não havendo mais incremento de fluxo magnético, não há incremento da tensão gerada e o sistema se estabiliza. Dessa forma, para representar corretamente o modo de operação, o modelo matemático a ser utilizado deve necessariamente contemplar a saturação magnética.

Para a avaliação do escorvamento do gerador é realizado um teste a vazio por simulação conforme é mostrado pela Figura 4.11 através da representação do circuito elétrico para uma fase do gerador e do banco de capacitores por fase.

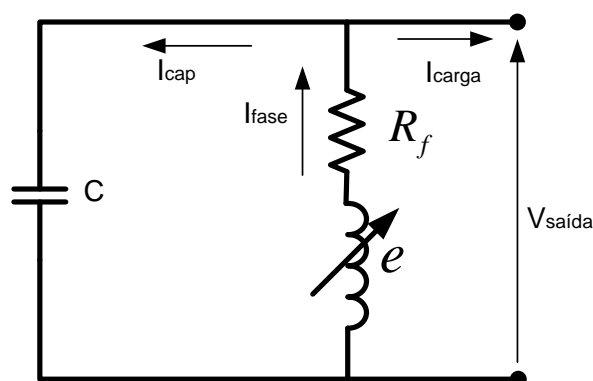


Figura 4.11 - Circuito representativo, do gerador e do banco de capacitores.

A Figura 4.12 mostra o escorvamento para um teste realizado com velocidade no eixo da máquina fixa em 1800 RPM sem carga. O valor de capacitância do banco de capacitores

foi 7 mF. No instante inicial, o banco está carregado com uma tensão de 20 volts, após este tempo o gerador começa a operar fornecendo tensão para suprir as perdas dentro da máquina e manter carregado o banco de capacitores.

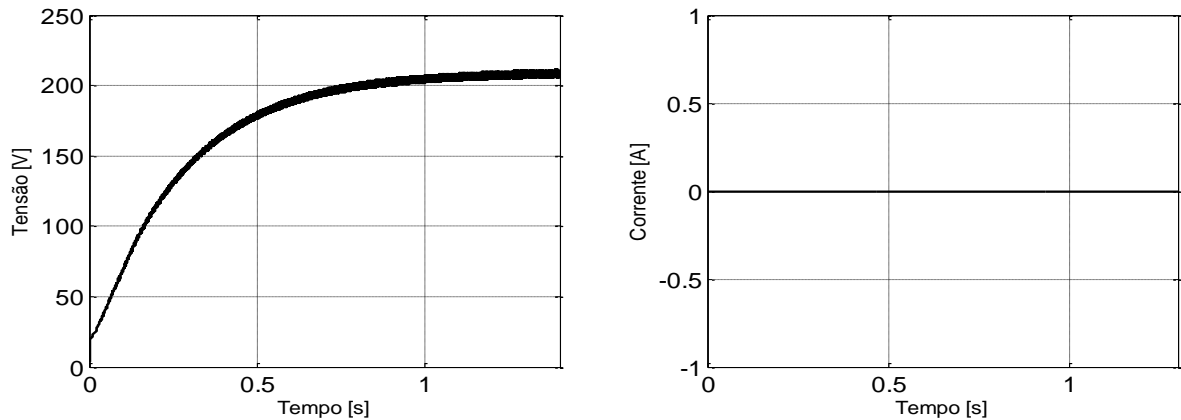


Figura 4.12 - Tensão gerada e corrente na carga - Transitório de escorvamento.

A Figura 4.13 mostra as correntes nas fases do gerador, sendo que cada fase contribui para aumentar a tensão gerada, para essa operação, a corrente de pico da fase A foi 170 amperes e seu valor RMS 66,86 amperes. Em cada período de condução de corrente nas fases é produzido uma contribuição individual que irá influenciar na tensão gerada, essa tensão começa a subir até atingir a tensão máxima, ou seja, operação em regime permanente. A Figura 4.14 mostra as tensões nas fases A, B e C do gerador evidenciando as etapas de magnetização e desmagnetização ou geração que foi mostrada na análise das etapas do conversor.

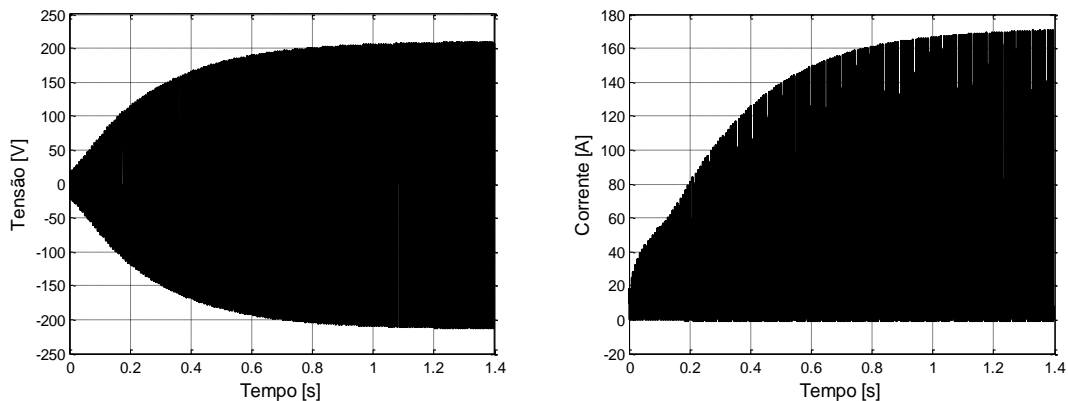


Figura 4.13 – Tensão e corrente na fase.

Outra observação que pode ser feita é que o tempo de escorvamento nesta simulação ficou em torno de 1 segundo.

4.5.2 - ESCORVAMENTO COM A INCLUSÃO DE CARGA RESISTIVA NOS TERMINAIS DA MÁQUINA

Com o propósito de simular o gerador e testá-lo para diferentes cargas e velocidades em seu eixo, foram utilizados testes do gerador para três diferentes cargas $40\ \Omega$, $60\ \Omega$ e $80\ \Omega$ e para diferentes velocidades da máquina primária (turbina) 400 RPM até 2400 RPM. O valor do banco de capacitores foi fixado em 7 mF.

A simulação é feita de forma semelhante à simulação do escorvamento, a diferença está na resistência da carga que é colocada em paralelo com o capacitor e fase do gerador. Para simplificar os resultados são apresentados apenas os gráficos de tensão e corrente de carga, para carga de $40\ \Omega$. Estes resultados estão representados nas Figuras de (4.14) a (4.24).

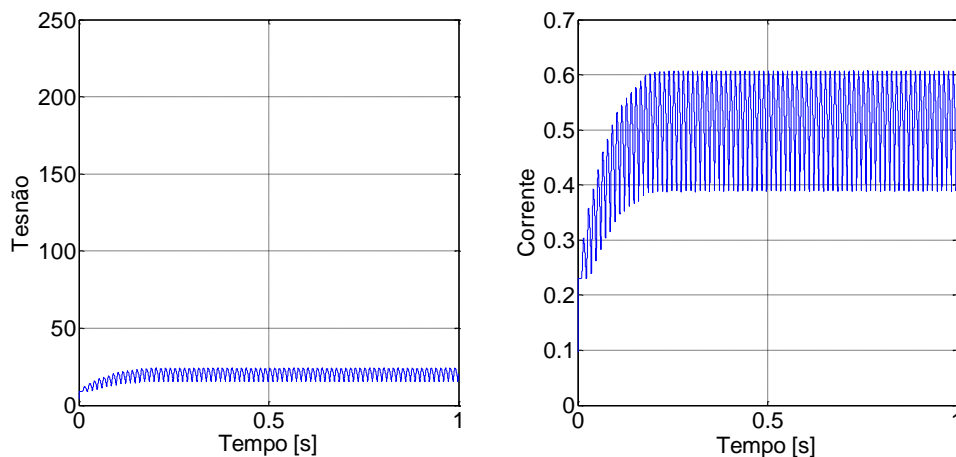


Figura 4.14 - Tensão e Corrente de carga 400 RPM- 40 ohm

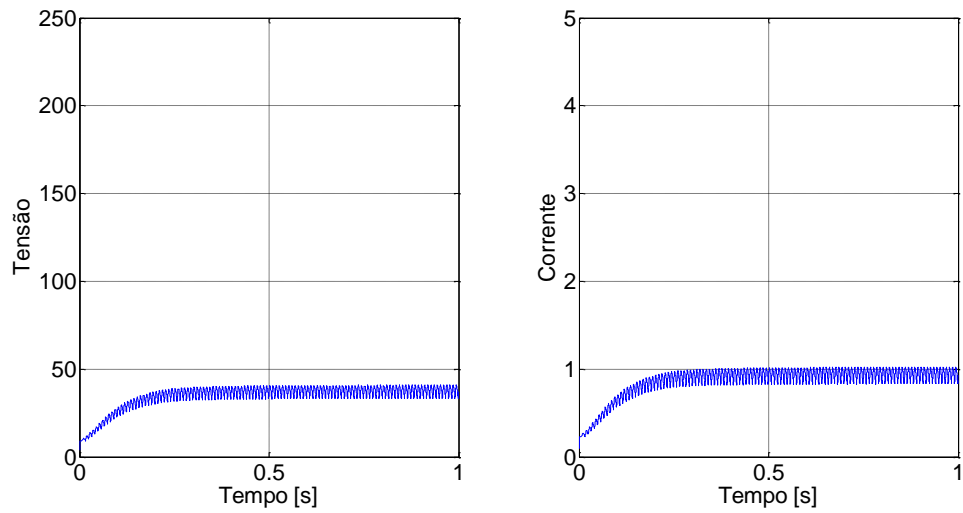


Figura 4.15 - Tensão e Corrente de carga 600 RPM - 40 ohms

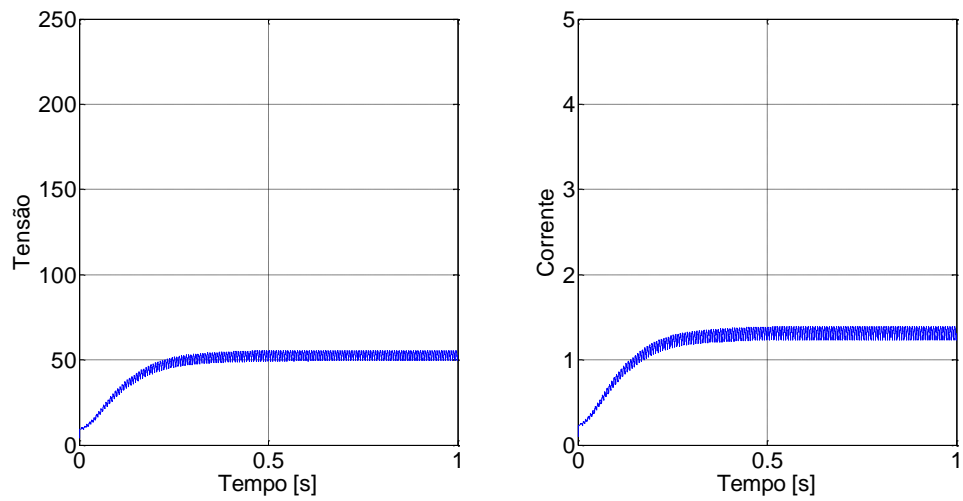


Figura 4.16 - Tensão e Corrente de carga 800 RPM - 40 ohms

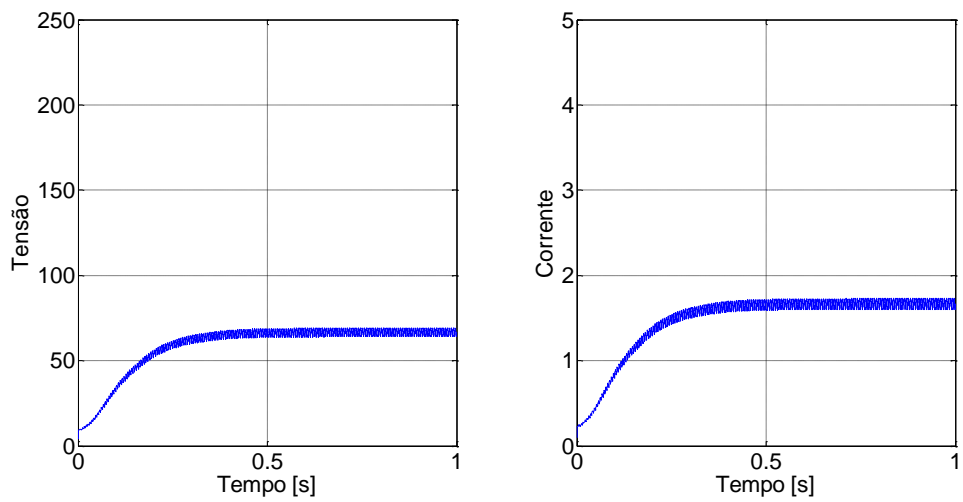


Figura 4.17 - Tensão e Corrente de carga 1000 RPM - 40 ohms

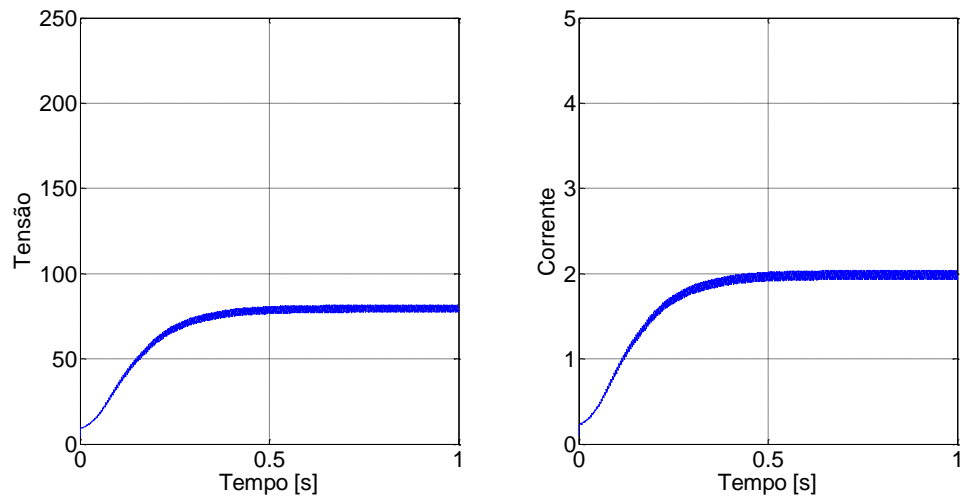


Figura 4.18 - Tensão e Corrente de carga 1200 RPM - 40 ohms

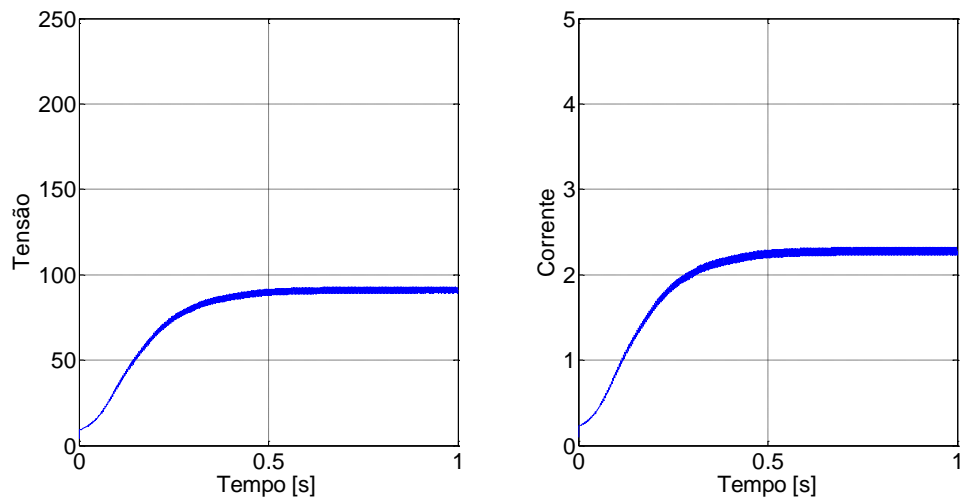


Figura 4.19 - Tensão e Corrente de carga 1400 RPM - 40 ohms

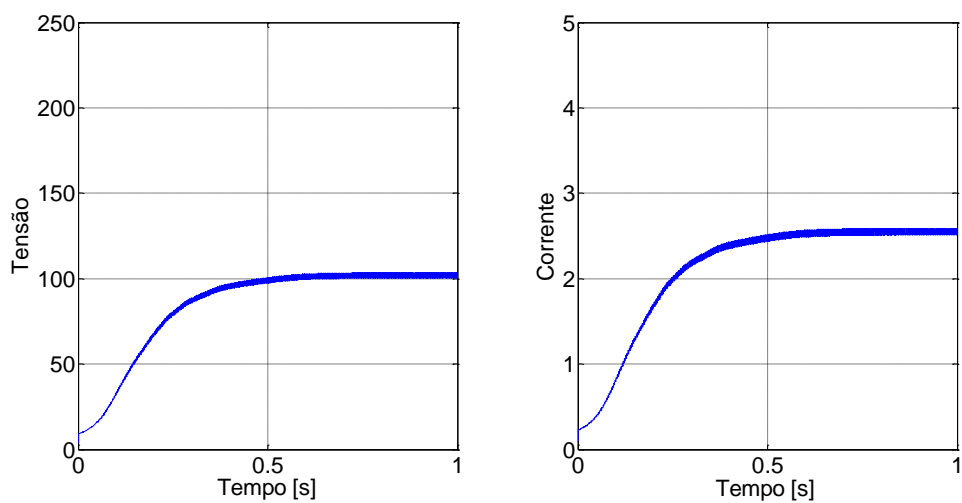


Figura 4.20 - Tensão e Corrente de carga 1600 RPM - 40 ohms

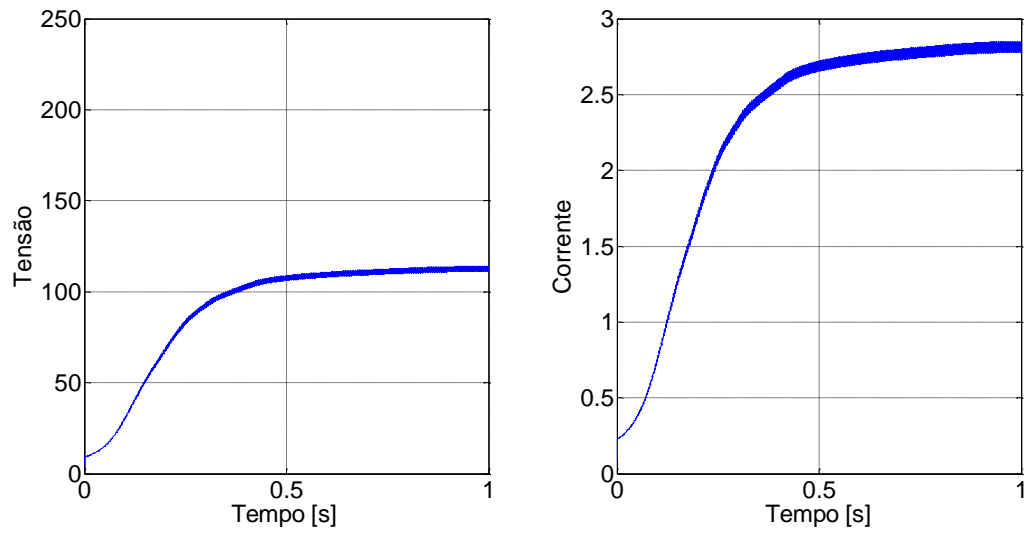


Figura 4.21 - Tensão e Corrente de carga 1800 RPM - 40 ohms

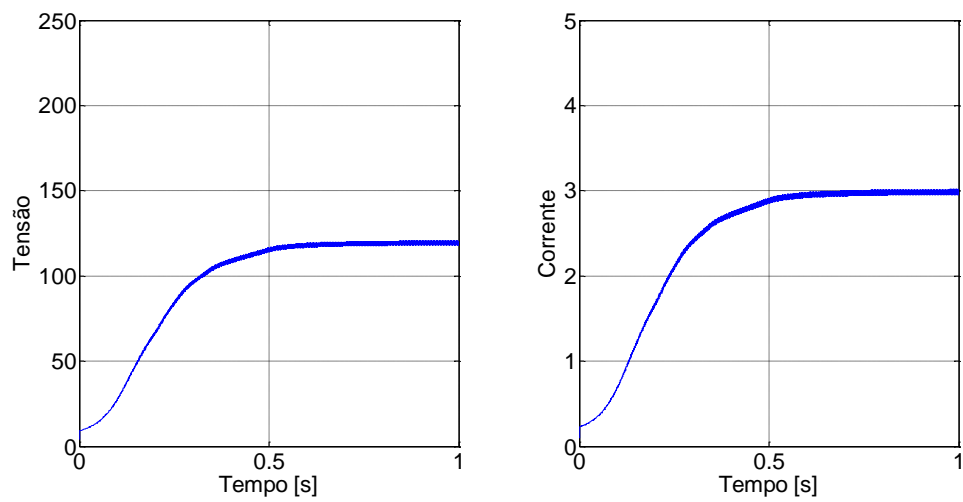


Figura 4.22 - Tensão e Corrente de carga 2000 RPM - 40 ohms

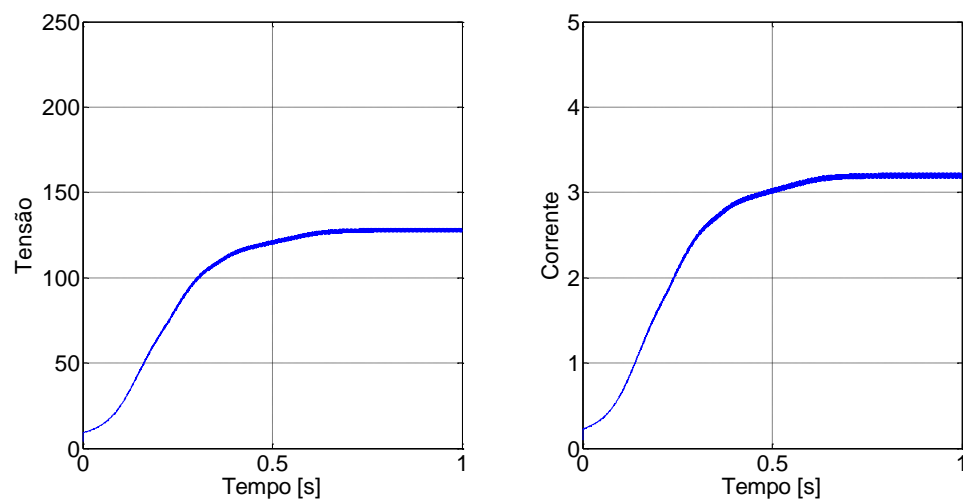


Figura 4.23 - Tensão e Corrente de carga 2200 RPM - 40 ohms

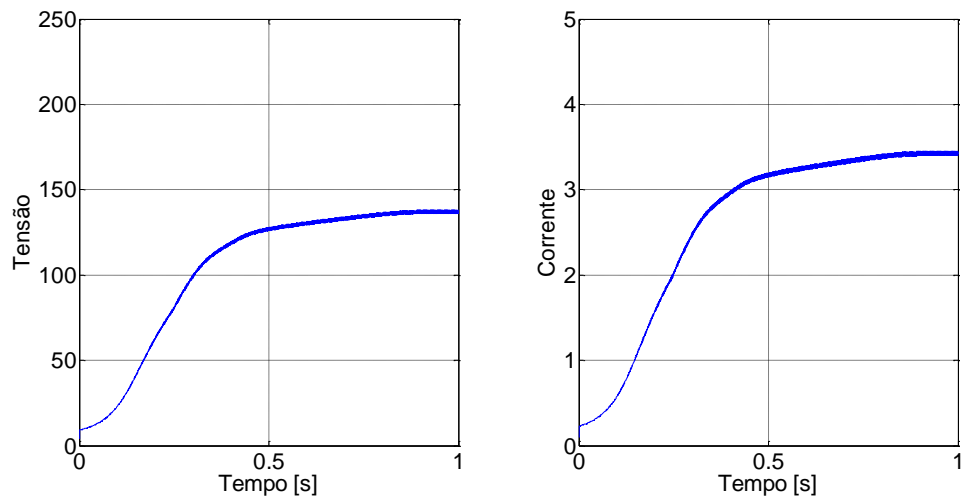


Figura 4.24 - Tensão e Corrente de carga 2400 RPM - 40 ohms

Com os testes realizados os dados foram agrupados, e montada uma curva de tensão gerada por velocidade para diferentes valores de carga, a curva é mostrada pela figura 4.25.

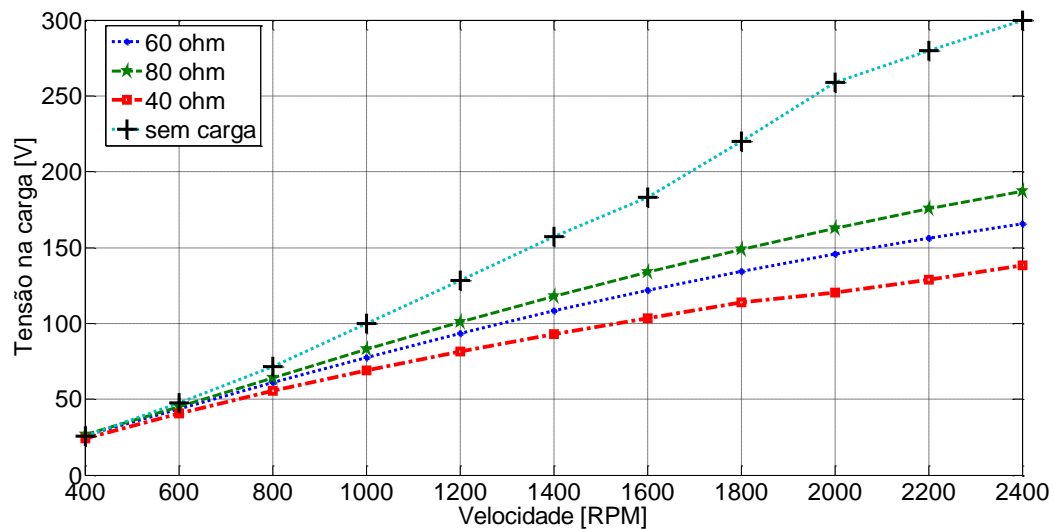


Figura 4.25 - Curva de tensão gerada por velocidade para diferentes valores de carga.

Através da realização desses testes de escorvamento com a inclusão de diversas cargas nos terminais do gerador as conclusões são:

- ✓ No gerador a relutância variável operando no modo autoexcitado, a tensão gerada depende da velocidade em que é acionada. Quanto maior a velocidade

maior o valor da tensão gerada, até chegar ao limite de saturação onde não se impõe mais fluxo na máquina;

- ✓ Na operação neste modo é possível observar que a tensão gerada também depende do valor da carga que é conectada em seus terminais, a relação é: quanto maior a resistência de carga maior será a tensão gerada;
- ✓ Existe uma grande dependência do valor da capacitância tanto para excitação do gerador quanto para a redução de oscilação de tensão nos terminais, esse valor deve ser suficiente para atender esses dois parâmetros.
- ✓ A Simulação só foi possível ser realizada com a inclusão da saturação magnética no modelo matemático.

4.6 - ANÁLISE DINÂMICA DO GERADOR

Após realizar testes de escorvamento para diferentes cargas e velocidades no eixo da máquina, esta seção traz uma análise em regime permanente e transitório de variáveis de estado da máquina.

Os testes que serão apresentados nas próximas seções foram obtidos com o gerador operando com as seguintes características:

- Velocidade máquina primária 1800 RPM
- Resistência de carga 40 ohm
- Valor do banco de capacitores 7 mF
- Excitação inicial 10 V

4.6.1 - Ensaio com o gerador operando com velocidade fixa

A Figura 4.26 mostra a tensão gerada na carga, esta tensão ficou em torno de 105 volts e o transitório de escorvamento foi de 0,5 segundos, pode-se observar que a tensão conforme

afirmado anteriormente é uma tensão contínua, porém pulsada. Esse comportamento é mostrado pela figura 4.26, característica inerente deste tipo de máquina.

A Figura 4.27 apresenta as correntes nas fases durante o transitório de escorvamento para mesma situação, observando que esta corrente estabilizou para um valor de pico próximo a 75 ampères. A Figura 4.28 mostra a corrente instantânea e média ($I_{\text{média}} = 17,6$) na fase A para a mesma situação em regime permanente.

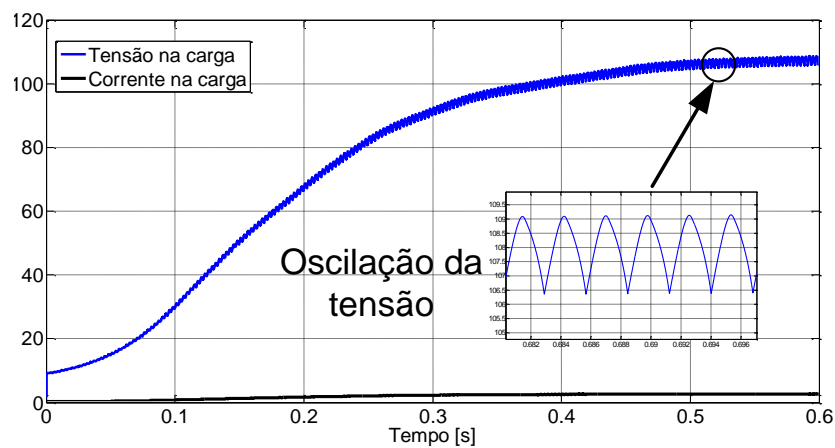


Figura 4.26 – Tensão [V] e corrente [A] na carga durante transitório de escorvamento

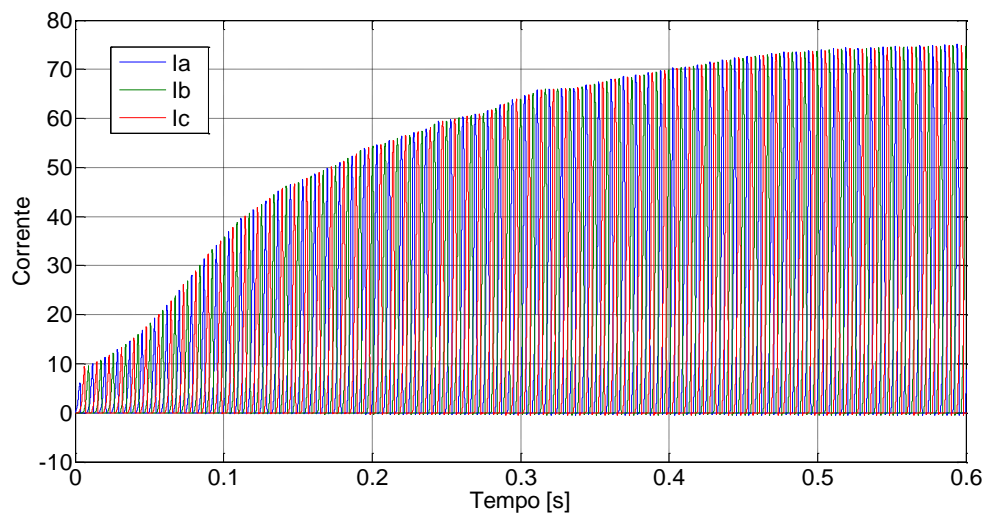


Figura 4.27 – Corrente nas fases A, B e C no transitório de escorvamento

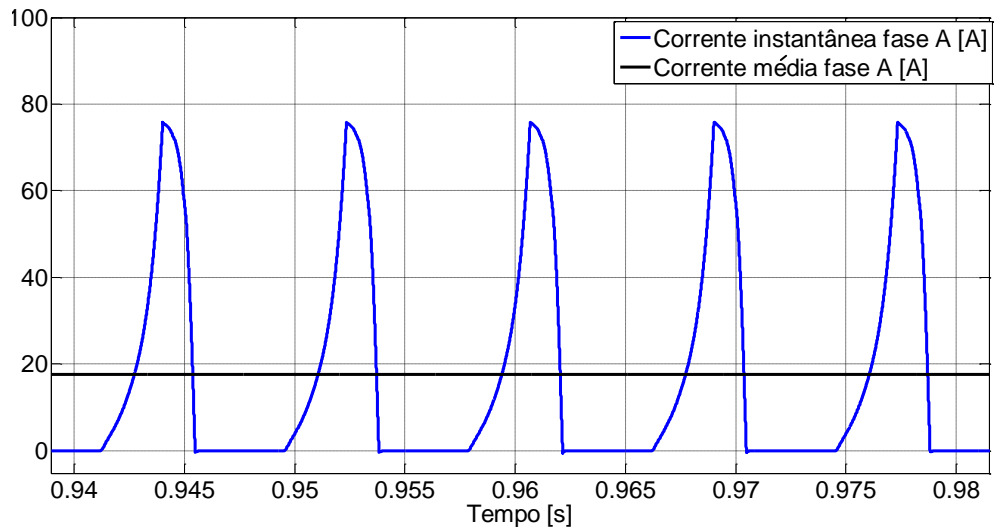


Figura 4.28 – Corrente instantânea e média na fase A em regime permanente

A Figura 4.29 apresenta a tensão na fase do gerador durante o período de transitório de escorvamento, onde é possível observar que esta tensão se estabiliza próximo de 105 volts.

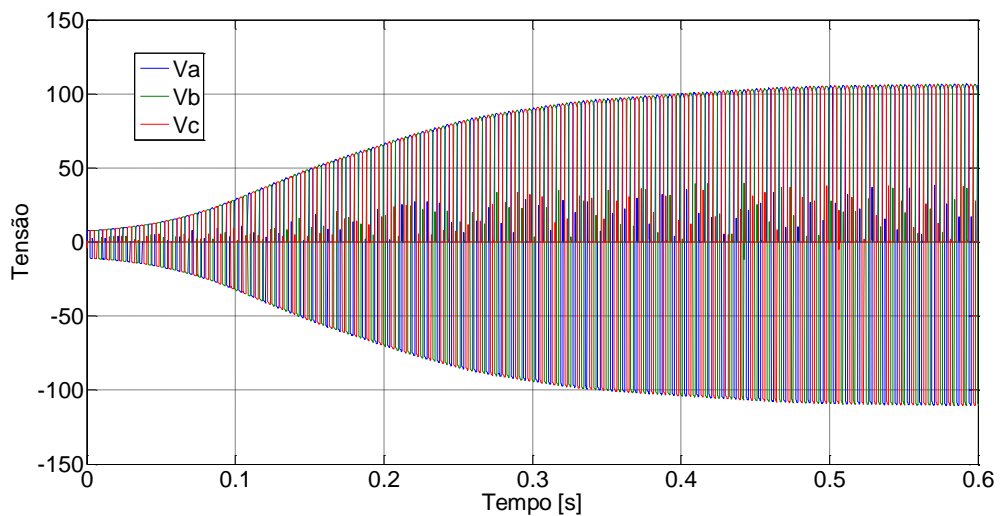


Figura 4.29 - Tensão nas fases A, B e C no transitório de escorvamento

A Figura 4.30 mostra para a mesma situação a tensão na fase em regime permanente evidenciando as etapas de excitação (parte positiva da figura) e desmagnetização (parte negativa da figura).

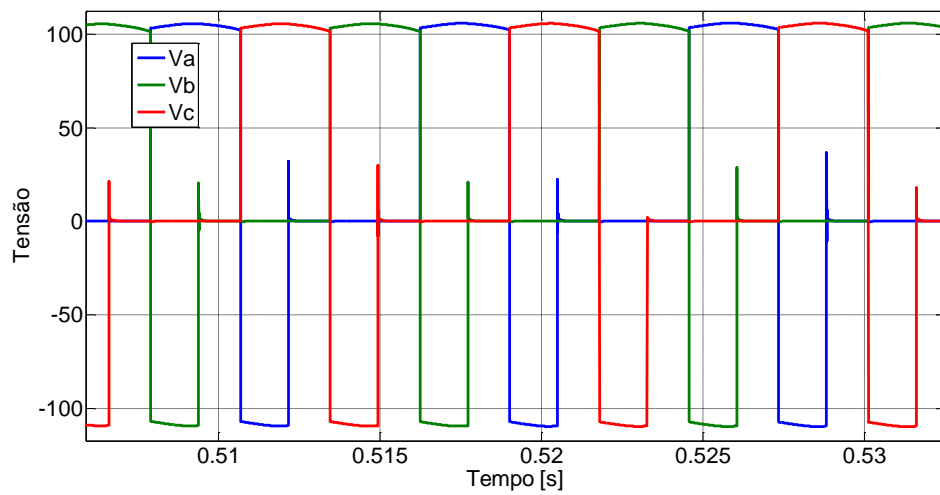


Figura 4.30 - Tensão nas fases A, B e C [V] em regime permanente

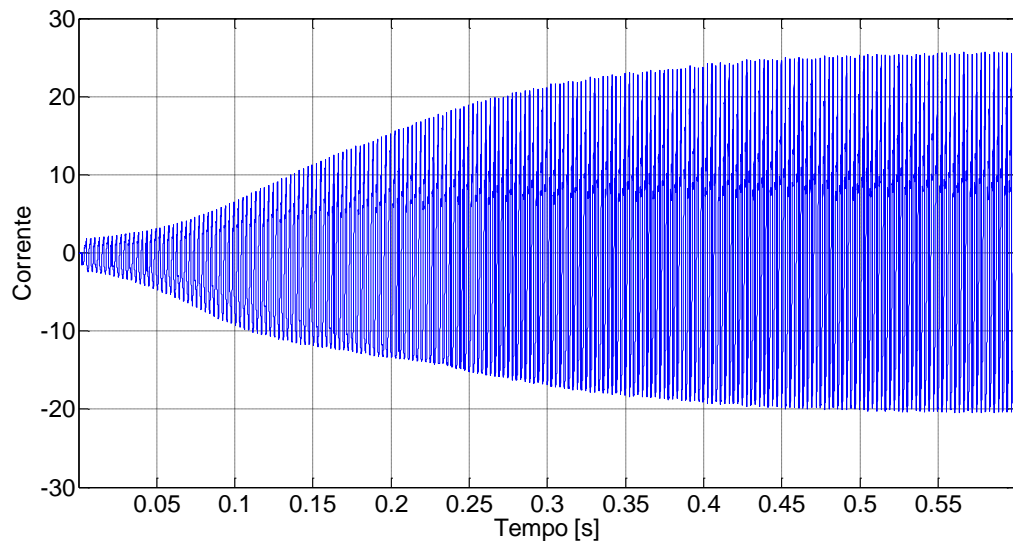


Figura 4.31 – Corrente no capacitor [A] no transitório de escorvamento

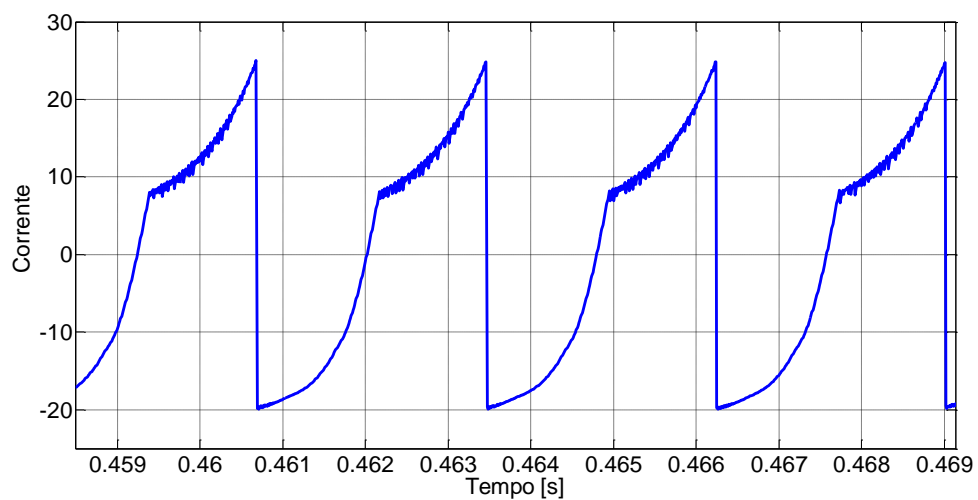


Figura 4.32 – Corrente no capacitor [A] – regime permanente

A Figura 4.31 mostra a corrente no capacitor durante o transitório de excitação inicial. A corrente em regime permanente do capacitor mostrado pela Figura 4.32 é alternada, porém não-senoidal. Para esta situação considerando o harmônico fundamental (360 Hz) o valor RMS da corrente foi 15,5 amperes.

4.6.2 - Ensaio com o gerador operando com falta de fase

A figura 4.33 mostra a tensão na carga e corrente na carga, no instante de 1 segundo o gerador perde a fase C. Após este tempo a tensão na carga começa a cair devido à falta de uma das fases do gerador.

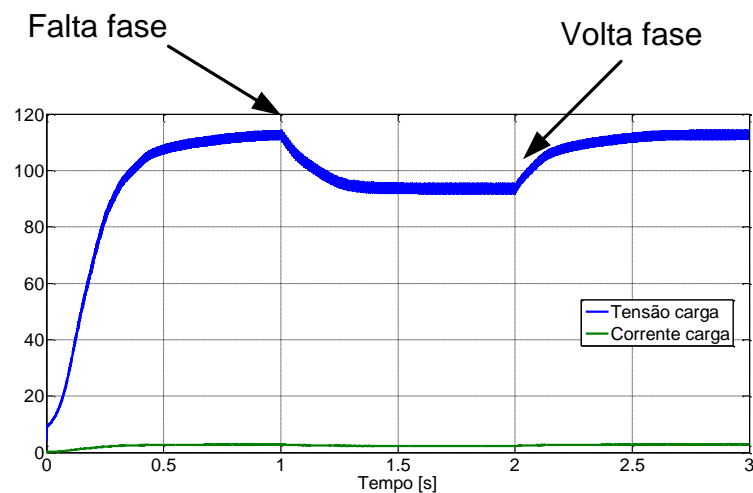


Figura 4.33 – Curva tensão na carga e corrente na carga

A figura 4.34 mostra as correntes nas fase A, B e C do gerador no instante da falta de fase as outras continuam operando normalmente.

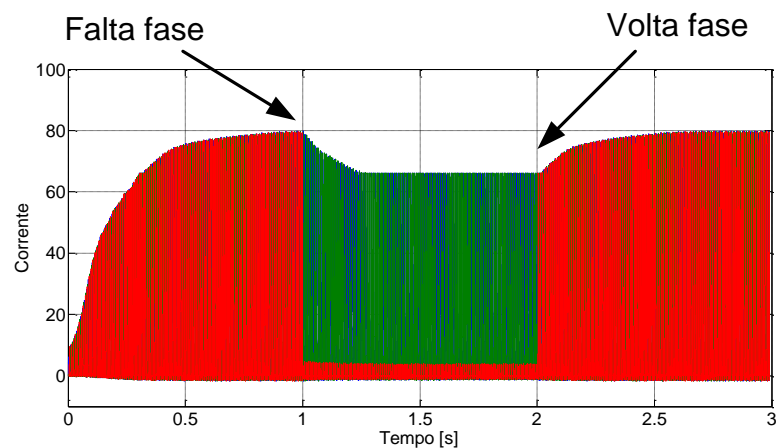


Figura 4.34 – Correntes nas fases A, B e C.

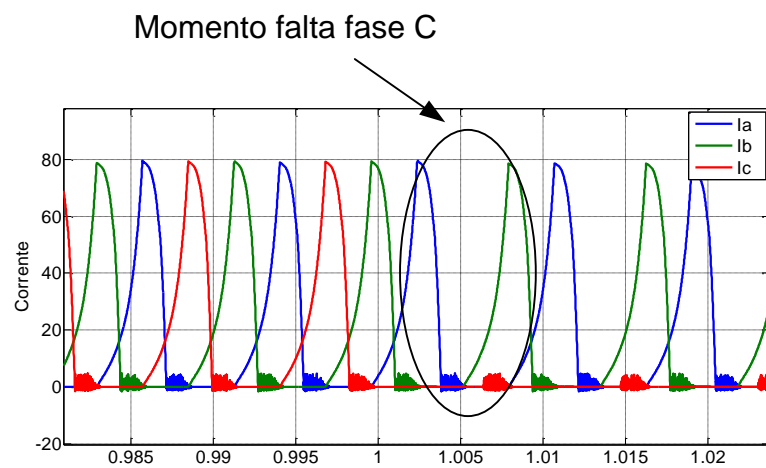


Figura 4.35 – Correntes nas fases A, B e C

A figura 4.35 mostra as correntes nas fases A, B e C de forma ampliada no instante da perda de fase do gerador. Fica evidenciado na figura que a fase C está inoperante.

Neste ensaio no instante de 2 segundos a fase volta e o gerador volta a operar normalmente. A falta de fase no gerador provoca uma diminuição na tensão gerada, mesmo que esse fato ocorra é possível a operação do gerador. Sendo esta uma das vantagens desse tipo de máquina.

4.6.3 - Ensaio com o gerador operando com rejeição de carga

Nesta seção é evidenciada a operação do gerador submetido à rejeição de carga. Para avaliar esse aspecto é realizado um teste com o gerador submetido à rejeição de carga no

instante de 1 segundo, conforme pode ser visto pela figura 4.36. Neste momento a tensão na carga e corrente nas fases começa a crescer até atingir seu valor máximo. Para o gerador sem carga os picos de correntes podem chegar próximos a 200 amperes o que torna inviável a operação do gerador em malha aberta para este caso.

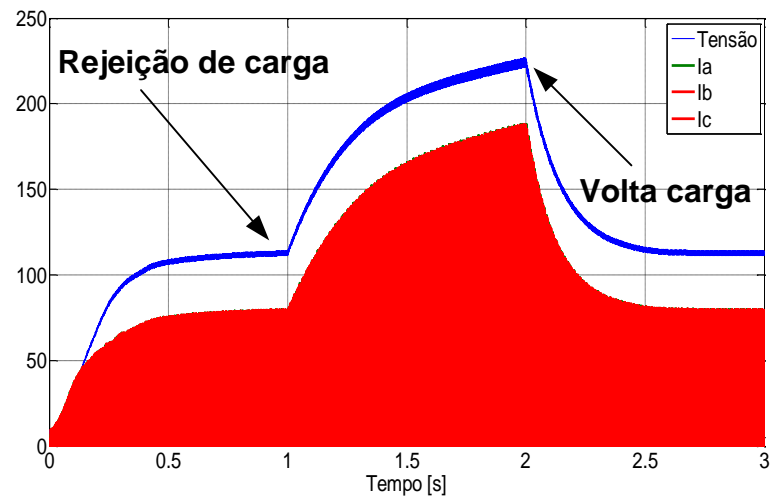


Figura 4.36 – Tensão na carga, correntes nas fases A, B e C

As figuras 4.37 e 4.38 mostra tensão e corrente no instante que o gerador rejeita carga e volta carga, respectivamente.

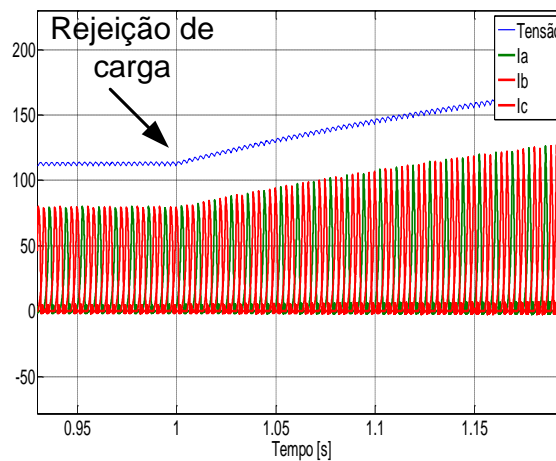


Figura 4.37 – Tensão na carga e correntes nas fases no momento rejeição de carga

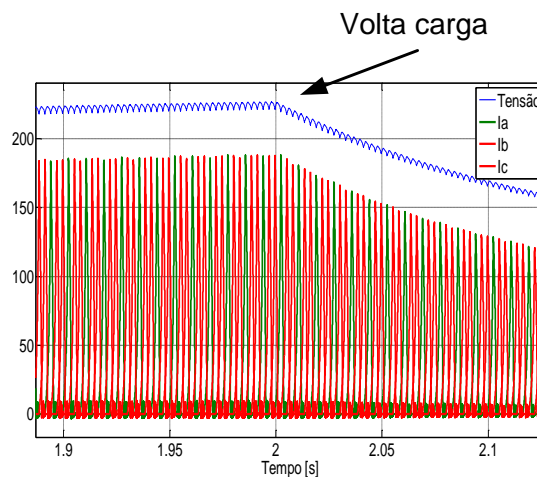


Figura 4.38 – Tensão na carga e corrente nas fases no momento que volta a carga

4.6.4 - Ensaio com o gerador operando com variações de carga

O gerador foi testado na seção anterior com diferentes velocidades, falta de fase, rejeição de carga. Esta seção traz o gerador submetido a variações de carga.

Conforme mostrada na figura 4.39 no instante 1 segundo a carga foi variada de 20Ω para 40Ω da forma tipo degrau. Neste instante a tensão na carga e as correntes nas fases começam a subir até atingir o limite estabelecido pela dinâmica do gerador. No instante de 2 segundos a carga volta novamente de 40Ω para 20Ω , conforme evidenciado pela figura.

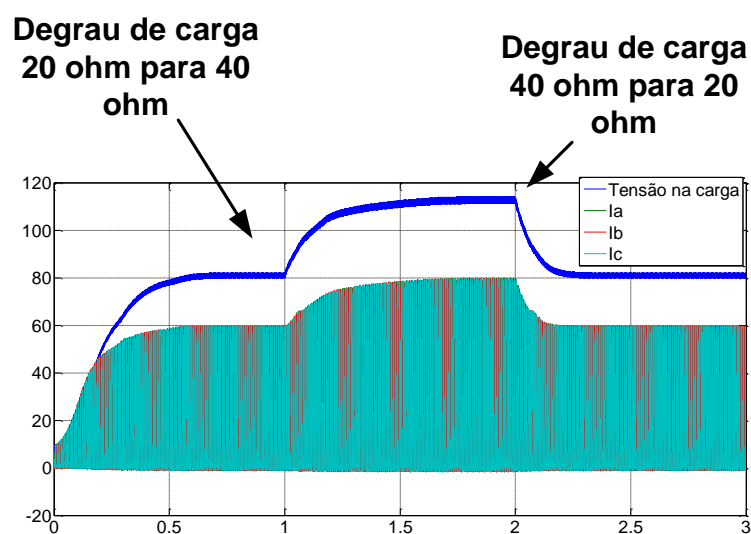


Figura 4.39 – Tensão na carga e correntes nas fases.

A dependência da tensão gerada e corrente das fases com a carga é evidenciada nesta simulação.

Existe a possibilidade de operação do GRV operando no modo autoexcitado controlado, que atenda requisitos de operação de diferentes sistemas.

4.6.5 - Ensaio com o gerador operando em curto-circuito

Por fim, esta seção traz o gerador submetido a curto-circuito. Conforme mostrada na figura 4.40 no instante 1 segundo ocorre um curto-circuito nos terminais do gerador. Neste instante a tensão na carga e as correntes nas fases começam a cair até atingir o limite estabelecido pela dinâmica do gerador. No instante de 2 segundos é retirado o curto-circuito dos terminais do gerador. No mesmo instante, o gerador retorna a operação normal conforme evidenciado pela figura.

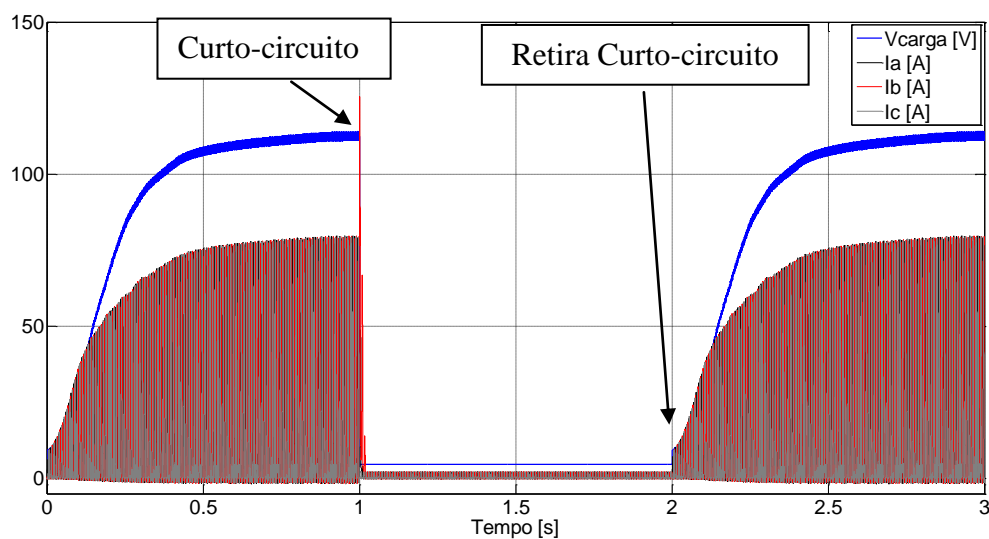


Figura 4.40 – Tensão na carga e correntes nas fases.

Para esta situação o gerador após o curto-circuito voltou para a tensão estabelecida. O GRV operando no modo autoexcitado, mesmo após um curto-circuito não precisa de uma

fonte externa para excitação inicial. O que torna viável a utilização deste gerador em sistemas isolados.

4.7 - CONCLUSÃO

Uma nova plataforma foi construída para simular o gerador a relutância variável para operação no modo autoexcitado. O modelo que contempla a saturação proposto por Andrade [62] foi incluído na plataforma e permitiu fazer a análise dinâmica do comportamento da máquina operando no modo autoexcitado.

O ambiente de programação escolhido para o desenvolvimento do “software” destinado ao estudo do GRV foi o ambiente MATLAB/SIMULINK/SIMPOWERSYSTEM[®]. Esta escolha é devido à facilidade de integração entre o ambiente de modelagem matemática descrito em matriz de estados e o acionamento através da eletrônica de potência através do pacote SIMPOWERSYSTEM.

O programa também foi usado para incluir o capacitor para a automagnetização do gerador e permitiu estudar sua operação em regime permanente e transitório (escorvamento).

Este programa possibilitou dimensionar os valores dos componentes usados na montagem da bancada, tais como: carga, capacitores, chaves, etc., e montar a bancada de experimentos que será apresentada no capítulo VI.

O programa também possibilitou a simulação deste gerador controlado que será mostrado em sequência.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DA OPERAÇÃO DINÂMICA DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL AUTOEXCITADO CONTROLADO

5.1 - INTRODUÇÃO

As aplicações do GRV até o momento tem ganhado interesse na área de geração de eletricidade de aeronaves, automotiva e parques eólicos, dentre outras aplicações que foram descritas no capítulo II. Nas aplicações automotivas e aeroespaciais, a máquina opera em velocidades elevadas, o que não é problema para este tipo de máquina, em aplicações eólicas a característica de operação é diferente, a máquina opera em baixa velocidade com alto conjugado no eixo. Com relação à energia eólica, por exemplo, torna-se essencial a aplicação de um controle a fim de manter a tensão fixa nos terminais da máquina, podendo variar a velocidade no eixo da máquina que a tensão permanece em um valor constante.

Já existem publicações envolvendo o GRV com controle de tensão operando no modo excitação independente [1][4].

Dentro deste contexto, o presente capítulo apresenta uma estratégia de controle de tensão gerada e corrente de fase para o sistema de geração utilizando o GRV e sua operação no modo autoexcitado.

5.2 - CONTROLE DE TENSÃO

No capítulo IV foi apresentado o conversor trifásico tipo HB, as etapas desenvolvidas anteriormente foram duas, excitação e geração. Para a estratégia proposta neste capítulo continuam essas mesmas etapas, com exceção da inclusão de mais uma etapa denominada incremento do fluxo de magnetização. A grande vantagem desta operação é de não necessitar

de alterações no hardware e na estrutura do conversor, basta fazer o controle adequado dos pulsos das chaves superiores do conversor, mostrado através da Figura 5.1.

As etapas do conversor para esta estratégia são divididas em três para cada fase do gerador. As etapas são descritas a seguir:

Etapa I - Excitação

Nesta etapa, o capacitor C está inicialmente carregado com uma tensão inicial V_o , conforme mostra a Figura 5.1. Esta tensão é responsável por gerar o fluxo magnético inicial no enrolamento da máquina, sendo que nesta etapa o processo de excitação é iniciado com a fase A. O caminho da corrente é mostrada em negrito, e as chaves S_1 e S_2 estão fechadas.

Etapa II – Etapa intermediária entre excitação e geração (EIEG)

A criação da etapa de EIEG no circuito é dada pela abertura da chave S_1 . Nesta etapa o fluxo de energia circula através do diodo D_2 e da chave S_2 de acordo com a Figura 5.2.

A corrente na fase cresce devido à força contra eletromotriz, sendo proveniente da máquina acoplada ao eixo do gerador. Assim, nenhuma corrente é solicitada do capacitor e a energia acrescida ao indutor é proveniente apenas da conversão eletromecânica.

Etapa III – Geração (Transferência energia para a carga)

Nesta etapa as chaves S_1 e S_2 são abertas de modo que a energia é armazenada no enrolamento da fase através da excitação e do processo de conversão eletromecânica. Esta corrente I_{fase} , conforme pode ser observada pela Figura 5.3, alimenta a carga (I_1) e carrega o capacitor I_c .

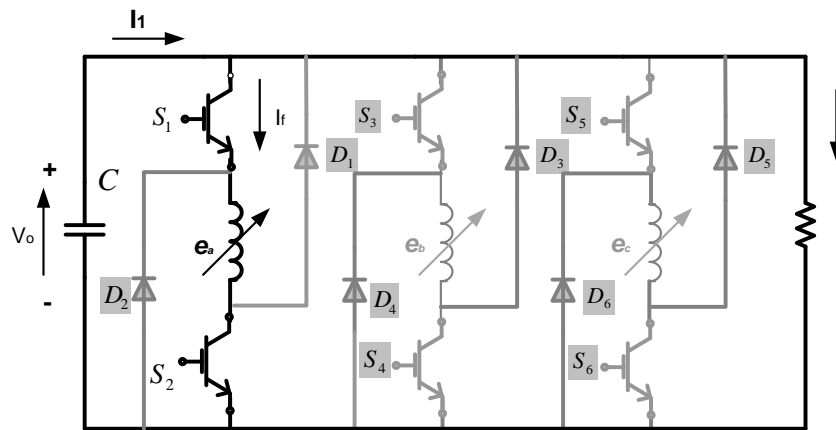


Figura 5.1 – Região de excitação

(a)

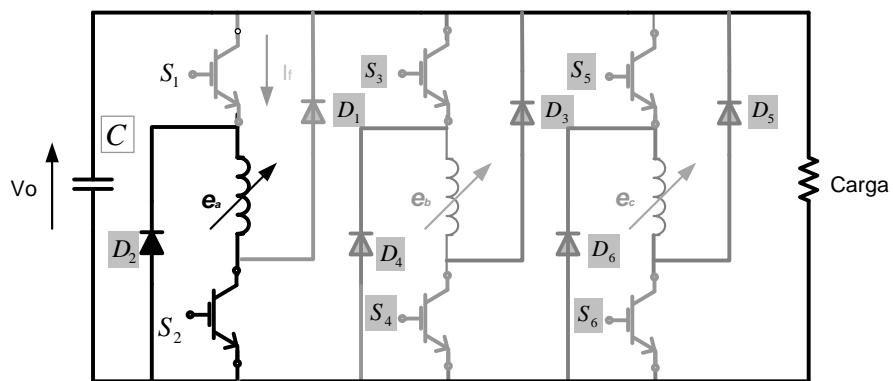


Figura 5.2 – EIEG

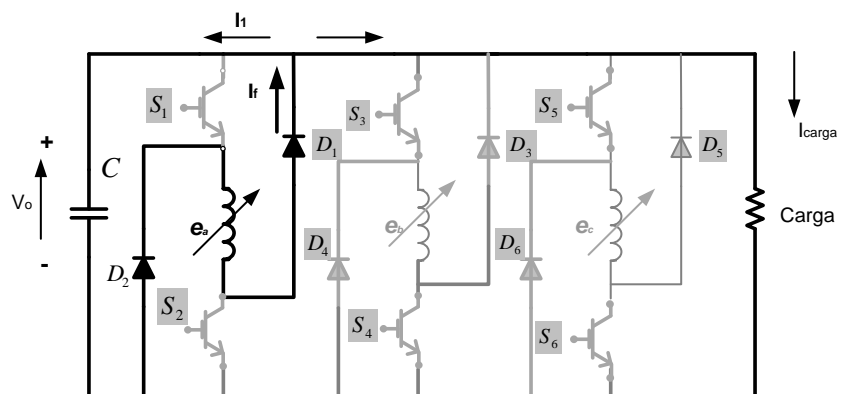


Figura 5.3 – Região de geração

A estratégia apresentada consiste no controle da abertura e fechamento da chave S_1 , sendo que a inclusão deste controle se reflete na adição e aproveitamento de todas as etapas

do conversor. Isto torna viável a operação do gerador controlado necessitando apenas de modificações no software.

Para operação em malha fechada com controle da tensão gerada, foi desenvolvida uma estratégia que consiste na variação da largura do período de magnetização das fases, mantendo θ_{on} fixo e alterando o valor de θ_{off} (ângulo de abertura das chaves) através de um controlador PI. A grande vantagem desta estratégia é que a atuação do controlador é realizada apenas na chave superior do conversor. A chave inferior é mantida em condução até que os 30° (janela de condução para acionamento do gerador de estrutura 6/4) sejam completados para permitir que a etapa intermediária de incremento do fluxo de magnetização ocorra entre as etapas de magnetização e desmagnetização das fases. Em seguida, a chave inferior do conversor é aberta, fazendo com que a energia armazenada na bobina da fase seja entregue à carga. A representação em diagrama de blocos do sistema completo é mostrada na Figura 5.4.

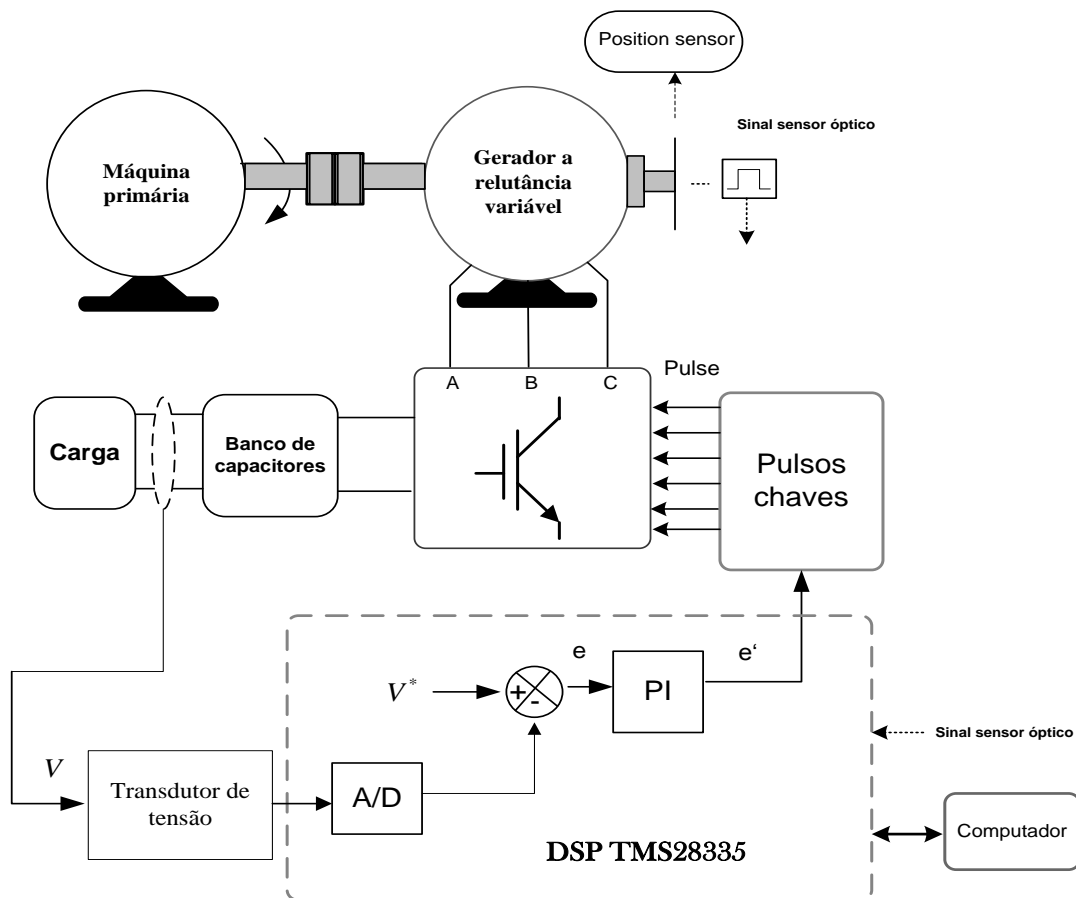


Figura 5.4 - Representação em diagrama de blocos do sistema completo

No sistema de acionamento proposto mostrado na Figura 5.4, o controlador de tensão é constituído de uma malha de realimentação de tensão, uma tensão de referência V^* e um controlador que é do tipo PI (Proporcional e Integral). A equação 5.1 representa o modelo matemático do controlador PI.

$$e' = K_p (V^* - V) + K_i \frac{1}{s} \cdot (V^* - V) \quad (5.1)$$

O controlador compara o valor de referência V^* com a tensão medida através do transdutor V , determinando o erro de tensão e produzindo um sinal de controle e' que é o erro compensado.

A integração é feita de forma discreta utilizando o método trapezoidal e é dada por:

$$U_{k+1} = U_k + \frac{T_s}{2} (I_k + I_{k+1}) \quad (5.2)$$

onde:

U_{K+1} = saída do integrador

T_s = tempo de amostragem

I_{K+1} = entrada do integrador

I_K = entrada na amostragem anterior

U_{K+1} = saída na amostragem anterior

Na próxima seção são apresentados os resultados de simulação obtidos com o modelo desenvolvido, os resultados apresentados utilizam os mesmos parâmetros mostrados no capítulo IV.

5.2.1 - Resultados de simulação em malha aberta

A fim de verificar a praticidade da estratégia de chaveamento, foram realizadas simulações com o conversor operando com chaveamento clássico, ou seja, sem a etapa de

incremento do fluxo de magnetização. A situação simulada foi a operação do gerador com uma velocidade de 1800 rpm.

A carga ligada nos terminais do gerador foi de $60\ \Omega$. A Figura 5.5 mostra o perfil de corrente da fase A do gerador operando sem controle de tensão, a Figura também apresenta o instante de abertura das chaves S_1 e S_2 evidenciando que não existe controle nenhum do sistema. A Figura 5.6 apresenta o transitório de tensão gerada (escorvamento), este transitório mostra o momento de operação instável até o regime permanente, a tensão de regime permanente fixou-se em 135 V conforme mostra a figura 5.6 (b). A Figura 5.6(c) indica a tensão na fase A no transitório. Após o instante inicial de excitação a tensão na fase começa a crescer até atingir o regime permanente, conforme é visto pela figura 5.6 (d).

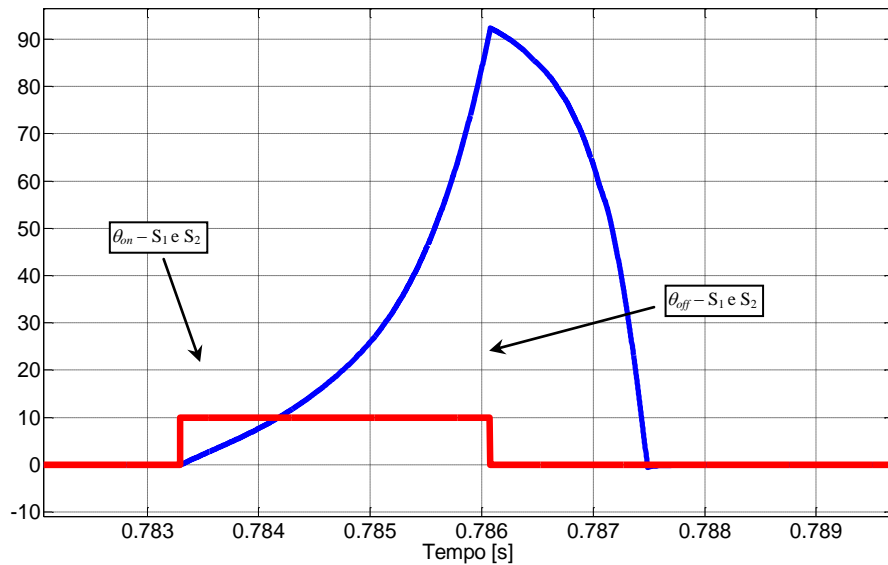


Figura 5.5 - Operação sem roda livre intermediária. Corrente da Fase A e Pulsos S_1 e S_2 .

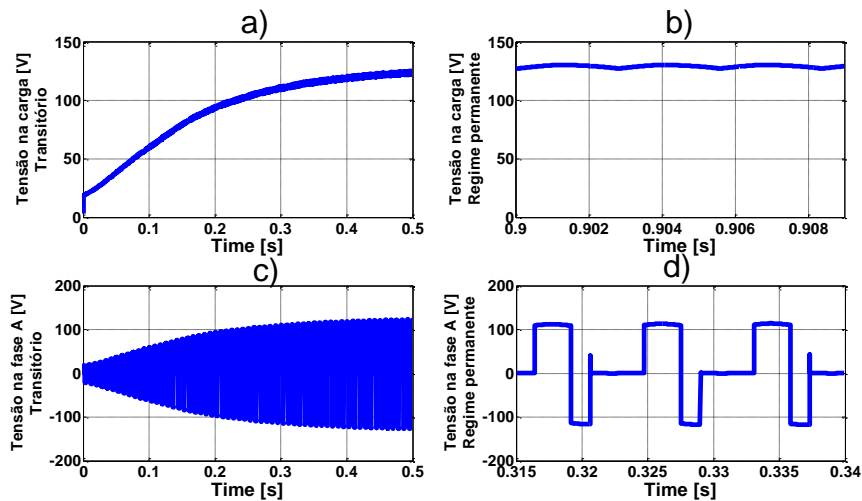


Figura 5.6 - Tensão na carga transitório (a), regime permanente (b), tensão na fase A transitório (c), regime permanente (d).

A seguir são apresentados resultados de simulação com controle de tensão.

5.2.2 - Resultados de simulação em malha fechada

Os testes de simulação em malha fechada foram realizados com os seguintes critérios: o gerador operou em malha fechada utilizando a estratégia descrita na seção 5.1, a tensão inicial do capacitor para início da operação no modo autoexcitado foi de 20V, a tensão de referência do controlador ajustada em 100V e a velocidade da máquina primária foi fixada em 1800 rpm. A máquina foi simulada durante 1 segundo. Foi submetida a uma carga de $60\ \Omega$ nos terminais do gerador.

A Figura 5.7 mostra o comportamento da corrente da fase A do gerador para o sistema de controle proposto, neste intervalo é possível também observar na Figura os pulsos da chave superior e inferior, mostrando que o pulso da chave inferior permanece ligado e o da chave superior no intervalo de referência do controlador é aberto.

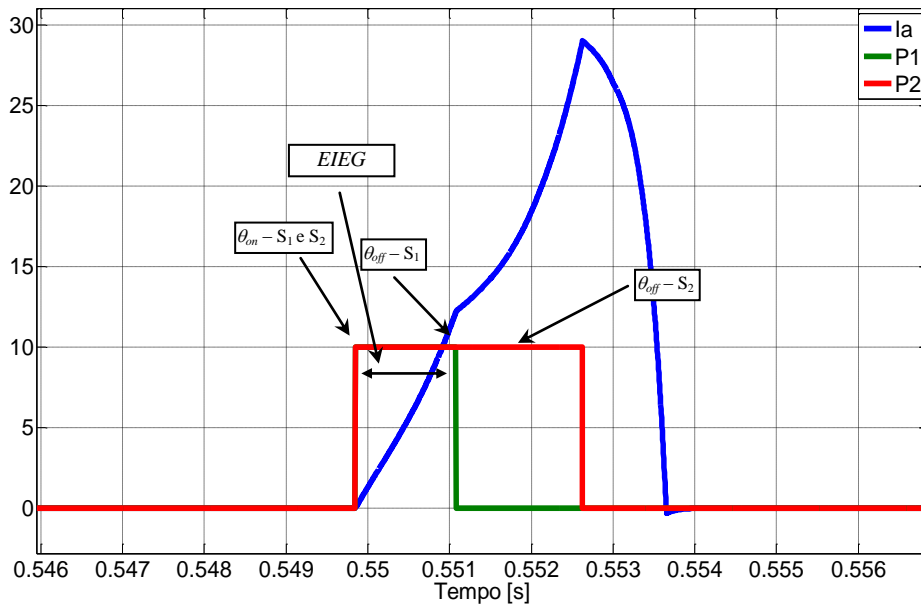


Figura 5.7 - Operação com EIEG. Corrente da Fase A e Pulsos S_1 e S_2 .

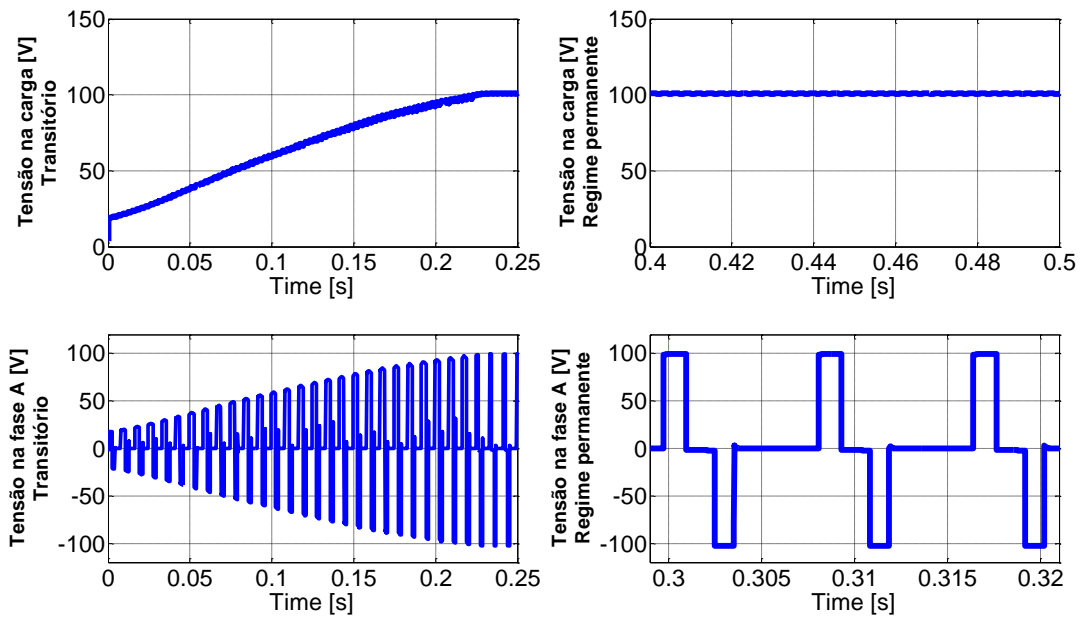


Figura 5.8 - Tensão na carga transitório (a), regime permanente (b), tensão na fase A transitório (c) e em regime permanente (d).

A Figura 5.8(a) mostra o comportamento da tensão gerada aplicada à carga no transitório, após o instante de excitação inicial a tensão começa a subir até chegar na referência de 100 V, neste instante o controle atua não deixando a tensão subir, mantendo a referência, conforme é mostrado na figura 5.8(b), regime permanente. A Figura 5.8(c) mostra

para a mesma situação o comportamento da tensão da fase A no transitório e a figura 5.8(d) mostra a tensão em regime permanente.

5.3 - CONTROLE DE CORRENTE

Os resultados apresentados na seção anterior mostram que a máquina operando no modo autoexcitado em malha aberta chega a níveis elevados de corrente na fase e que com controle de tensão durante o transitório de escorvamento, a corrente também chega a níveis elevados, conforme é visto pela Figura 5.9.

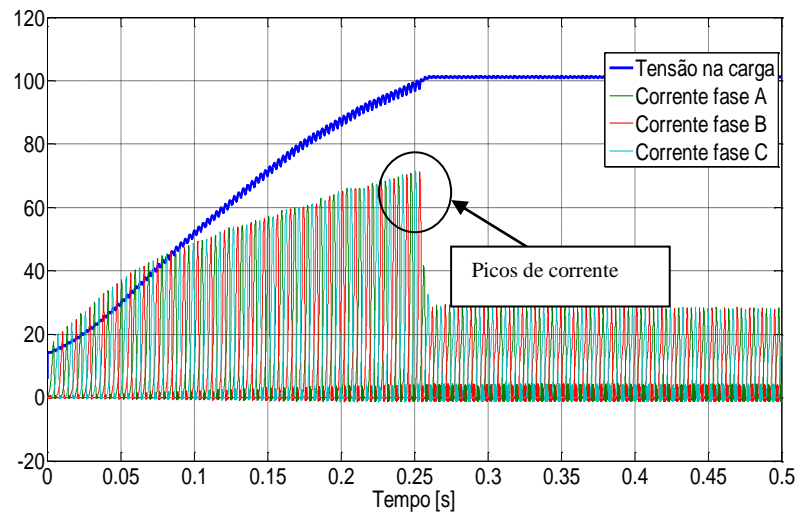


Figura 5.9 – Tensão na carga, correntes nas fases A,B e C.

Com o objetivo de proteger as chaves durante todo o período de geração, o trabalho propõe a construção de um controlador do tipo histerese, conforme mostra o diagrama de bloco da Figura 5.10.

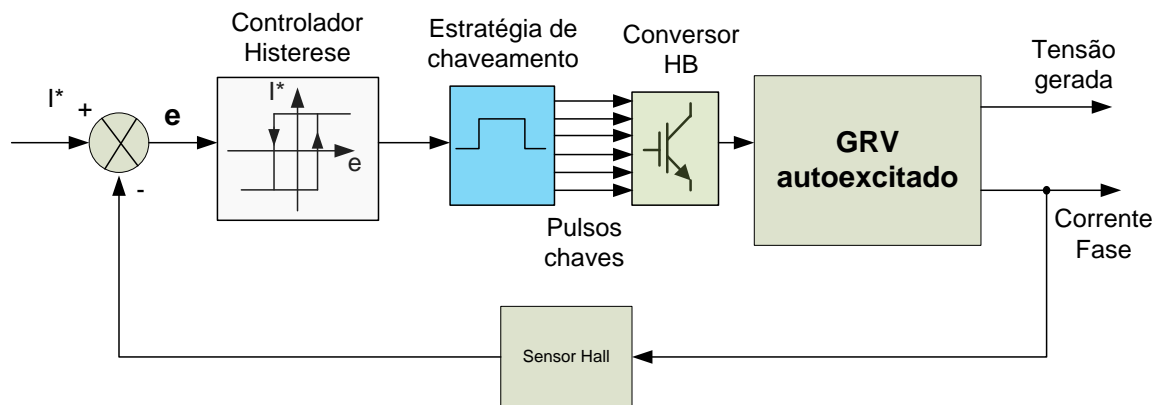


Figura 5.10 – Diagrama de blocos sistema de controle de corrente proposto

O sistema de controle é composto por um controlador do tipo histerese, o sinal de corrente de referência I^* é comparado com o sinal de corrente de fase ligado nos terminais do gerador por um sensor de efeito Hall. A saída do controlador é inserida num bloco, denominado estratégia de chaveamento que é responsável pela geração dos pulsos do conversor HB que aciona o gerador. Este bloco é responsável por ligar/desligar as chaves do conversor. Para o GRV 6/4 em estudo, os ângulos foram ajustados com os seguintes valores: fase A ($85,3^\circ$ a $25,3^\circ$), fase B ($55,3^\circ$ a $85,3^\circ$) e fase C ($25,3^\circ$ a $55,3^\circ$).

O código proposto foi implementado em ambiente MatLab/Simulink e realizada uma simulação com os seguintes dados:

- ✓ Velocidade do gerador: 1800 RPM
- ✓ Carga: $60\ \Omega$
- ✓ Banco de capacitor: 7mF
- ✓ Referência de corrente 50 A

A Figura 5.11 mostra a tensão na carga (a), correntes nas fases A, B e C (b), corrente no banco de capacitores (c) e tensão na fase A (d). O sistema de controle atuou de forma integrada atingindo o nível estabelecido de 50 A de referência.

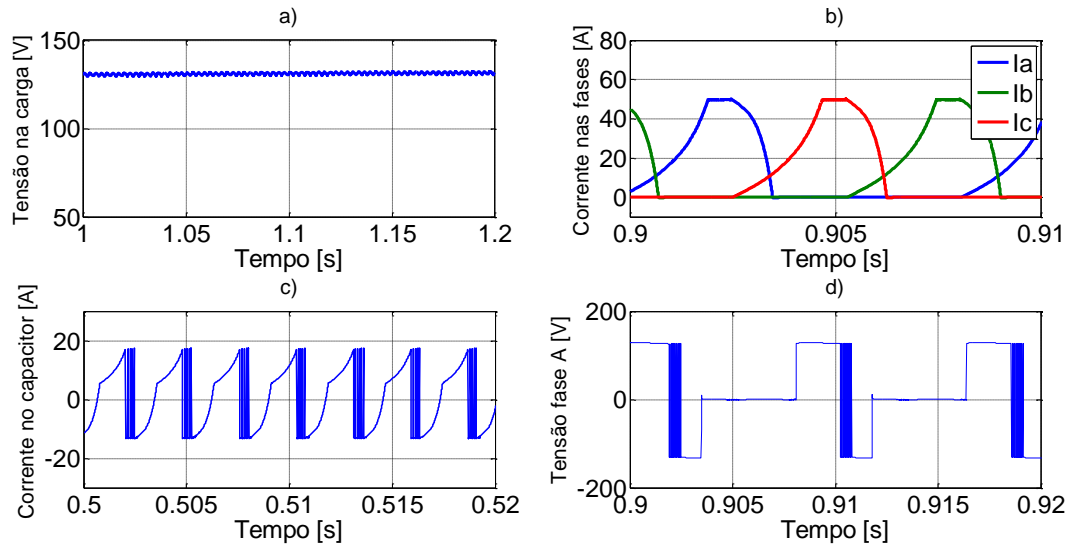


Figura 5.11 – Tensão na carga a), correntes nas fases b), corrente no banco de capacitores c) e tensão na fase A.

Após a análise e implementação do controle de corrente descrito nesta seção, e também o controle de tensão mostrado na seção anterior, a próxima seção traz o controle de tensão e corrente juntos em um mesmo sistema de controle.

5.4 - CONTROLE DE TENSÃO E CORRENTE

Na sequência do trabalho, foi necessário o agrupamento dos dois sistemas apresentados anteriormente em um único sistema de controle, mostrado em forma de diagrama de blocos pela Figura 5.12. O sistema consiste em duas malhas de controle uma interna de corrente e uma externa de tensão. Para essa situação a malha interna de corrente foi utilizada somente duas etapas do conversor, diferente da seção 5.2 que são três etapas.

A malha externa compara a tensão de referência com o sinal de tensão do sensor conectado nos terminais de carga do gerador, esse sinal de erro passa por um compensador do tipo PI, conforme mostrado na seção 5.2. Esse sinal serve como referência para o controlador do tipo histerese que é responsável por determinar o sinal responsável por gerar os pulsos para as chaves do conversor HB. Na saída do compensador PI foi adicionado um bloco saturador cujo valor foi 50 amperes.

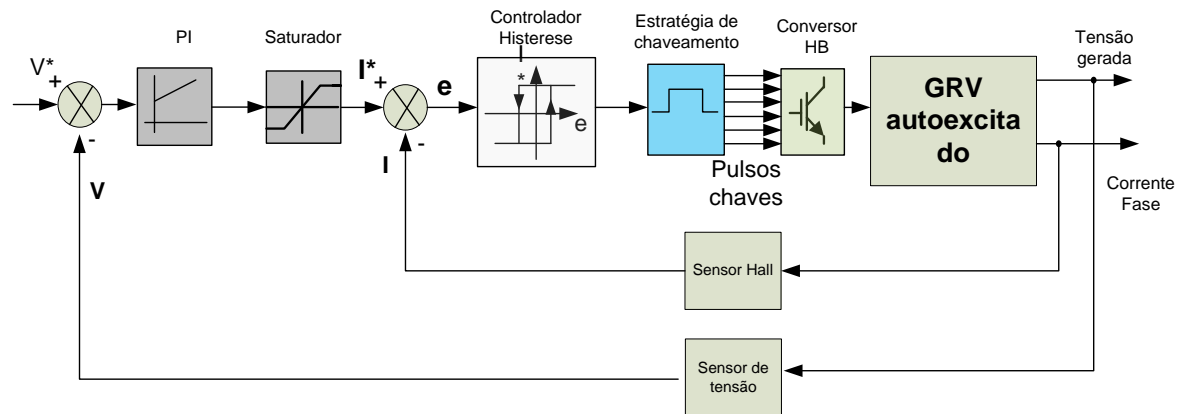


Figura 5.12 – Diagrama de blocos sistema de controle de tensão e corrente.

A fim de verificar a viabilidade do controle foi realizada simulação com degrau de referência de 80V, 100V e 120V e os resultados são mostrados nas figuras 5.13, 5.14 e 5.15.

- Tensão referência 80 V, carga 60 Ω e velocidade máquina primária 1800 RPM

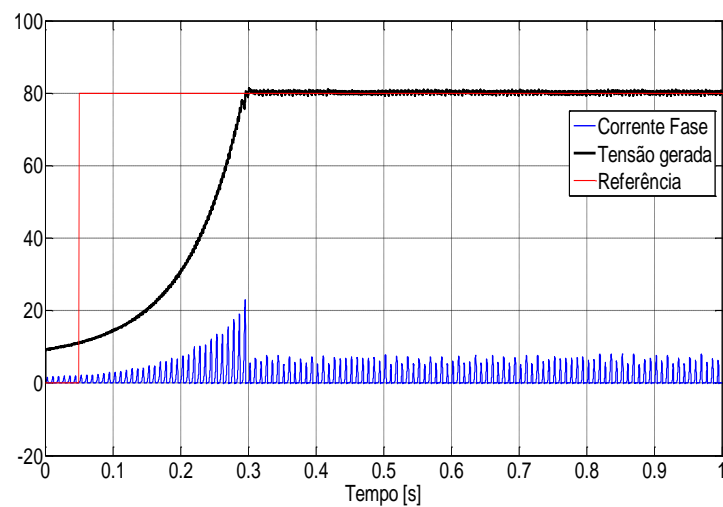


Figura 5.13 – Tensão gerada, corrente fase A – Tensão Referência 80 V

- Tensão referência 100 V, carga 60 Ω e velocidade máquina primária 1800 RPM

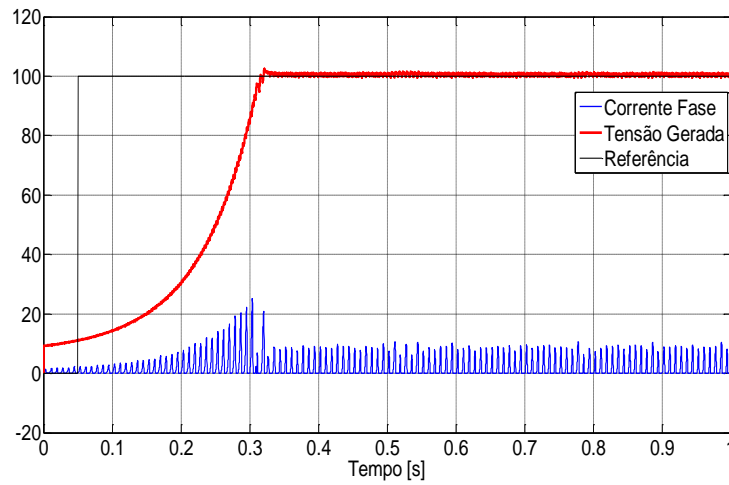


Figura 5.14 - Tensão gerada, corrente fase A – Tensão Referência 100 V

- Tensão referência 120 V, carga 60 Ω e velocidade máquina primária 1800 RPM

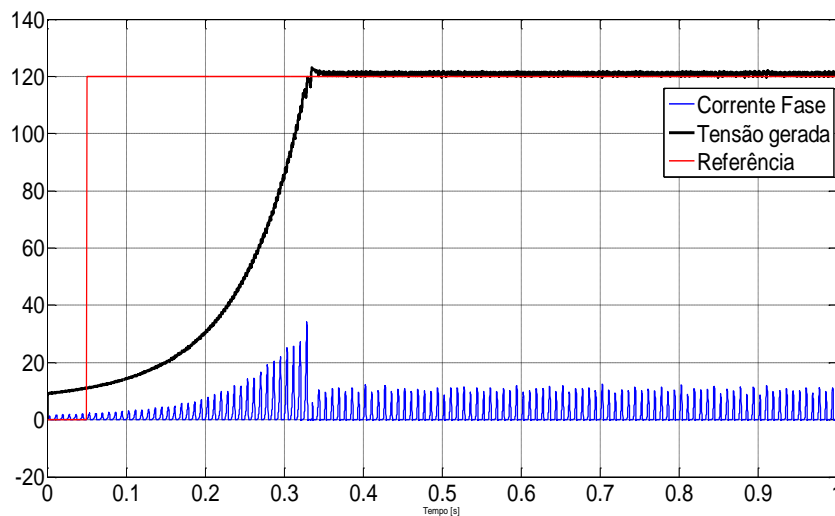


Figura 5.15 - Tensão gerada, corrente fase A – Tensão Referência 120 V

5.5 - OPERAÇÃO DO GRV AUTOEXCITADO EM VELOCIDADE VARIÁVEL

Os sistemas de geração vêm evoluindo de forma significativa nos últimos anos. No caso da energia eólica, a velocidade do gerador depende da turbina conectada ao eixo do rotor, e essa velocidade depende do perfil do vento que varia ao longo do dia. Com o objetivo de

emular e testar o GRV operando no modo autoexcitado em regime de velocidade variável, o gerador foi submetido à variação de velocidade de forma senoidal. O sistema de controle proposto tem que ser capaz de manter a tensão fixa nos terminais da carga, independentemente da variação de velocidade do gerador.

Todo sistema foi simulado com carga de 30Ω , Figura 5.16 e com carga de 60Ω , Figura 5.17, em seguida foi dada uma variação de velocidade senoidal de 1200 a 2200 RPM, que corresponde uma variação de 54,5% na velocidade da turbina.

As Figuras 5.16 e 5.17 mostram a variação da velocidade da turbina acoplada ao gerador, correntes nas fases do gerador e a tensão gerada.

- Carga de 30Ω

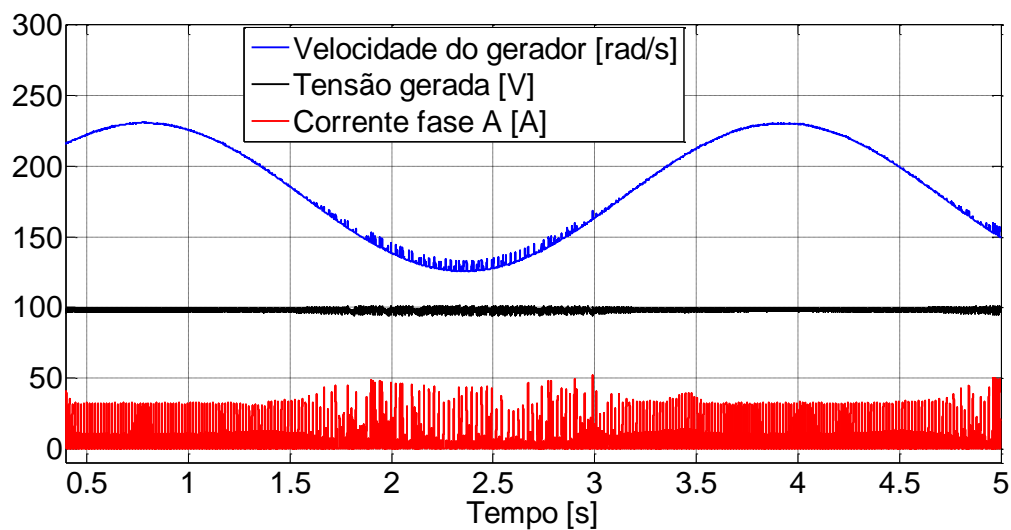


Figura 5.16 – Velocidade máquina primária (turbina), Tensão na carga, Corrente na Fase A.

- Carga de 60Ω

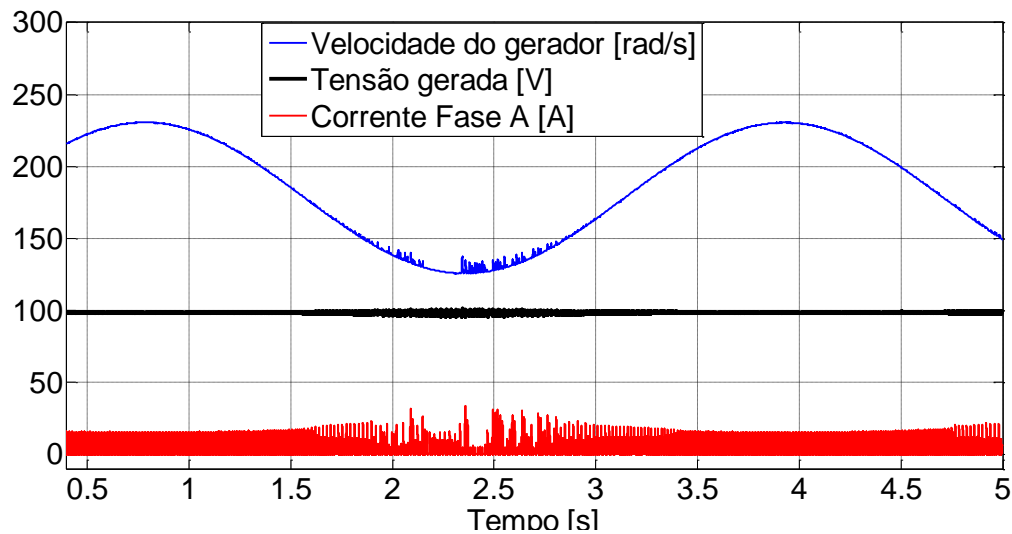


Figura 5.17 - Velocidade máquina primária (turbina), Tensão na carga, Corrente na Fase A.

O gerador na velocidade de 1200 RPM para carga de 30Ω apresenta pico de corrente próximo de 50 A, para carga de 60Ω , esse valor cai para próximo de 40 A. O perfil senoidal de variação de velocidade da máquina também é acompanhado pelas correntes de fase do gerador, que aumentam seus valores em função do perfil da variação de velocidade.

5.6 - CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou uma proposta de controle de tensão gerada e corrente de fase aplicado ao gerador a relutância variável operando no modo autoexcitado. A estratégia desenvolvida foi implementada na forma computacional utilizando o software MatLab/Simulink.

A estratégia de controle de tensão gerada adotada, utiliza a variação dos ângulos de magnetização juntamente com um controlador PI para variação desses ângulos. Um sistema de controle foi apresentado a fim de verificar o funcionamento da estratégia utilizada.

O sistema de controle foi testado com uma referência de 100 V para uma velocidade fixa de 1800 rpm e carga fixa em 60Ω e o sistema conseguiu manter a tensão fixa na carga.

Os testes realizados mostraram a necessidade de utilizar um controle de corrente de fase, para o gerador em função da variação da corrente em transitórios de operação. Foi construído um controlador do tipo histerese e esse foi implementado e simulado.

Posteriormente foi modificada a referência da turbina para variação senoidal de 1200 RPM a 2200 RPM, com o objetivo de testar o controle desenvolvido e foi demonstrado que mesmo com essa variação a tensão permaneceu próxima à de referência. Evidencia-se, assim, que o gerador com controle é apropriado para ser empregado em aplicações com velocidade variável, como nas aplicações automotivas, aeroespaciais, eólica e em armazenadores de energia cinética.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE DINÂMICA DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL AUTOEXCITADO, RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1 - INTRODUÇÃO

No decorrer deste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos utilizando um protótipo de gerador a relutância variável montado no LACE (Laboratório de Acionamentos Elétricos da Universidade Federal de Uberlândia).

O protótipo permitiu obter curvas que descrevem o comportamento da máquina a relutância variável operando como gerador autoexcitado e, conseqüentemente, realizar uma análise em regime permanente e transitório.

O sistema completo, ilustrado na Figura 6.1, é constituído por inversor de frequência com controle vetorial da WEG CFW-08. O conversor de potência fabricado utiliza módulos *IGBT da Fuji Electric*, tipo 6MBI100S-060 (600V,100A), sistema de controle baseado no *kit EZDSP F28335* [69], placa de condicionamento de sinal e placa de interface com o inversor.

Serão apresentados o desenvolvimento do hardware e os principais circuitos utilizados. O projeto foi desenvolvido para minimizar os ruídos e manter a integridade do sinal, desde a saída do Processador Digital de Sinais (DSP), e aplicação no ataque dos gatilhos do sistema de potência. Também serão mostradas algumas das principais características e qualidades do DSP utilizado que o credencia para esta tarefa.

Finalmente, serão apresentados os resultados experimentais que validam a proposta apresentada no capítulo IV.

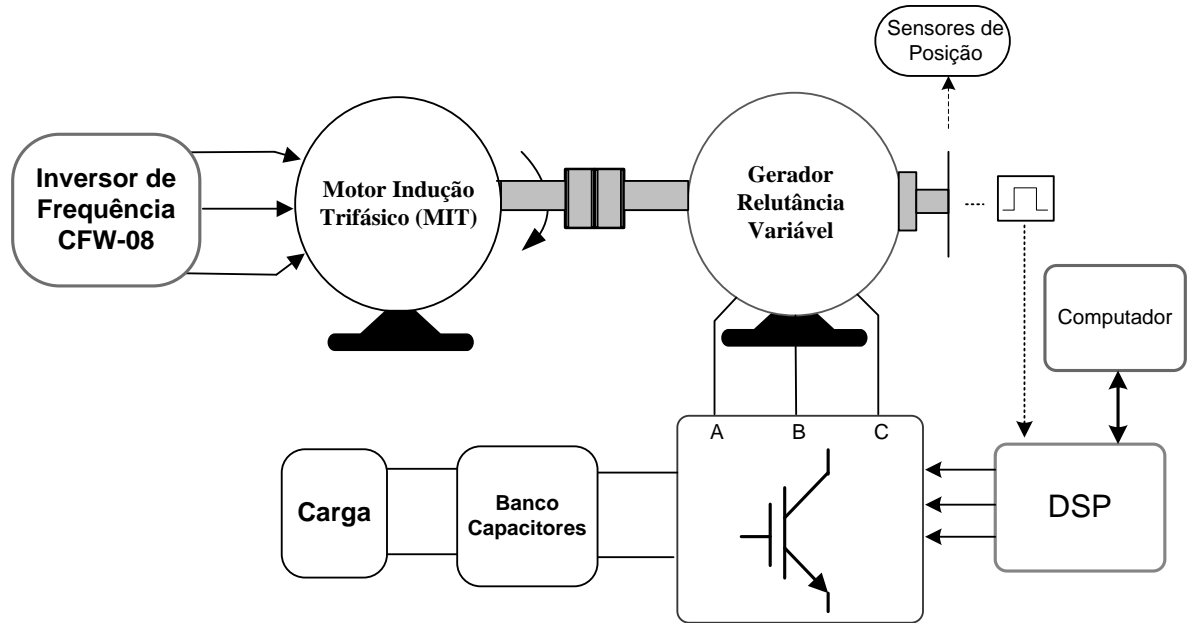


Figura 6.1 – Visão geral da bancada experimental

6.2 - BANCADA DE EXPERIMENTOS

Para a realização dos testes experimentais foi montada a bancada de ensaios que é mostrada na Figura 6.2.

Esta bancada é composta por um motor de relutância variável trifásico, 6/4, acoplado a um motor de indução trifásico da WEG, 4 pólos, 2 cv. Todo o sistema foi cuidadosamente montado e alinhado para que os resultados não fossem poluídos por ruídos e vibrações mecânicas.

As medições e registros de dados experimentais foram feitas com medidores *true RMS*, osciloscópio digital multifuncional com memórias, tacômetro ótico e microcomputador dedicado.

A Figura 6.3 mostra o suporte, disco e sensores óticos de posição do rotor que foram utilizados na obtenção dos períodos de magnetização das fases para acionamento da máquina. Para cada disco foram utilizados três sensores óticos, portanto três sinais digitais produzidos pelos sensores são introduzidos no DSP através das entradas digitais. A grande vantagem pela

utilização desses sensores é que seu custo é relativamente menor do que a aquisição de um *encoder* absoluto para leitura desses sinais.

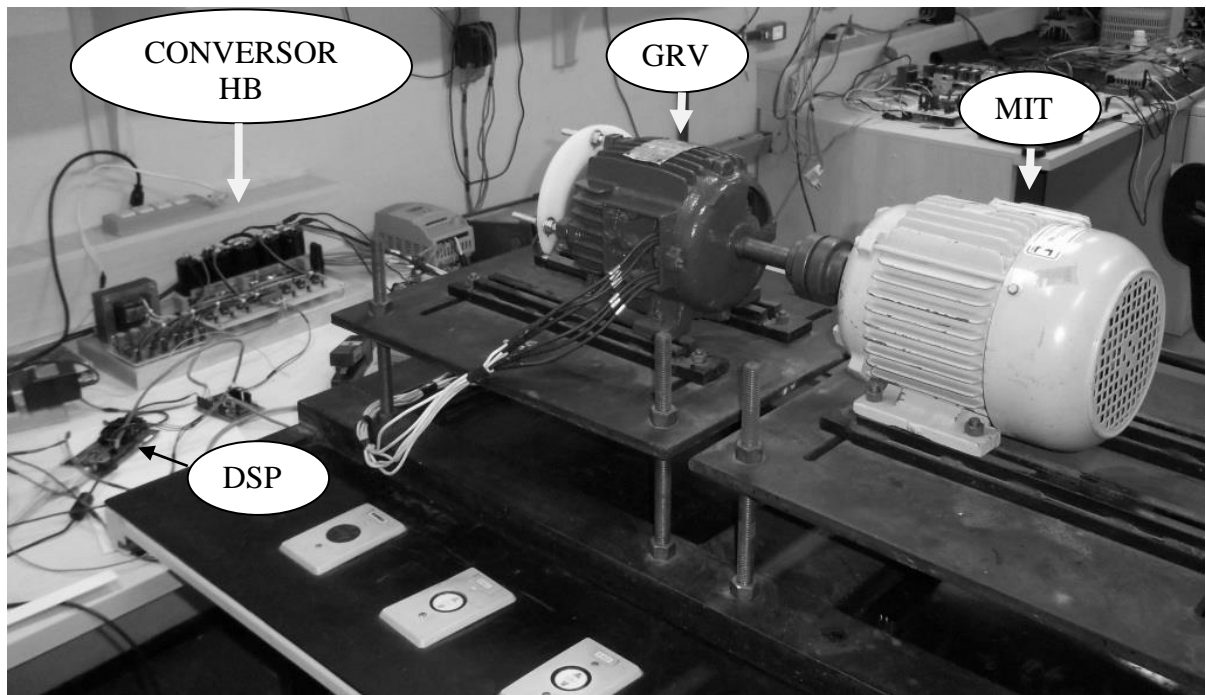


Figura 6.2 – Bancada de testes do gerador a relutância variável.

A Figura 6.4 mostra a foto construtiva das seis fontes auxiliares (+15V) utilizadas para isolar todos os pulsos de gatilho das chaves.

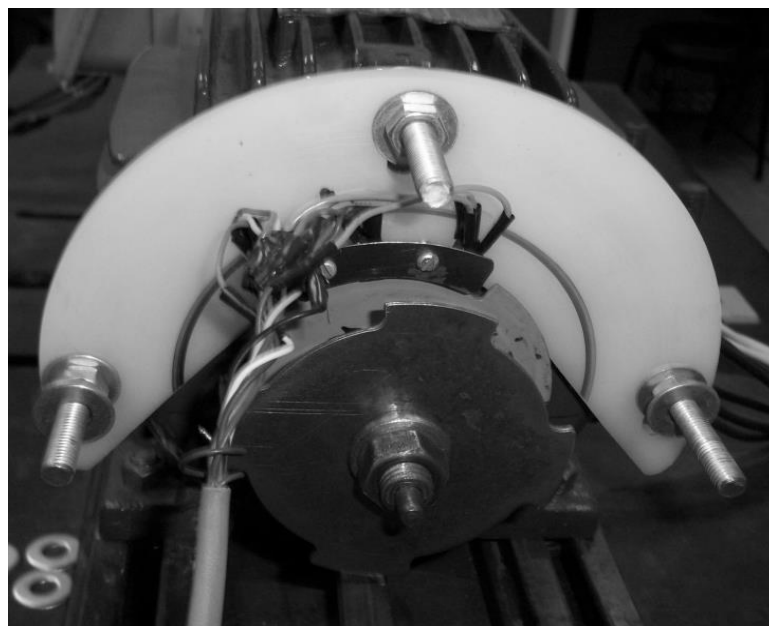


Figura 6.3 – Suporte, disco e sensores óticos de posição do rotor.

Adicionalmente, foi construída uma placa de circuito eletrônico para disparo das chaves. A Figura 6.5 mostra a foto da mesma com os respectivos componentes. Essa placa foi desenvolvida para receber os sinais dos pulsos que vem do DSP e o nível de tensão é de 0 a 3.3 volts, este circuito também tem a responsabilidade de disponibilizar para o pino do *gate* do IGBT o pulso de condução das chaves (15 V). O diagrama do circuito de ataque de gatilho é mostrado na Figura 6.6, onde foi desenvolvido utilizando o software *Eagle* para a fase de projeto e desenvolvimento [71].



Figura 6.4 – Fontes isoladas para ataque de gatilho das chaves.

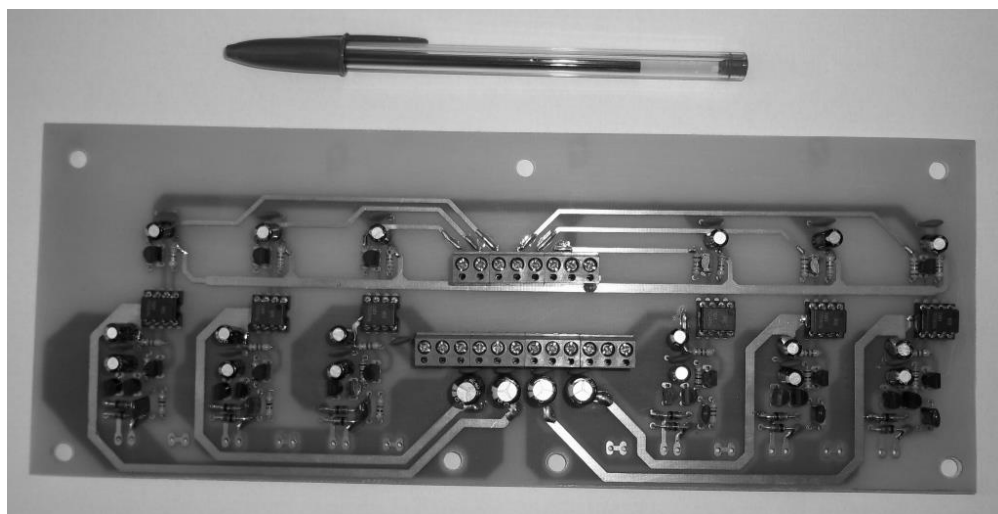


Figura 6.5 – Circuito de disparo das chaves.

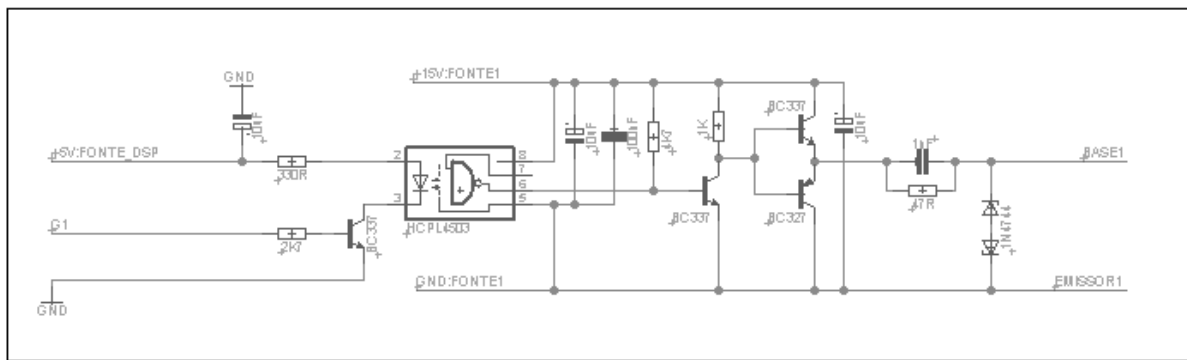


Figura 6.6 – Diagrama circuito desenvolvido para ataque de gatilho das chaves.

O conversor utilizado foi construído com chaves IGBT (6MBI100S-060). Esse módulo foi de suma importância para obtenção dos resultados esperados, pois a operação dessa máquina exige correntes de pico elevadas e testes realizados com um conversor projetado anteriormente não foram possíveis, pois utilizava MOSFET do tipo IRFP260N e nos testes realizados, as chaves queimavam.

Com o intuito de construir um conversor robusto e eficaz para acionamento da MRV e eliminação do problema de trocas constantes de chaves foram utilizados dois módulos IGBT, conforme consta na Figura 6.7. As ligações são realizadas da seguinte forma: no primeiro módulo, as chaves T_1' , T_2' , T_3' e no segundo módulo, as chaves T_4' , T_5' , T_6' tem os respectivos pinos de Gates ligados no emissor, permanecendo abertos, o que viabiliza a utilização dos respectivos diodos como roda livre no conversor HB. Os outros IGBTs dos módulos funcionam como chaves. A Figura 6.9 mostra o circuito eletrônico simplificado interno do módulo e todos os pinos de ligação do mesmo, a partir desta folha de dados projetou-se e realizou-se o esquema de ligação proposta conforme na Figura 6.7.

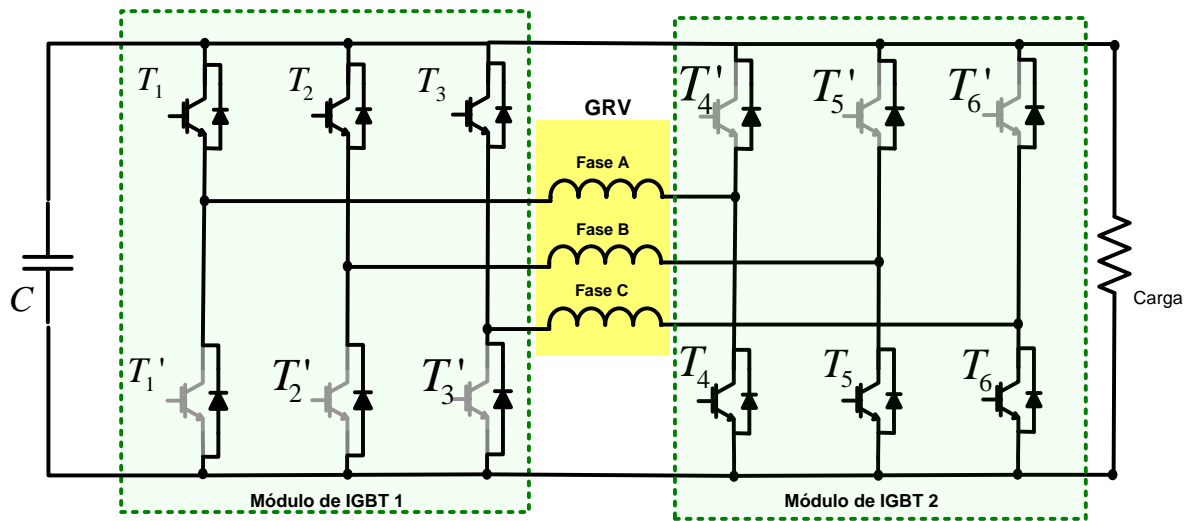


Figura 6.7 – Esquema do circuito de ligação dos módulos IGBT.

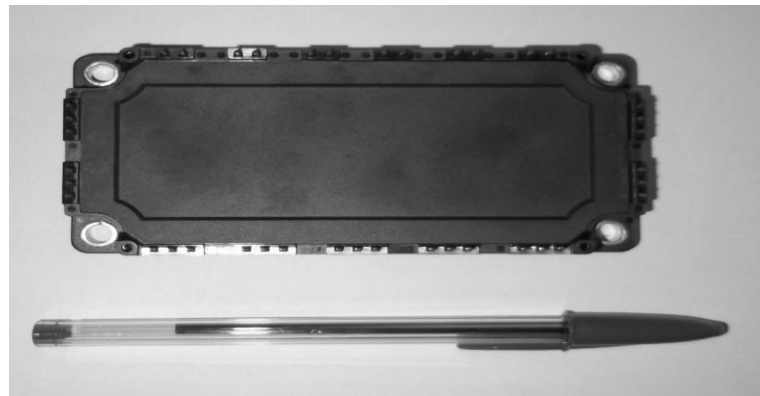


Figura 6.8 – Módulo IGBT da Fuji Electric , tipo 6MBI100S-060 (600V,100A).

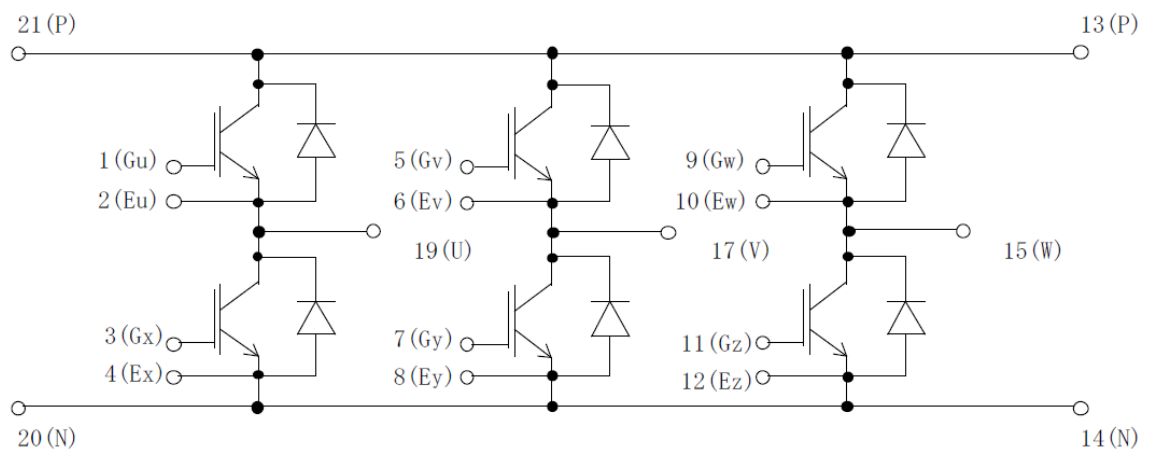


Figura 6.9 - Circuito equivalente do módulo IGBT

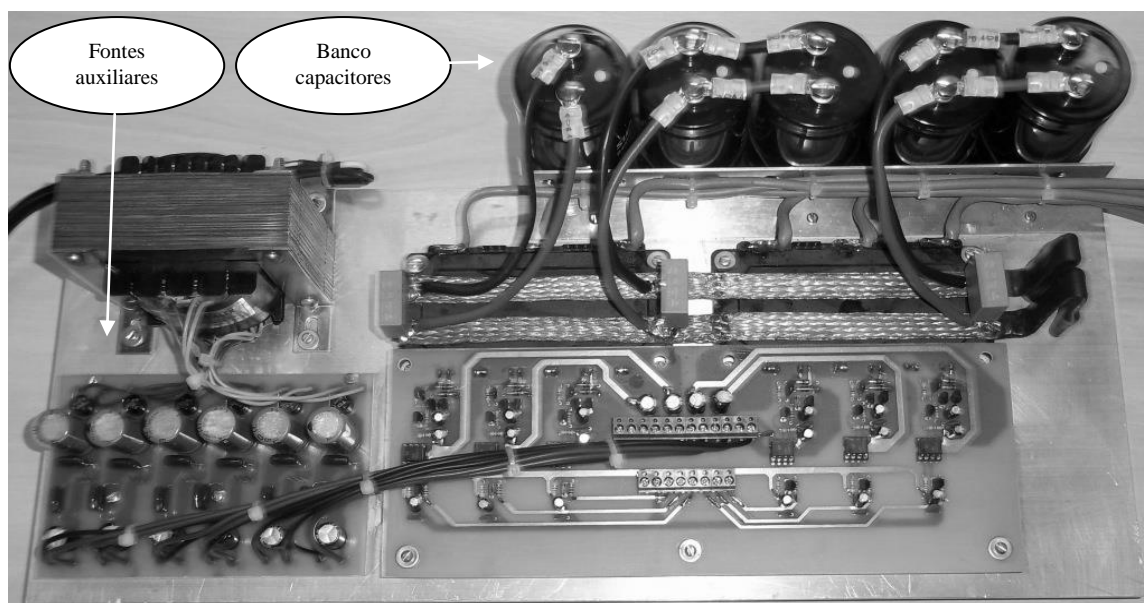


Figura 6.10 – Descrição geral do conversor Half-Bridge, fontes e circuito de disparos das chaves.

O conversor montado para os testes encontra-se Figura 6.10. Este conversor consegue acionar máquinas a relutância variável de até três fases e com um nível de 100 ampères de corrente de pico e com uma tensão de até 600 volts no barramento CC.

A seguir será descrito o processador utilizado no acionamento.

6.3 - PROCESSADOR DIGITAL DE SINAIS (DSP)

O conversor trifásico apresentado na seção 4.2 não possui circuito de controle e nem de geração de pulsos para disparar as chaves. Neste caso, foi projetado e implementado um módulo de disparo dos IGBT's utilizando um processador digital de sinais em ponto flutuante de 32 bits (TMS320F28335), especialmente projetado para controlar sistemas em tempo real.

Estes processadores foram projetados para atender ao mercado de controle de sistemas de acionamento, em especial sistemas de baixo custo. Dessa forma, apresentam periféricos com funções apropriadas para a geração de pulsos de comando de um inversor (controle e modulação), aquisição de sinais analógicos, e etc., tornando-os inteiramente adequados para o acionamento e geração de pulsos como proposto neste trabalho.

O processador digital de sinais TMS320F28335 possui um poderoso conjunto de periféricos e um amplo conjunto de instruções capazes de aproveitar os diversos recursos de CPU disponíveis. Abaixo são elencadas as principais características e periféricos do DSP utilizado [69]:

- Frequência de *clock* de 150 MHz;
- Conversor Analógico-Digital (ADC) de 12 bits com 16 entradas analógicas multiplexadas com tempo de conversão em torno de 80ns;
- 02 gerenciadores de eventos independentes (*EVA* e *EVB*);
- 56 Portas de I/O digitais com dupla função;
- Memória de programa *on-chip* (*SARAM*, *DARAM* e *Flash EPROM*);
- Interface de comunicação serial (*SCI*);
- Interface serial com periféricos (*SPI*);
- Controlador de rede (*CAN*);
- Temporizador *watch-dog*;
- Registradores de soma e produto de 32 e 64 bits;
- Instruções apropriadas à implementação de rotinas matemáticas e compensadores;
- Estrutura de processamento tipo *pipeline*;

A Figura 6.11 apresenta o diagrama de blocos do DSP TMS320F28335, a Figura 6.12 mostra em destaque os barramentos de dados, endereços e o barramento de periféricos [69].

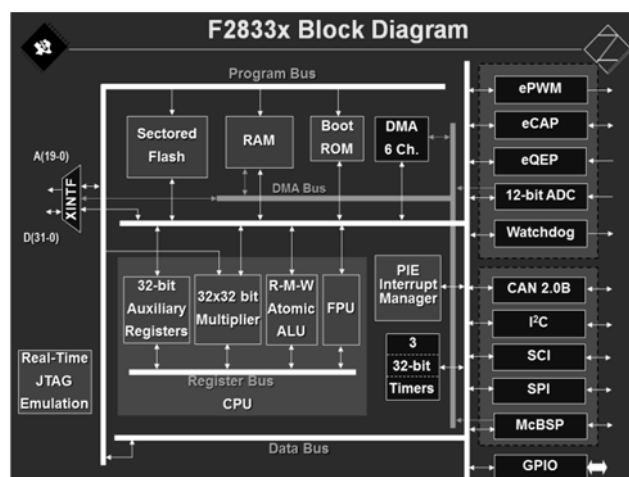


Figura 6.11 - Esquema geral do processador digital de sinais TMSF28335

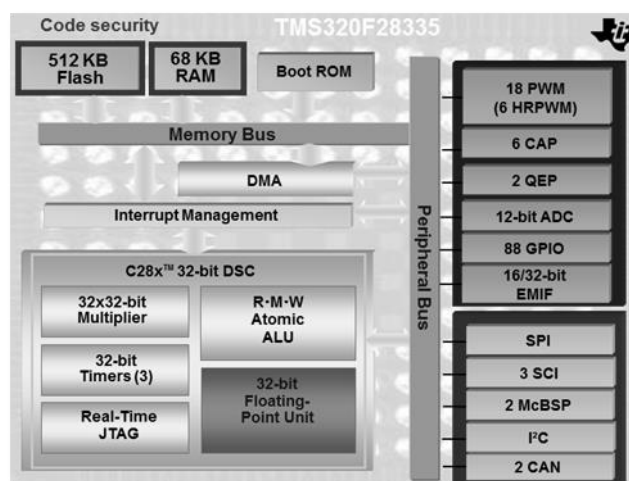


Figura 6.12 – Esquema dos barramentos de dados, memória e de periféricos.

Uma importante característica deste processador é que ele possui uma unidade em hardware para realização de operações em ponto flutuante, o que facilita e agiliza o processo de programação. Uma foto ilustrativa do DSP é apresentada na Figura 6.13.



Figura 6.13 – Foto do TMS320F28335 eZdsp Starter Kit

Todas essas características que foram detalhadas aqui foram suficientes para credenciar esse dispositivo e seus periféricos para viabilidade do trabalho proposto.

6.4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS EM MALHA ABERTA

Esta seção apresenta os resultados experimentais em malha aberta obtidos com o protótipo para comprovação com o estudo abordado anteriormente por simulação. Foi montada uma bancada experimental e todos os módulos foram apresentados e detalhados nas seções anteriores. As curvas obtidas através de ensaios com o protótipo foram mensuradas usando um osciloscópio digital, modelo THS720 e TPS2024 da *Tektronix*.

Os primeiros testes realizados, foram obtidos através da bancada montada por [1]. A Figura 6.14 mostra a tensão na carga para uma velocidade do eixo fixa em 1600 rpm para uma carga de 40 ohms e um banco de capacitores de 6mF.

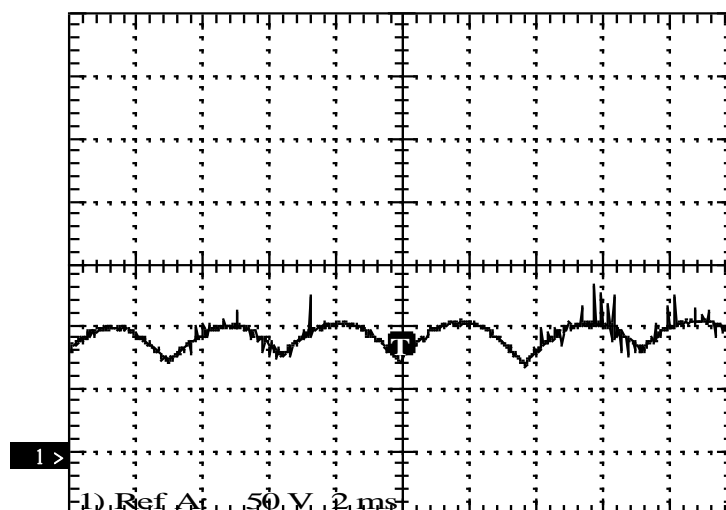


Figura 6.14 – Tensão na carga em regime permanente

Para este teste a tensão de excitação foi fixada em 20 volts, após o escorvamento a tensão foi próxima de 98 volts. A figura 6.15 mostra a tensão de fase do gerador, é destacado também o instante de excitação e geração.

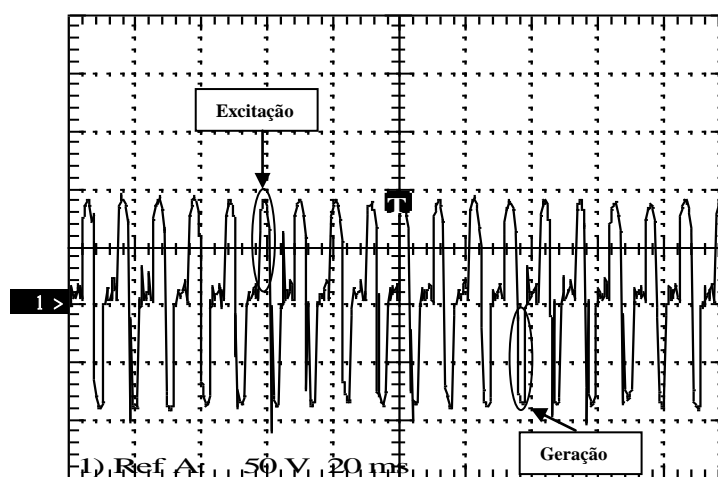


Figura 6.15 – Tensão na fase em regime permanente.

Esse ensaio possibilitou a construção de uma nova plataforma de experimentos com chaves que permitissem o acionamento do gerador em malha aberta, para estudos e comprovação dos resultados. A seguir será mostrado teste com a bancada descrita

anteriormente. A bancada permite acionar máquina a relutância variável de até três fases com tensão de 600 V e corrente de 100 A.

6.4.1 - RESULTADOS COM CARGA DE 40 OHMS

A Figura 6.16 mostra a tensão na carga durante o transitório de escorvamento para a mesma situação obtida por simulação mostrada pela Figura 4.31(a), pode ser observado que os valores estão próximos e para os dois casos foi obtido o mesmo transitório de escorvamento 900 ms. A Figura 6.17 mostra a tensão na fase A em regime permanente, para a mesma situação vista pela Figura 4.30(c). A Figura 6.18 mostra a corrente no capacitor, que é alternada e compreende o carregamento e descarregamento do capacitor. Esta situação foi simulada e comparada com a Figura 4.30(d).

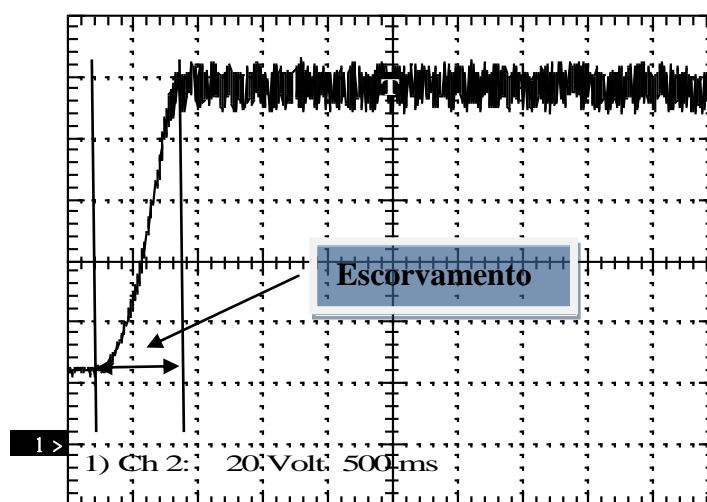


Figura 6.16 – Transitório de tensão na carga (escorvamento).

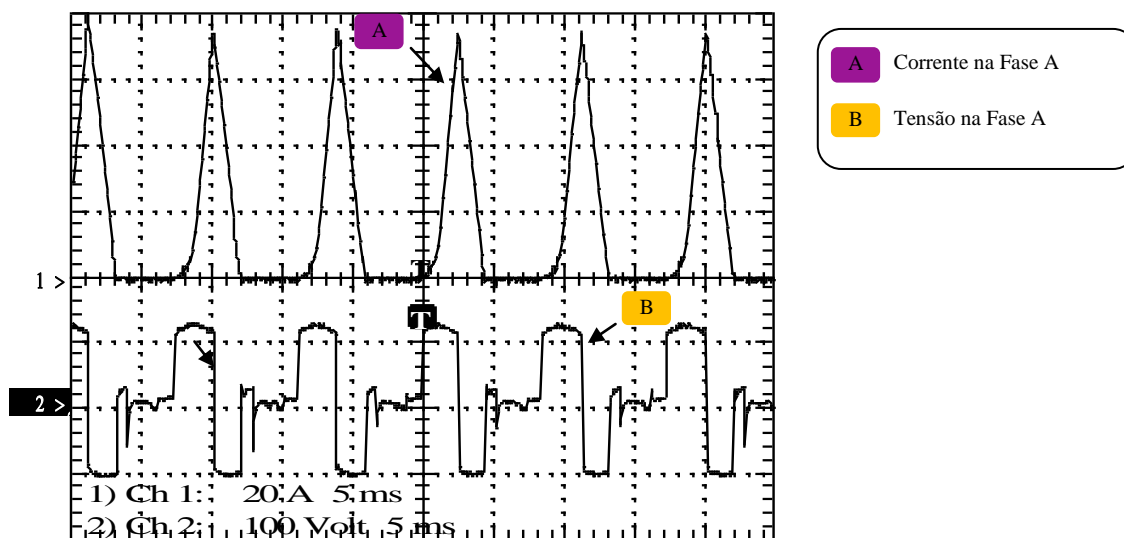


Figura 6.17 – Corrente (Canal 1) e tensão (Canal 2) na fase A em regime permanente.

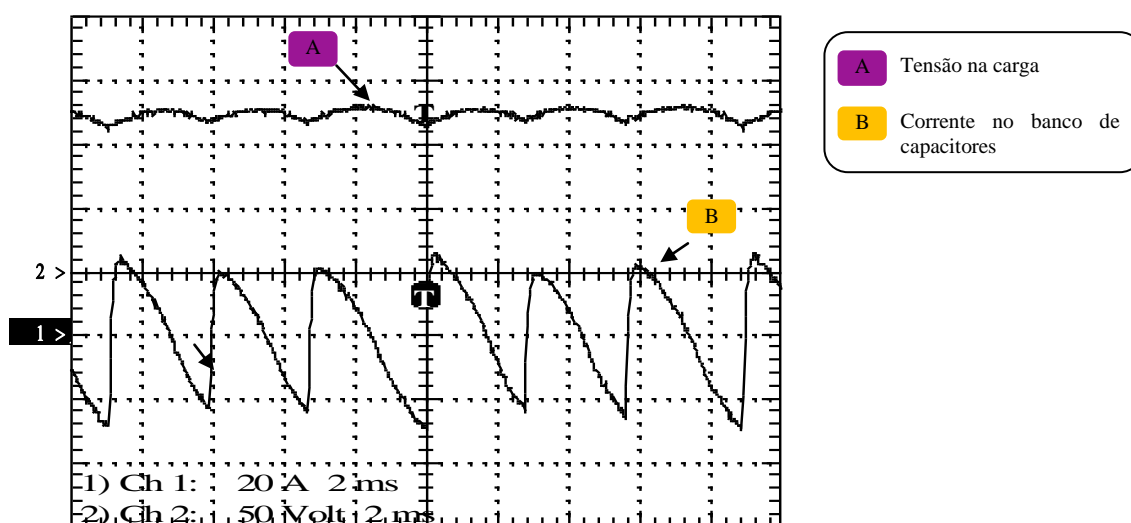


Figura 6.18 - Tensão na carga (Canal 2) e corrente no capacitor (Canal 1) em regime permanente.

6.4.2 - RESULTADOS COM CARGA DE 60 OHMS

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos através de um teste realizado para uma carga resistiva de 60Ω . A velocidade da máquina primária foi de 1800 rpm e todos os outros parâmetros foram descritos anteriormente. A Figura 6.19(a) mostra a corrente no banco de capacitores no transitório de escorvamento. Essa corrente assume valores pequenos antes da geração, após o momento de magnetização da máquina a corrente começa a crescer até

assumir valores de regime permanente conforme apresentado pela Figura 6.19(a). Para a mesma situação, a tensão na carga conforme a Figura 6.19 (b), no instante de excitação inicial, foi regulada uma tensão de 20 volts. Após a magnetização da máquina a tensão começa a subir até atingir o valor próximo de 120 volts de regime permanente, Figura 6.20(b). Para este ensaio também foram medidos os valores de corrente na fase Figura 6.21(a) e tensão na fase Figura 6.21 (b) em regime permanente.

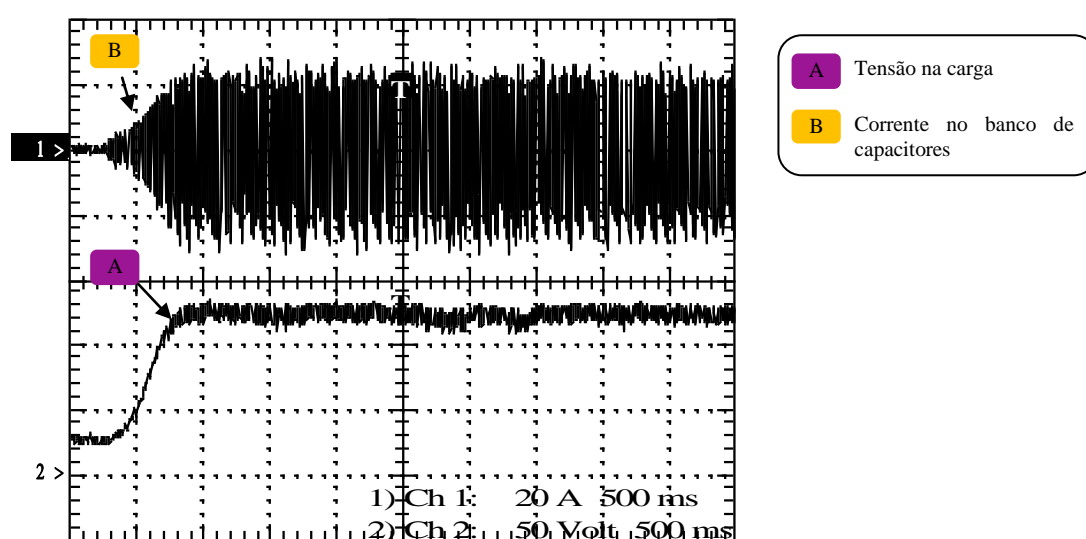


Figura 6.19 - Corrente no banco de capacitores (canal 1) (a) e tensão na carga (canal 2) (b) no transitório de escorvamento.

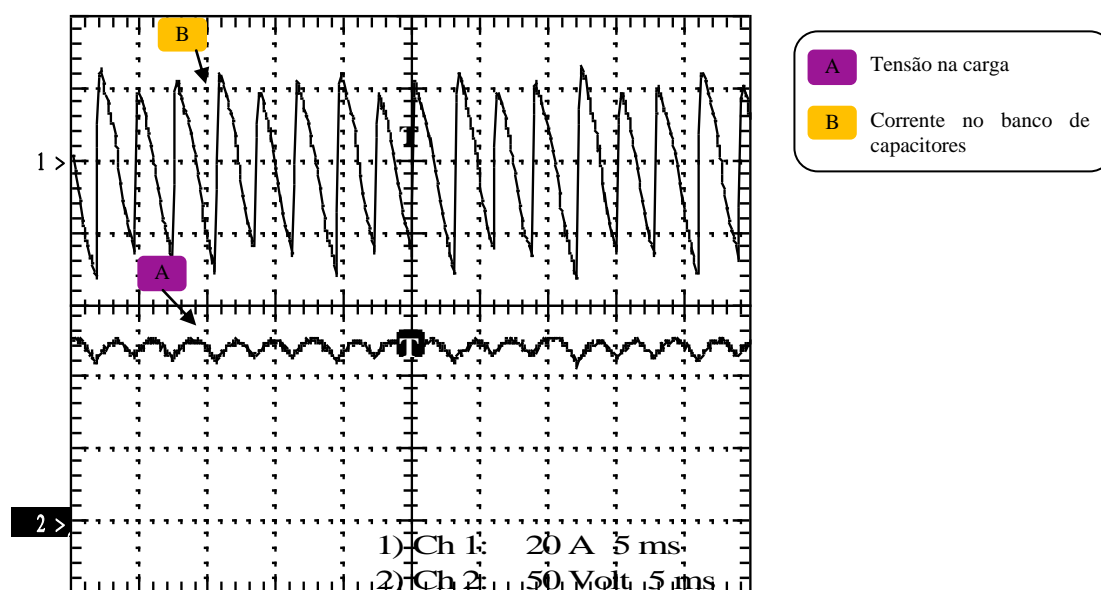


Figura 6.20 - Corrente no capacitor (canal 1) (a) e Tensão carga (canal 2) (b) em regime permanente.

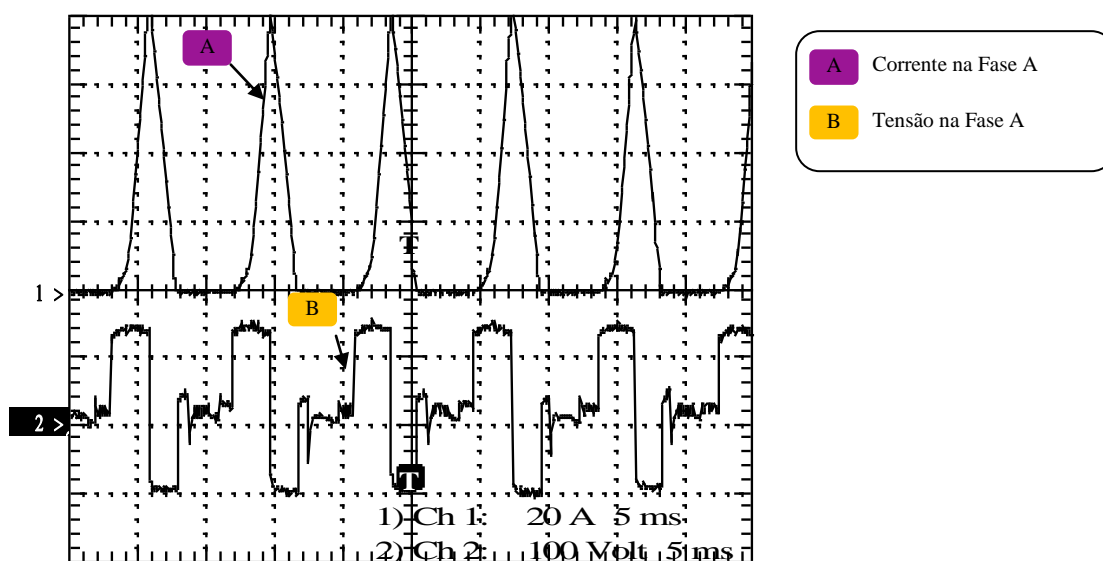


Figura 6.21 - Corrente na fase A (canal 1) (a) e tensão na fase A (canal 2)(b) em regime permanente.

6.5 - CONCLUSÃO

Este capítulo foi dedicado à apresentação dos resultados dos ensaios experimentais realizados com um protótipo da máquina à relutância variável montado para operação no modo autoexcitado. Foi apresentado, também, o processo de desenvolvimento das interfaces de hardware e de software. Todo o desenvolvimento da plataforma experimental descrita foi muito importante para validação da modelagem proposta.

Toda a interface de hardware foi montada levando em consideração a confiabilidade do sistema e livre de ruídos. Esses objetivos foram alcançados através da separação dos circuitos digitais e analógicos.

Toda a interação hardware/software montada foi testada antes da ligação com os enrolamentos da máquina para correção de possíveis erros durante a etapa de projeto desses circuitos.

O circuito de disparo das chaves, foi cuidadosamente planejado e todos isolados para evitar danos para as chaves. Para eliminar esse problema foi montado, no projeto, para cada chave uma fonte auxiliar, utilizando-se seis chaves, o que corresponde a seis fontes auxiliares de 15 volts.

Finalmente, os resultados experimentais validam a metodologia proposta, para tanto foi realizado teste com dois valores de carga acoplada nos terminais da máquina, de 40 Ω e 60 Ω . A velocidade adotada no eixo da máquina foi fixada em 1800 RPM e a tensão inicial do capacitor foi de 20 volts. Esses testes além de validar a metodologia proposta no capítulo IV, mostraram a possibilidade de operação da máquina no modo autoexcitado.

CAPÍTULO 7

ANÁLISE DINÂMICA DO GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL

AUTOEXCITADO CONTROLADO, RESULTADOS EXPERIMENTAIS

7.1 - INTRODUÇÃO

O presente capítulo destina-se a apresentar resultados experimentais que suportam a tese de que o GRV operando no modo autoexcitado pode ser controlado, e também pode ser uma alternativa de utilização para energia eólica.

Os resultados com o gerador em malha aberta mostram que a corrente de fase atinge picos de correntes elevados da ordem de 100A. No projeto do conversor as chaves devem ser dimensionadas levando em consideração esse valor e isto torna o custo do conversor elevado. O capítulo traz uma solução para limitar a corrente de fase do gerador tornando o projeto viável para uso do gerador.

Nos sistemas de conexão com a rede elétrica [78] existe a necessidade de controlar a tensão gerada em um valor fixo, no capítulo anterior foi mostrado que a tensão do GRV tem uma forte dependência da velocidade com que é acionado e também com a carga conectada aos terminais do gerador. O capítulo traz também uma solução para esse problema.

Todo o sistema de controle de corrente de fase e tensão gerada foi simulado em ambiente MatLab/Simulink e descrito no capítulo V.

Este capítulo aborda a análise dinâmica do GRV operando no modo autoexcitado controlado. Para o projeto foi importante a utilização de um micro controlador de alto desempenho DSPTMS28335 e uma placa de condicionamento de sinais que permitissem levar os sinais a serem controlados de forma íntegra para a respectiva operação e controle do gerador.

No capítulo VI foram mostrados detalhes do DSP utilizado e na próxima seção é apresentada uma descrição geral do sistema implementado.

7.2 - DESCRIÇÃO GERAL DO SISTEMA IMPLEMENTADO

O diagrama apresentado pela Figura 7.1 mostra a máquina primária, GRV, Sensor de posição, Carga, Banco de Capacitores e DSP 28335. Os blocos máquina primária, GRV foram detalhados nos capítulos anteriores, neste capítulo é dada ênfase no sistema de controle de corrente e tensão.

Todo o código foi programado via software *Code Composer Studio*, cuja plataforma de desenvolvimento permite a compilação e execução em tempo real de todo o sistema.

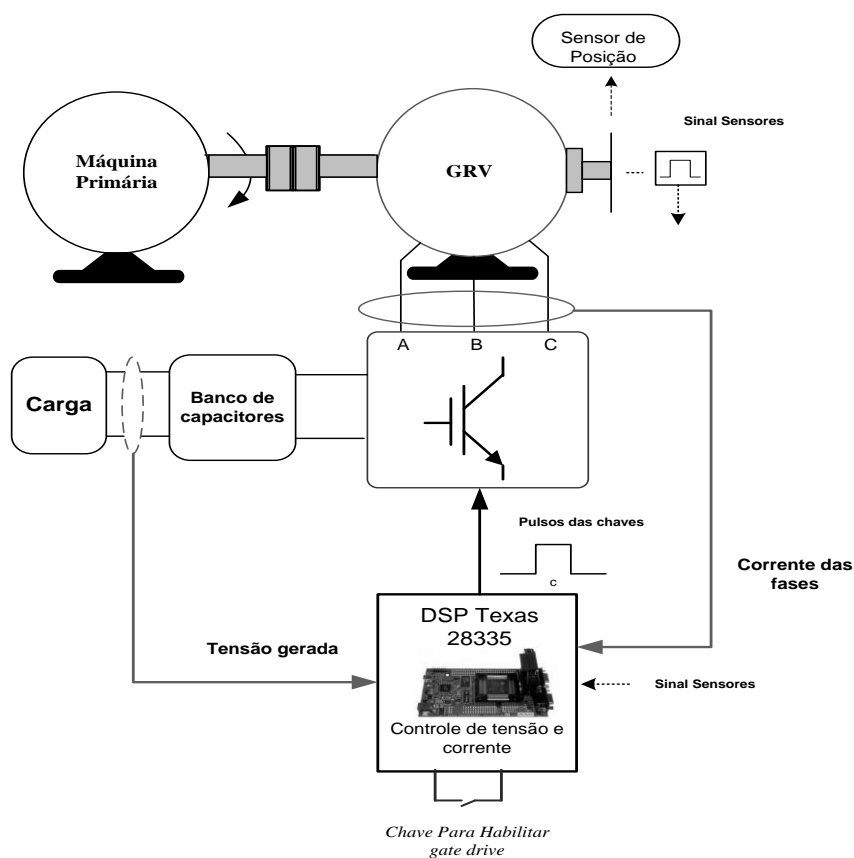


Figura 7.1 – Diagrama de Blocos do sistema implementado no DSP.

O DSP recebe os sinais dos sensores de posição ligados no rotor do gerador, esses sinais são prioridade no acionamento e operação do gerador. Para proteger o sistema, foi acrescentada uma chave externa ligada ao DSP que serve para desligar o gerador.

O bloco do DSP é responsável por gerar toda lógica de pulsos para o conversor HB, todo o controle é feito de forma digital e escrito em linguagem C. Os sinais que serão controlados são: corrente das fases e tensão gerada. Existe a necessidade de garantir a integridade desses sinais dentro do DSP, para tanto foi montada uma placa de condicionamento de sinais mostrada na próxima seção.

7.3 - PLACA DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS

Para adequar os níveis de tensão dos sinais dos transdutores e do *gate drive* do conversor com os níveis de tensão do DSP, foi necessária a montagem de duas interfaces. A primeira, a interface digital conecta os pinos de controle do DSP de 0 a 3.3 V aos circuitos de *gate drive* do inversor de 0 a 15 V. Esta interface conecta também os sinais de erro do inversor de 0 a 15 V com os pinos do DSP de 0 a 3.3 V. A segunda, conecta os sinais analógicos de tensão. No caso deste trabalho será usado o sensor de tensão conectado aos terminais da carga. O sensor de corrente, será ligado às fases do gerador, com a entrada analógica do DSP, que é de 0 a 3.3 V.

As fotos das placas utilizadas no trabalho são apresentadas nas Figuras 7.2 e 7.3.



Figura 7.2 - Placa de condicionamento de sinais digitais.



Figura 7.3 - Placa de condicionamento de sinais analógicos.

7.4 - CONTROLE DE CORRENTE

Os resultados experimentais apresentados no capítulo anterior mostraram que a máquina operando como autoexcitado em malha aberta chega a níveis elevados de corrente na fase. Para resolver esse problema foi proposto no capítulo V um controlador do tipo histerese.

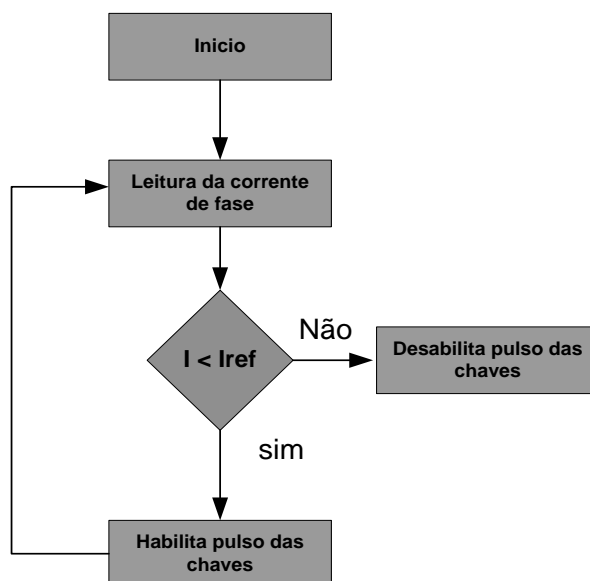


Figura 7.4 – Fluxograma do código implementado

A Figura 7.4 mostra o fluxograma do código implementado, cujo início ocorre na execução do programa e imediatamente é feita a leitura da corrente de fase. Esta corrente é comparada com a referência da corrente I_{ref} , neste caso será o valor máximo estabelecido. Se a corrente for maior do que a corrente de referência o programa desabilita os pulsos das chaves, se for menor o programa habilita os pulsos das chaves retornando para a leitura da corrente de fase. A frequência de execução do código foi de 30 KHz.

A Figura 7.5 foi obtida realizando um ensaio com o gerador submetido a uma velocidade de 1800 RPM com uma carga de 120 Ω , a figura mostra a corrente na fase A (canal 2), corrente no banco de capacitores (canal 4), tensão na carga (canal 3) e tensão na fase A (canal 1). A referência foi fixada em 20 amperes e o controle atua de forma a manter a corrente constante no valor de referência estabelecido.

A Figura 7.6 a referência foi modificada para 30 amperes e o controle também conseguiu fixar no valor de referência estabelecido (canal 2). A tensão gerada, conforme a Figura 7.7, foi de 216 volts, enquanto que pela figura 7.8, a tensão foi de 272 volts. Do mesmo modo na Figura 7.9 foi modificada a referência para 40 amperes e o controle conseguiu fixar a corrente no valor estabelecido (canal 2) e a tensão subiu para 312 volts. As

Figuras 7.7, 7.8 e 7.9 mostram a corrente no banco de capacitores. Essa corrente corresponde a três ciclos, devido ao fato que o banco é compartilhado pelas três fases.

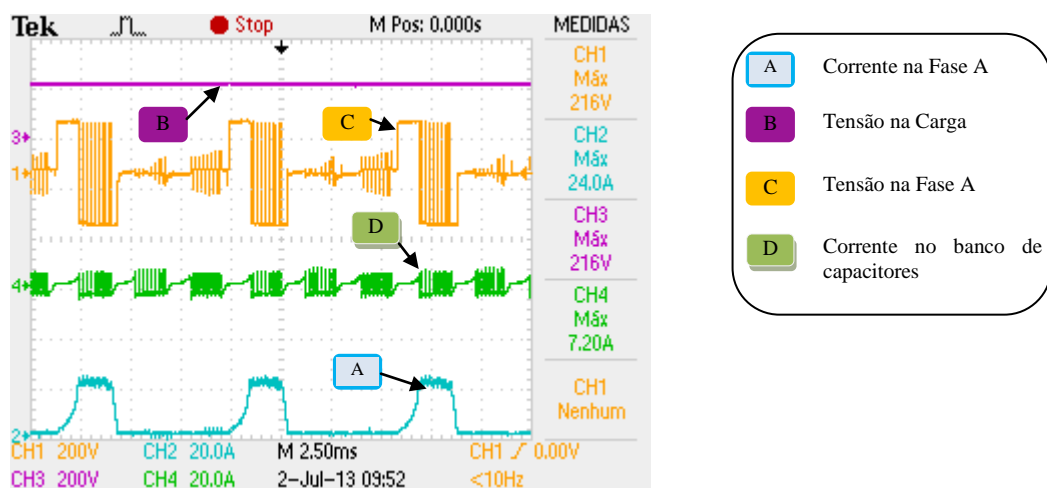


Figura 7.5 – Forma de onda corrente (canal 2 e 4) e tensão (canal 1 e 3) obtida para velocidade 1800 RPM e carga de 120 Ω (20 A)

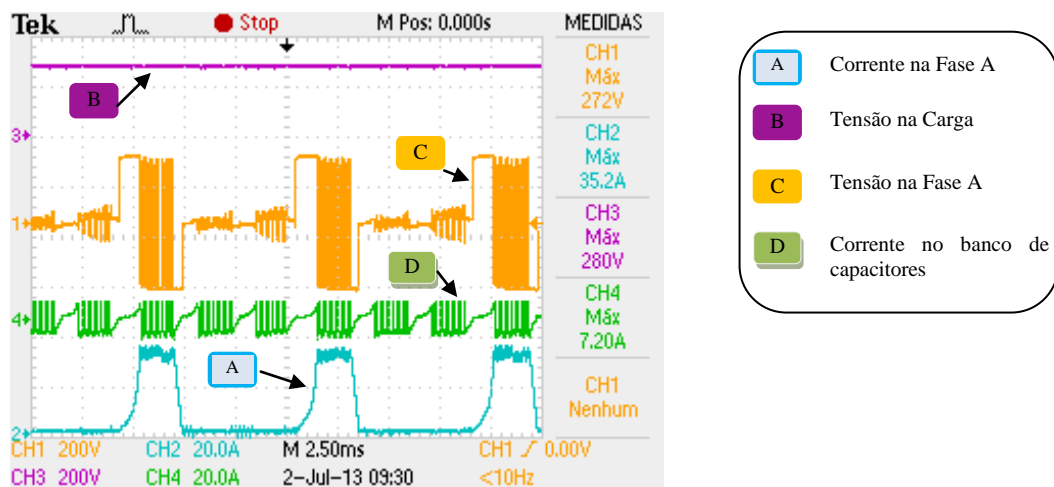


Figura 7.6 – Forma de onda corrente (canal 2 e 4) e tensão (canal 1 e 3) obtida para velocidade 1800 RPM e carga de 120 Ω (30 A)

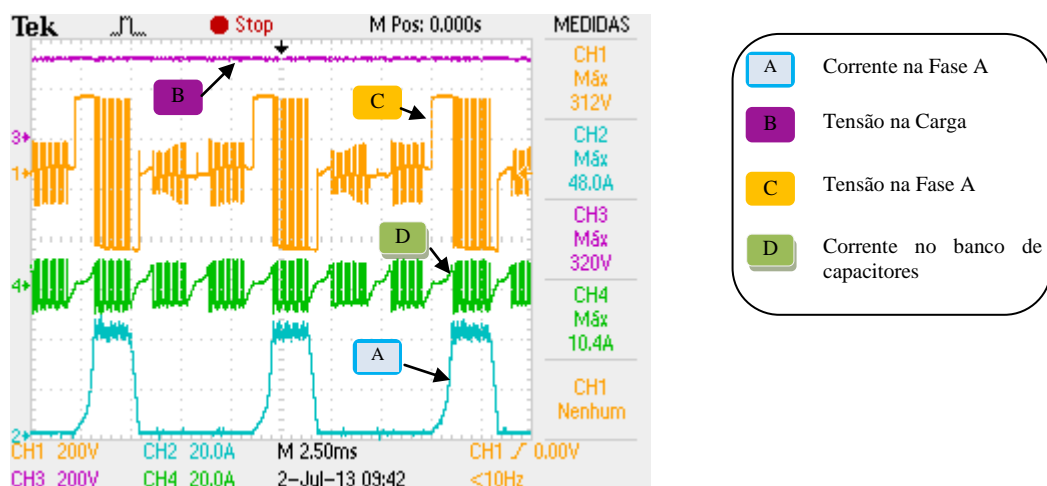


Figura 7.7 – Forma de onda corrente (canal 2 e 4) e tensão (canal 1 e 3) obtida para velocidade 1800 RPM e carga de 120 Ω (40 A)

Finalmente, foi levantada a curva de tensão gerada para diferentes velocidades do gerador e também para diferentes correntes de referência a fim de testar o controle e também familiarizar com a estratégia de controle desenvolvida.

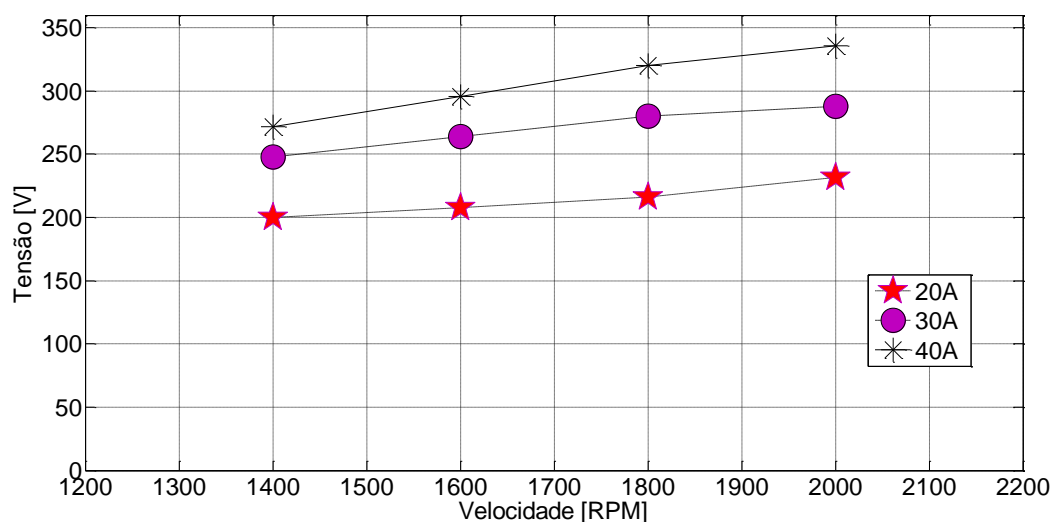


Figura 7.8 – Curva de tensão gerada por velocidade.

A Figura 7.8 mostra a dependência da tensão gerada com a velocidade mesmo com a corrente de referência fixa.

7.5 - CONTROLE DE TENSÃO

O controle de tensão proposto no capítulo 5 foi implementado e testado por meio de simulação, com o propósito de validar o sistema na prática, também foi desenvolvido o algoritmo de controle de tensão, conforme o fluxograma da figura 7.9.

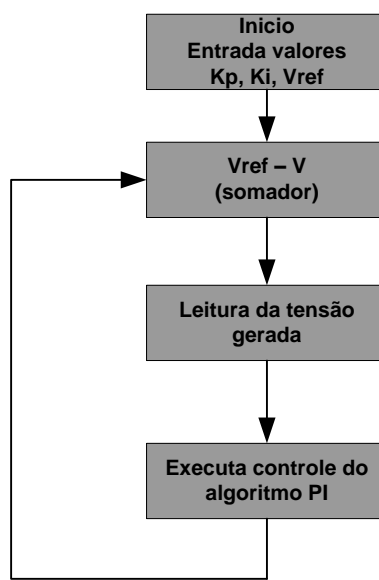


Figura 7.9 – Fluxograma controle tensão

O programa tem início com a entrada dos valores de K_p , K_i e V_{ref} , que correspondem aos ganhos do controlador e da tensão de referência. A partir da leitura da tensão gerada (V) o programa executa o algoritmo do controlador PI que serve de referência para o controlador de corrente. Toda a lógica de execução é feita dentro de uma interrupção que possui frequência de 20KHz, a malha de tensão é mais lenta que a malha de corrente e não exige frequências altas para execução desta tarefa.

Com a descrição da implementação do código de controle de tensão, o objetivo do experimento é verificar o comportamento do GRV em função de diferentes valores de tensão de referência. Neste caso, a velocidade da máquina primária foi ajustada em 1800 rpm e a carga resistiva instalada na saída do gerador foi de 60Ω . Os ensaios foram feitos com os seguintes valores de tensão de referência: 120V, 100V, 80V. As figuras 7.10 até 7.12

apresentam as formas de onda da tensão gerada e corrente e tensão em uma fase para os valores de tensão de referência.

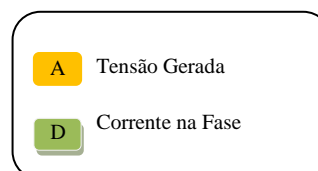
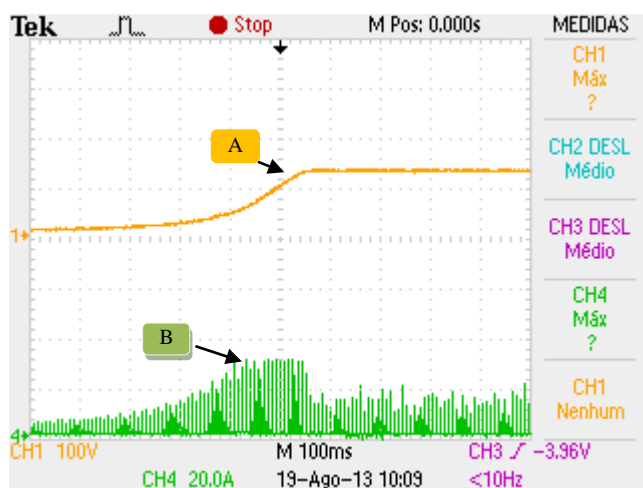


Figura 7.10 – Resultados controle de tensäo velocidade 1800 RPM carga de 60 ohm referància 120 volts.

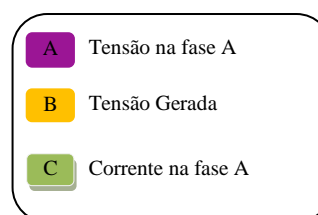
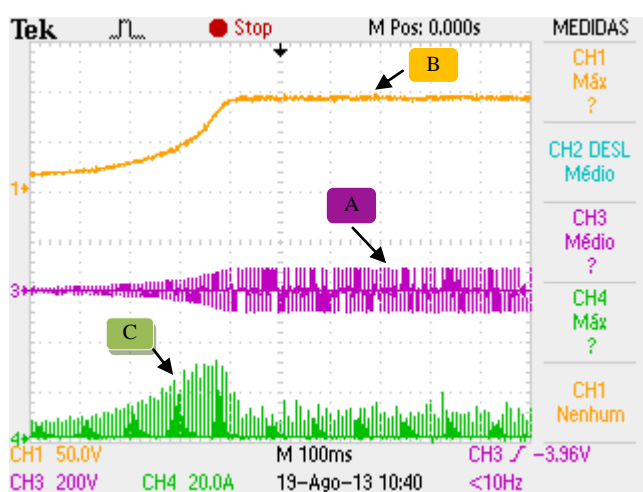


Figura 7.11 - Resultados controle de tensäo velocidade 1800 RPM carga de 60 ohm referància 100 volts.

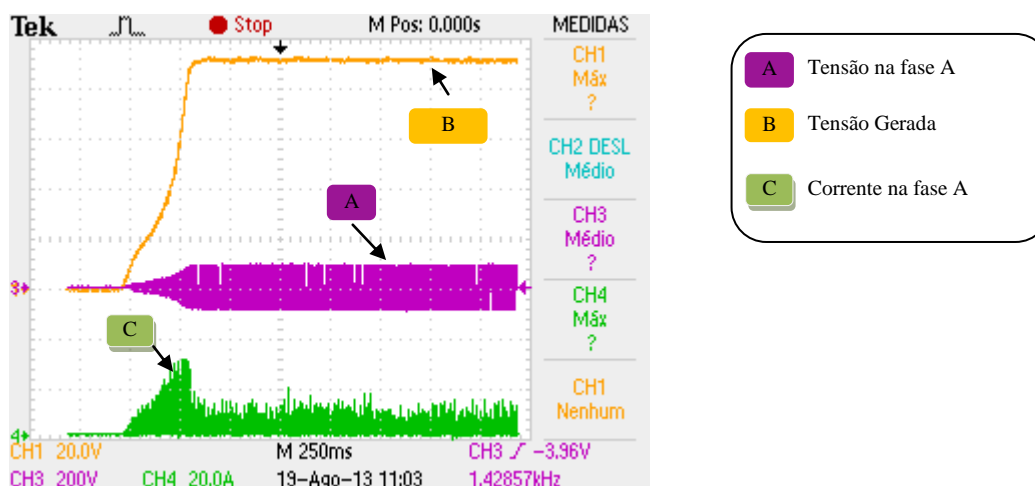


Figura 7.12 - Resultados controle de tensão velocidade 1800 RPM carga de 60 ohm referência 80 volts.

Os resultados apresentados anteriormente existem erros de regime permanente, esses erros ocorrem devido ao ajuste dos valores medidos com os valores programados no DSP.

Na sequência, foi realizado um teste com variação de velocidade da máquina primária, a variação foi de 1500 a 1800 RPM. A figura 7.13 apresenta a corrente e tensão de fase e tensão gerada controlada para o teste realizado com carga de 60 Ω . A variação de velocidade é acompanhada da variação da amplitude de fase, o controle mantém a tensão em um valor fixo estabelecido, neste caso próximo a 100 V.

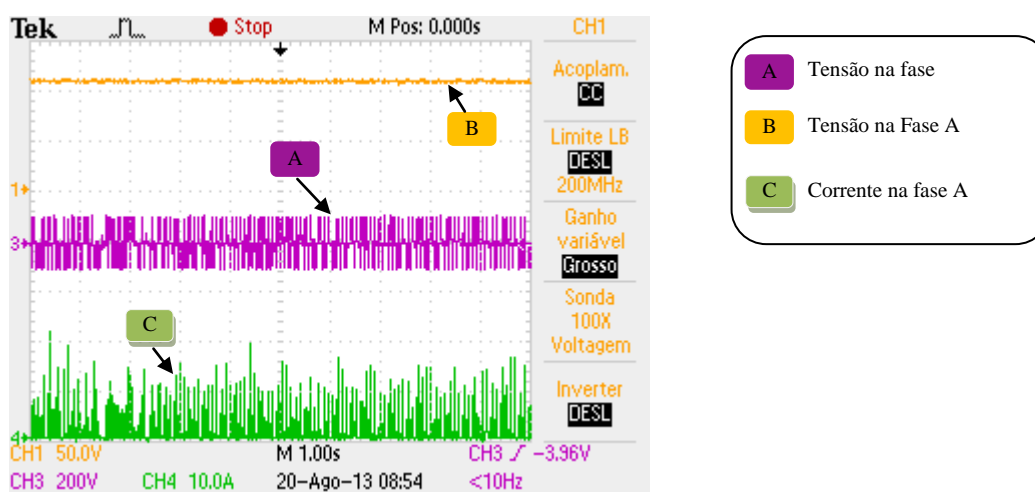


Figura 7.13 - Resultados controle de tensão velocidade 1800 RPM carga de 60 ohm referência 110 volts 1500 RPM a 2300 RPM

Esse primeiro teste, abriu caminho para a operação do gerador em velocidade variável, a próxima seção mostra o teste realizado.

7.6 - ENSAIO EM VELOCIDADE VARIÁVEL

Para verificar o comportamento do GRV com tensão terminal controlada e em regime de velocidade variável, foram realizados ensaios com perfil de velocidade rotórica senoidal. Isto foi possível inserindo o perfil mencionado através de forma de onda de um gerador de sinais na entrada analógica do inversor de frequência (WEG/CFW 09) que aciona a máquina primária acoplada ao eixo do GRV.

A referência no compensador da tensão gerada foi mantida em 100V, a faixa de velocidade variando entre 1200 a 2200 rpm e a carga nos terminais do gerador foi de 30Ω e 60Ω . Nas Figuras 7.14 e 7.15 nota-se que a tensão gerada permanece constante ao longo de todo ensaio. Percebe-se ainda que as correntes de fase do GRV se alteram em virtude da ação de controle do regulador de tensão que visa manter a tensão gerada em torno do valor pre-estabelecido de referência.

Dessa forma, pôde se verificar que o GRV funcionou bem nesta ampla faixa de variação de velocidade, o que evidencia seu potencial para aplicações envolvendo velocidades variáveis.

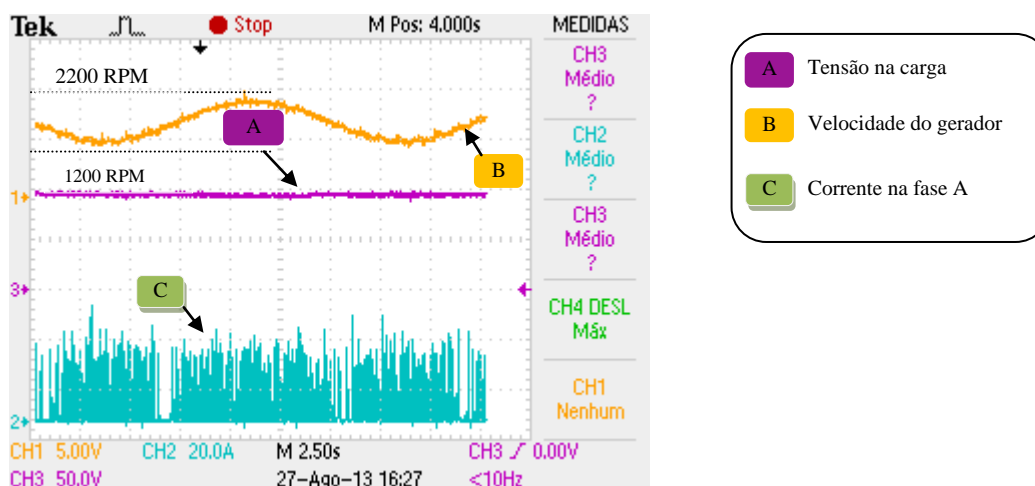


Figura 7.14 – Comportamento do gerador em velocidade variável com carga de $30\ \Omega$

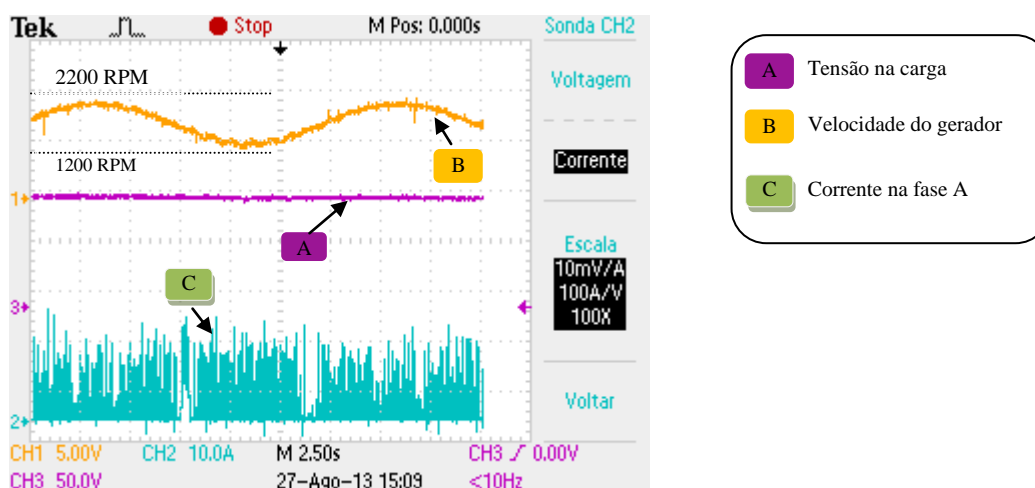


Figura 7.15 – Comportamento do gerador com velocidade variável com carga de $60\ \Omega$

7.7 - ENSAIO COM DEGRAU DE CARGA

Os sistemas de geração exigem a capacidade de controle do gerador a partir de perturbações de carga. Os testes realizados anteriormente mostram que o gerador é adequado para operação em velocidade variável, o objetivo deste ensaio foi testar o gerador com variações de carga, para tanto foram configurada duas cargas $40\ \Omega$ e $60\ \Omega$.

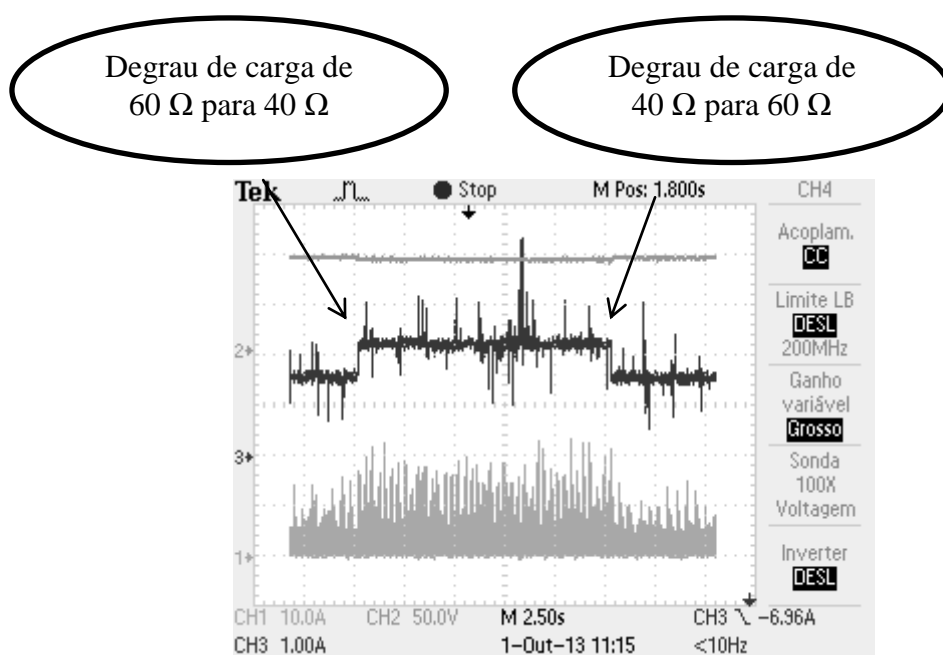


Figura 7.16 – Comportamento do gerador com degrau de carga

A Figura 7.16 mostra a corrente na carga (canal 3), no primeiro instante a carga era de 60Ω após o instante indicado a carga passou para 40Ω . A tensão na carga (canal 2) fixou-se no valor de referência $100V$, o controle conseguiu atuar para manter a tensão constante. A corrente na fase (canal 1) aumenta para manter a tensão estabelecida pelo controle. No segundo instante a carga passa de 40Ω para 60Ω , novamente o controle atua e mantém a tensão fixa no valor de referência.

7.8 - CONCLUSÃO

Este capítulo foi dedicado à apresentação dos resultados dos ensaios experimentais realizados com um protótipo da máquina à relutância variável montado para operação no modo autoexcitado controlado.

A descrição geral do sistema montado foi detalhada no capítulo, bem como o controle de tensão e corrente.

O controle de corrente garante que o nível de corrente não ultrapasse o valor estabelecido e com isso pode-se evitar queima das chaves, visto que sem o controle o nível de pico de corrente das fases é alto.

O controle de tensão implementado usa um controlador do tipo PI que tem como referência uma tensão que pode ser fixa ou variável dependendo do que sistema necessite. Essa referência é comparada com o valor medido nos terminais de carga do gerador.

Os resultados experimentais validam a metodologia proposta, para tanto foram realizados testes para diferentes referências de corrente e tensão. Também foram realizados testes para diferentes valores de velocidade, com o objetivo de emular o comportamento do gerador em regime de velocidade variável e utilização do gerador em energia eólica.

Por fim, com o objetivo de validar o controle proposto foi realizado um ensaio com variações de carga, para tanto foi realizado um teste com degrau de carga de 60Ω para 40Ω , o sistema de controle atuou de forma satisfatória e conseguiu manter a tensão fixa.

CAPÍTULO 8

CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

8.1 - CONCLUSÕES FINAIS

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre o comportamento do gerador a relutância variável operando no modo autoexcitado. Foram investigados e relatados os diferentes tipos de excitação possíveis para a MRV. O trabalho explora a estratégia de se utilizar um capacitor carregado com uma tensão inicial para permitir a excitação inicial da máquina e mostra que após o escorvamento, a tensão terminal estável em modo autoexcitado é mantida. No que concerne à modelagem matemática da máquina elétrica, demonstrou-se a necessidade de se levar em conta a característica de saturação do circuito magnético, sem o que a modelagem não consegue expressar corretamente a operação do dispositivo no modo de operação analisado. Foram apresentadas as equações mecânicas e elétricas que estabelecem o modelo matemático do gerador juntamente com a análise da dinâmica do conversor utilizado desde o transitório até em regime permanente. Resultados de simulação utilizando o ambiente MatLab/Simulink® também foram obtidos a fim de iniciar os estudos sobre o tópico e também mostrar que é possível utilizar este tipo de máquina para operação autoexcitada. A evolução destes testes possibilitou a conclusão de que este tipo de gerador, para determinada aplicação como eólica, necessita de um controle de tensão para aproveitar melhor a eficiência do gerador de forma que o mesmo não atinja níveis elevados de corrente, com o controle é possível a operação do gerador em baixa velocidade. Possibilitando, também, que este gerador possa ser conectado a um inversor CC/CA e acoplado a rede de distribuição de energia elétrica.

Resultados experimentais foram obtidos do protótipo sem controle, a fim de num primeiro momento validar os resultados de simulação. Os resultados mostram que o gerador em malha aberta é dependente da velocidade da turbina e com a carga acoplada aos seus terminais.

O controle de corrente de fase e tensão gerada possibilitou operar o gerador com diferentes velocidades e diferentes cargas.

Finalmente, a contribuição da tese se destaca na investigação ampla sobre as características operacionais dos GRV, operando no modo autoexcitado. Verificou-se a viabilidade da operação. Ainda ficou clara a necessidade de controle das correntes nas fases, a fim de acomodar as excursões de amplitude em níveis adequados, o que impacta diretamente no projeto do conversor estático.

8.2 - SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado nos estudos realizados apresenta-se algumas sugestões para continuidade da pesquisa:

- Simulação dinâmica do fluxo concatenado utilizando a representação da série de Fourier;
 - Simulação e implementação em DSP de um estimador de conjugado utilizando a expressão da série de Fourier;
 - Estudos sobre a oscilação de conjugado para o gerador autoexcitado;
 - Análise de desempenho e comparação do GRV autoexcitado CC e CA;
 - Implementação do GRV autoexcitado conectado com a rede elétrica;
 - Análise da influência dos ângulos (on/off) no rendimento do gerador;
-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] SILVEIRA, A. W. F. V. “Controle de tensão na carga para motor/gerador a relutância variável de três fases”, Tese de doutorado, LAcE - UFU, 2011.
- [02] Chen, H., J. J. Gu “Implementation of the Three-Phase Switched Reluctance Machine System for Motors and Generators” IEEE Transactions on Mechatronics, vol. 15, no. 3, pp. 521-432, June 2010.
- [03] Fleury, A. V. S., F. S. Silva; W. R. H. Araújo, D.A. Andrade, A. W. F. V. Silveira “Reduced switch count converter for switched reluctance generators” Eletrônica de Potência, Vol. 13, no. 3, Agosto 2008.
- [04] Silveira, A. W. F. V., D.A. Andrade, L. C. Gomes, C. A. Bissochi Jr, H. de Paula "Generated voltage control in a switched reluctance motor/generator" Eletrônica de Potência, Vol. 15, No.3., 2010.
- [05] G. G. Sotelo, M. R. Ribeiro, M. El-Mann, L. G. B. Rolim, J. L. da Silva Neto “Dynamic non-linear model of a Switched Reluctance Machine for operation as motor/generator” Eletrônica de Potência, Vol. 15, No.1., 2010.
- [06] P. P. Paula, W. M. da Silva, J. R. Cardoso, S. I. Nabeta “Simulação do Desempenho de Motores e Geradores de Relutância Chaveados” Eletrônica de Potência, Vol. 8, No.2., 2003.
- [07] T. J. E. Miller, “Electronic Control of Switched Reluctance Machines”, Newnes Power Engineering Series, Oxford, 2001.
- [08] SINGH, N. K., FLETCHER, J. E., FINNEY, S. J., WILLIAMS, B. W., “Evaluation of a sparse PWM converter for Switched Reluctance Generator,” *International Conference on Power Electronics and Drives Systems, 2005, PEDS 2005*, Volume 1, 16-18 Jan. 2006, pp. 721-725.

-
- [09] TORREY, D.A. (2002), "Switched reluctance generators and their control", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume 49, Issue 1, Feb. 2002, pp. 3-14.
- [10] Borges, Tauler Teixeira – "*Motor a Relutância Chaveado com Controle Fuzzy e Detecção Indireta de Posição*" – Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia – Julho / 2002.
- [11] CHUANG, L., JIAGENG, Y., XUEZHONG, Z. LIU, D., "Investigation and practice for basic theory of switched reluctance generators", *Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems*, Volume 1, 27-29 Sept. 2005, pp 575-579.
- [12] RADUN, A., "Generating with the switched reluctance motor", *Ninth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'94, Proceedings*, Volume 1, 13-17 Feb. 1994, pp. 41-47.
- [13] SAWATA, T., KJAER, P.C., COSSAR, C. MILLER, T.J.E., HAYASHI, Y., "Fault-tolerant operation of single-phase SR generators", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume 35, Issue 4, July-Aug 1999a, pp. 774-781.
- [14] SAWATA, T., KJAER, P.C. COSSAR, C., MILLER T.J.E., "A study on operation under faults with the single-phase SR generator", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume 35, Issue 4, July-Aug 1999b, pp. 782-789.
- [15] Bernardeli V. R., D. A. Andrade, A. W. F. V. Silveira, L. C. Gomes, G. P. Viajante, L.G.Cabral "Self-Excited Switched Reluctance Generator" XI Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência - COBEP, 2011.
- [16] N. Radimov, N. Ben-Hail, R. Rabinovici "Switched Reluctance Machines as Three-Phase AC Autonomous Generator", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 11, pp. 3760-3764, November 2006.
-

-
- [17] W. Cai, "Comparison and review of electric machines for integrated starter alternator applications", *IEEE-IAS*, 2004.
- [18] P. Zhang, S. S. Williamson, "Recent status and future prospects of integrated starter-generator based hybrid electric vehicles" *IEEE-VPPC*, 2008.
- [19] J. G. W. West, "DC, induction, reluctance and PM motors for electric vehicles" *Power Engineering Journal*, Vol. 8, Issue: 2, 1994.
- [20] Hwang, Gisele Regina – "*Modelagem da Máquina à Relutância Chaveada Incluindo a Saturação Magnética*" – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – Outubro / 2002.
- [21] Domingos, José Luis – "*Projeto, Construção e Proposta de Acionamento de um Motor Linear a Relutância Chaveado*" – Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia – Fevereiro, 2003.
- [22] Costa, Rogério S., – "*Estudo da Melhoria de Desempenho de Acionamentos Elétricos Utilizando MRCs Monofásicos*" – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – Outubro / 2004.
- [23] Teixeira, Rodrigo Stanziola – "*Estudo de Topologias de Conversores Estáticos para Acionamento de Motores a Relutância Chaveados*" – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – Março / 2005.
- [24] ANDRADE, D.A., COSTA, R.S., TEIXEIRA, R.S., FLEURY, A., "Energy efficiency for fractional power loads", *Industry Applications Magazine*, Vol. 2, No. 6, Nov-Dec 2006, pp. 12-20.
- [25] Bernardeli, Victor Régis – "*Controle de Conjugado em Motores a Relutância Variável Multifásicos*" – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – Julho / 2008.
-

-
- [26] Dias, Renato Jayme – “*Motores a Relutância Variável 6x4 e 6x6 Estudo Comparativo de Operação e Desempenho*” – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – Fevereiro / 2011.
- [27] Fleury, A., “Modelagem, construção, testes e análise de desempenho de um gerador a relutância chaveado”, Tese de doutorado, LAcE - UFU, 2008.
- [28] T. Matsuo, J. Luo, E. P. Hoffman, T. A. Lipo N. Radimov, N. Ben-Hail, R. Rabinovici “Self Excited Variable Reluctance Generator”, IEEE Industry Application Society, New Orleans, Louisiana, October 5-9, 1997.
- [29] V. Nedic, T. A. Lipo “Experimental Verification of Induced Voltage Self-Excitation of a Switched Reluctance Generator”, IEEE Industry Application Conference, Roma, Italy, October 8-12, 2000.
- [30] S. Méndez, A. Martínez, W. Millán, C. Montaña, F. P. Cebolla “Design, Characterization and Validation of a 1kW AC Self-Excited Switched Reluctance Generator” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume XX, Issue 99, May 2013, pp. 0001-00010.
- [31] A. Martinez, et. al., “Use of an AC self-excited switched reluctance generator as a battery charger” 13th IEEE-PEMC, 2008.
- [32] RADIMOV, N., BEN-HAIL, N., RABINOVICI, R., “Simple model of switched reluctance machine base only on aligned an unaligned position data”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Volume 40, Issue 3, May 2004, pp. 1562-1572.
- [33] I. Kioskeridis, C. Mademlis “Optimal Efficiency Control of Switched Reluctance Generators”, IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 21, no. 4, pp. 1062-1072, July 2006.
-

-
- [34] RABINOVICI, R., RADIMOV, N., "The Switched Reluctance generator as a flux-compression electromechanical converter", *23rd IEEE Convention of Electrical and Electronic Engineers in Israel, Proceedings 2004*, 6-7 Sept. 2004, pp. 321-324.
- [35] Martinez, A., Montano, C. E., Millan, W., Ovarbide, E., Perez-Cebolla, F. J. "Control of a 1 kW Switched Reluctance Generator Using Triac" XXVIII Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society – IECON 2012.
- [36] KIOSKERIDIS, I., MADEMLIS, C., "Optimal efficiency control of switched reluctance generators", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume 21, Issue 4, July. 2006, pp. 1062-1072.
- [37] SHAOPING, S., QINGFU, L., "Design of multi-pole single-phase switched reluctance generator", *Proceedings on the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2001*, Volume 2, 18-20 Aug. 2001, pp 938-941.
- [38] CLOYD, J.S., "A status of the United States Air Force's more electric aircraft initiative", *Proceedings of the 32nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, IECEC'97*, Volume 1, 27 July-1 Aug. 1997, pp. 681-686.
- [39] MITCHAM, A.J., GRUM, N., "An integrated LP shaft generator for the more electric aircraft", *IEE Colloquium on All Electric Aircraft*, 17 June 1998, pp. 8/1 – 8/9.
- [40] RAIMONDI, G.M., SAWATA, T., HOLME, M., BARTON, A., WHOTR, G. COLES, J. MELLOR, P.H., SIDELL, M., "Aircraft Embedded Generation System", *International Conference on Power Machines and Drives*, 4-7 June 2002, pp. 217-222.
- [41] SKVARENINA, T.L., PEKAREK, S., WASYNCZUK, O., KRAUZE, P.C., THIBODEAUX, R.J., WEIMER, J., "Simulation of a switched reluctance, more electric aircraft power system using a graphical user interface", *Proceedings of the 32nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, IECEC'97*, Volume 1, 27 July-1 Aug. 1997, pp. 580-584.
-

-
- [42] MACMINN, S.R., JONES, W.D., "A very high-speed switched-reluctance starter-generator for aircraft engine applications", *Proceedings of the IEEE 1989 National Aerospace and Electronics Conference, NAECON 1989*, Volume 4, 22-26 May 1989a, pp. 1758-1764.
- [43] MACMINN, S.R., SEMBER, J.W., "Control of a switched-reluctance aircraft engine starter-generator on a very wide speed range", *Proceedings of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, IECEC-89*, Volume 1, 6-11 Aug. 1989b, pp. 631-638.
- [44] Sikder, C., Husain, I., Sozer, Y., "Switched Reluctance Generator Controls for Optimal Power Generation with Current Regulation", *Fifth Annual Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE, Proceedings*, 15-20 September. 2012, pp. 4322-4329.
- [45] ELBULUK, M.E., KANKAM, M.D., "Potential starter/generator technologies for future aerospace applications", *Proceedings of the IEEE 1997 National Aerospace and Electronics Conference, NAECON 1996*, Volume 1, 20-23 May 1996, pp. 75-82.
- [46] DEFREITAS, D.M., "High performance electrical power systems for unmanned airborne vehicles", *Proceedings of the 1988 IEEE Southern Tier Technical Conference*, pp. 40-51.
- [47] DE VRIES, A., BONNASSIEUX, Y., GABSI, M., D'OLIVEIRA, F., PLASSE, C., "A Switched Reluctance Machine for a Car Starter-alternator System", *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2001*, pp. 323-328.
- [48] FAHIMI, B., "A switched reluctance machine based starter-generator for more electric cars, *IEEE International Electric Machine and Drives Conference, IEMDC 2001*, pp. 73-78.
-

-
- [49] CARDENAS, R., RAY, W.F., ASHER, G.M., "Switched Reluctance generators for wind energy applications", *26th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC'95 record*, Volume 1, 18-22 June 1995, pp. 559-564.
- [50] CHEN, H., MANG, C., ZHAO, X., "Research on the switched reluctance wind generator system", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Volume 5, 7-10 Oct 2001b, pp. 1936-1941.
- [51] HAO, C., TAO, S., FANG, X., YIFENG, Z., "A switched reluctance wind power generator with excitation of low voltage", *2002 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Volume 6, 6-9 Oct. 2002, pp.5.
- [52] MUELLER, M. A., "Design and performance of a 20 kW, 100 rpm, switched reluctance generator for a direct drive wind energy converter", *2005 IEEE International Conference on Electrical Machines and Drives*, 15-18 May 2005, pp. 56-63.
- [53] MUELLER, M.A., "Design of low speed switched reluctance machines for wind energy converters", *Ninth International Conference on Electrical Machines and Drives*, 1-3 Sept. 1999, pp. 60-64.
- [54] QUIXUE, Z., XIANGHENG, W. XUEZHONG, Z., DIJI L., "A small single-phase switched reluctance generator for wind power generation" *Proceedings on the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2001*, Volume 2, 18-20 Aug. 2001, pp 1003-1006.
- [55] CARDENAS, R., PEÑA, R., PEREZ, M., CLARE, J., ASHER, G., WHEELER, P., "Control of a switched reluctance generator for variable-speed wind energy applications", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Volume 20, Issue 4, Dec. 2005, pp. 781-791.
-

-
- [56] Bao, Y. J., Cheng, K. W. E., Cheung, N. C., Ho, S. L. "Experimental examination on a new switched reluctance wind power generator system for electric vehicles", *IET Power Electronics*, Volume 5, Issue 8, 2012, pp. 1262-1269.
- [57] Xue, X. D., Cheng, K. W. E., Bao, Y. J., Leung, P. L., Cheung, N., "Switched Reluctance Generators with Hybrid Magnetic Paths for Wind Power Generation", *IEEE Transactions on Magnetics*, Volume 48, Issue 11, Nov. 2012, pp. 3863-3866.
- [58] Echenique, E., Dixon, J., Cárdenas, R. "Sensorless Control for a Switched Reluctance Wind Generator, Based on Current Slopes and Neural Networks", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume 56, Issue 3, March 2009, pp. 817-825.
- [59] Chang, Y. C., Liaw, C. M. "On the Design of Power Circuit and Control Scheme for Switched Reluctance Generator", *IEEE Transactions on Power electronics*, Volume 23, Issue 1, January 2008, pp. 445-453.
- [60] C. G. C. Neves, N. Sadowski, Y. Lefevre, R. Carlson "Modelagem dos Ambientes Eletromagnético e Mecânico do Motor de Relutância Chaveado" *Eletrônica de Potência*, Vol. 2, No.1., 1997.
- [61] DA SILVA NETO, J.L., ROLIM, L.G.B., SOTELO, G.G., "Control of a power circuit interface of a flywheel-based energy storage system", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE'03*, Volume 2, 9-11 June 2003, pp. 962-967.
- [62] Andrade, D. A., Krishnan, R. "Characterization of Switched Reluctance Machines Using Fourier Series Approach" in Proc. 36th IEEE Ind. Appl. Annu. Meeting, Sep. 2001, pp. 48-54.
- [63] R. de Andrade, G. G. Sotelo, A. C. Ferreira, L. G. B. Rolim, J. L. da Silva Neto, R. M. Stephan, W. I. Suemitsu, R. Nicolsky, "Flywheel energy storage system description and tests" *Transactions on applied superconductivity, IEEE*, Vol. 17, P. 2, 2007.
-

-
- [64] Matsukawa, T. ; Yoshida, Y. ; Kanke, M. ; Yamashita, K. ; Shimada, R. ; Nakayama, T., “A 215 MVA Flywheel Motor-Generator with 4 GJ Discharge Energy for JT- 60 Toroidal Field Coil Power Supply System”, Energy Conversion, IEEE Transactions on, pags. 262 – 268, vol. EC-2 , Issue:2 , Junho 1987.
- [65] J.L. da Silva Neto, L.G.B. Rolim, G.G. Sotelo “ Control of power circuit interface of a flywheel-based energy storage system” in: IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Rio de Janeiro, Brazil, 2003, Vol. 2, pp. 962-967.
- [66] Ribeiro, M. R., El-Mann M., Sotelo, G. G., Rolim, L. G. B., Silva Neto, J. L., Stephan R. M. “Sistema armazenador de energia cinética – simulações e testes” In: XVII Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Juiz de Fora – MG – 2008.
- [67] Lanes, M., Rolim, L. G. B. “Armazenador cinético de energia (flywheel) baseado em máquina de relutância chaveada operando em alta velocidade: fundamentos, controle e aplicações” In: XVIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Campina Grande - PB – 2012.
- [68] RESENDE, J. T.; “Modelagem da Máquina de Indução Trifásica, Incluindo a Saturação Magnética – Análise Dinâmica do Gerador de Indução Auto-Excitado”, Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia, Brasil, 1999.
- [69] TEXAS, <http://www.ti.com/tool/tmdsez28335>, Acessado em 29/05/2013.
- [70] Chen, T. F. “Capacitance Requirements of Self-Excited Inductions Generators”, Energy Conversion, IEEE Transactions on, pags. 304 – 311, vol. 8 , Issue:2 , June 1993.
- [71] G. P. VIAJANTE, D. A. ANDRADE, A. W. F. V. SILVEIRA, V. R. BERNARDELI, L. C. COUTINHO, M. A. A. FREITAS, A. FLEURY " Estratégia para melhoria da eficiência da conversão eletromecânica de energia do GRV" Eletrônica de Potência, Vol. 16, No. 4., 2011.
-

-
- [72] V. R. BERNARDELI, D. A. ANDRADE, A. W. F. V. SILVEIRA, L. C. GOMES, G. P. VIAJANTE "Gerador a relutância variável operando no modo auto-excitado" *Eletrônica de Potência*, Vol. 16, No. 4., 2011.
- [73] Pomilio, J. A. "Apostila de Eletrônica de Potência", Universidade Estadual de Campinas, disponível no sítio <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/apostila.html>.
- [74] Curcio, M. In. Automotive Business. Disponível em: <http://www.automotivebusiness.com.br/noticia/17966/weg-trabalha-em-novo-motor-de-relutancia-variavel>. Acesso em 14 de fevereiro. 2014.
- [75] Ding, W. "Comparative Study on Dual-Channel Switched Reluctance Generator Performances Under Single and Dual Channel", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Volume 27, Issue 3, September 2012, pp. 680-688.
- [76] OLIVEIRA, E. S. L. ; COELHO, A. ; SUETAKE, M. ; AGUIAR, M. L. . Investigations on Single-Phase Switched Reluctance Generator under Variable Speed Operation. In: 11th Brazilian Power Electronics Conference, 2011, Natal/ RN. Anais do 11th Brazilian Power Electronics Conference, 2011.
- [77] COELHO, A. ; OLIVEIRA, E. S. L. ; SUETAKE, M. ; AGUIAR, M. L. . Experimental Performance Comparison between Single-Phase and Three-Phase Switched Reluctance Generator. In: 11th Brazilian Power Electronics Conference, 2011, Natal/RN. Anais do 11th Brazilian Power Electronics Conference, 2011.
- [78] Viajante, G. P. "Gerador a Relutância Variável em Conexão com a Rede Elétrica para Injeção de Potência Ativa", Tese de doutorado, LAcE - UFU, 2013.
- [79] Sozer, Y.; Torrey, D.A., "Closed loop control of excitation parameters for high speed switched-reluctance generators," *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2003. APEC '03. Eighteenth Annual IEEE , vol.1, no., pp.75,82 vol.1, 9-13 Feb. 2003
-

- [80] Oprasic, N., Masic, S. “*Excitation Parameters and Stability of Open Loop Operated Self-Excited Switched Reluctance Generator* ” XXXIX Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society – IECON 2013.

ANEXO

RELAÇÃO DE PRODUTIVIDADE OBTIDA COM O TRABALHO:

PERIÓDICOS

- VIAJANTE, G. P. ; D.A. Andrade ; A. W. F. V. Silveira ; **V. R. Bernardeli** ; L.C. Gomes ; J. L. Domingos ; M.A.A.Freitas ; A. Fleury . “**Simulação Dinâmica do Gerador a Relutância Variável em Conexão com a Rede Elétrica Monofásica**”. Eletrônica de Potência. Eletrônica de Potência (Impresso), (ARTIGO ACEITO) 2014.
- VIAJANTE, G. P. ; D.A. Andrade ; A. W. F. V. Silveira ; M.A.A.Freitas ; L.C. Gomes ; **V. R. Bernardeli** ; L.G.Cabral . “**Output DC Voltage Control Strategy for Switched Reluctance Generator**” Renewable Energy & Power Quality Journal, v. 10, p. 345-351, 2012.
- VIAJANTE, G. P. ; D.A. Andrade ; A. W. F. V. Silveira ; **V. R. Bernardeli** ; L.C. Gomes ; J. L. Domingos ; M.A.A.Freitas ; A. Fleury . “**Estratégia para Melhoria da Eficiência da Conversão Eletromecânica de Energia do GRV**”. Eletrônica de Potência. Eletrônica de Potência (Impresso), v. 16, p. 367-375, Novembro, 2011.
- BERNARDELLI, V. R.** ; D.A. Andrade ; A. W. F. V. Silveira ; L.C. Gomes ; VIAJANTE, G. P. “**Gerador a Relutância Variável Operando no Modo Auto-excitado**”. Eletrônica de Potência. Eletrônica de Potência (Impresso), v. 16, p. 357-366, Novembro, 2011.

CONFERÊNCIAS

- BERNARDELLI, V. R.** ; D.A. Andrade ; A. W. F. V. Silveira ; L.C. Gomes ; VIAJANTE, G. P., J. A. Santos Júnior, K. D. Rodrigues “**Estratégia de controle de Corrente para Acionamento do GRV Operando no Modo Autoexcitado**”. 2014, Belo Horizonte – Minas Gerais. Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2014.
- VIAJANTE, G. P. ; **D.A. Andrade** ; L.C. Gomes ; M.A.A.Freitas ; **V. R. Bernardeli** ; A. W. F. V. Silveira . “**A Voltage Control Strategy for Switched Reluctance Generator**”. In: IEEE International Electric Machines and Drives Conference - IEMDC, 2013, Chicago - EUA. IEMDC, 2013.
- VIAJANTE, G. P. ; D.A. Andrade ; L.C. Gomes ; SANTOS, J. A. ; **V. R. Bernardeli** ; COELHO, E. A. A. ; A. W. F. V. Silveira ; M.A.A.Freitas . “**A Grid Connection Scheme of a Switched Reluctance Generator for Active Power Injection**”. In: IEEE International Electric Machines and Drives Conference - IEMDC, 2013, Chicago - EUA. IEMDC, 2013.

VIAJANTE, G. P. ; D.A. Andrade ; L.C. Gomes ; M.A.A.Freitas ; COELHO, E. A. A. ; A. W. F. V. Silveira ; **V. R.**

Bernardeli . “**Simulação Dinâmica do Gerador a Relutância Variável em Conexão com a Rede Elétrica Monofásica**” 2012, Campina Grande - Paraíba. Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2012.

VIAJANTE, G. P. ; D.A. Andrade ; L.C. Gomes ; M.A.A.Freitas ; COELHO, E. A. A. ; A. W. F. V. Silveira ; **V. R.**

Bernardeli . “**Dinâmica do Gerador a Relutância Variável em Conexão com a Rede Elétrica Monofásica**” Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, 2012, Uberlândia. Anais Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, 2012.

BERNARDELI, V. R. ; D.A. Andrade ; L.C. Gomes ; A. W. F. V. Silveira ; VIAJANTE, G. P. “**Controlled Self-Excited Switched Reluctance Generator**”. In: IEEE International Electric Machines and Drives Conference - IEMDC, 2013, Chicago - EUA. IEMDC, 2013.

BERNARDELI, V. R. ; D.A. Andrade ; A. W. F. V. Silveira ; L.C. Gomes ; VIAJANTE, G. P. “**Proposta de controle de tensão gerada aplicada a um sistema de geração utilizando a máquina a relutância variável operando no modo auto excitado**”. 2012, Campina Grande - Paraíba. Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2012.

BERNARDELI, V. R. ; D.A. Andrade ; A. W. F. V. Silveira ; L.C. Gomes ; VIAJANTE, G. P. “**Switched Reluctance Machine Modeling Including Core Magnetic Saturation - The Self-Excited Operation Mode**” XXVIII Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society – IECON 2012.

BERNARDELI, V. R., D. A. Andrade, A. W. F. V. Silveira, L. C. Gomes, G. P. Viajante, M. J. Moraes “Proposta de controle de tensão gerada aplicada a um sistema de geração utilizando a máquina a relutância variável operando no modo auto-excitado” XII Conferência em Estudos em Engenharia Elétrica – CEEL – 2012.

BERNARDELI, V. R. ; D.A. Andrade ; A. W. F. V. Silveira ; L.C. Gomes ; VIAJANTE, G. P. ; L.G.Cabral . “**Self-excited Switched Reluctance Generator**”. In: COBEP, 2011, Natal. Power Electronics Conference (COBEP), 2011 Brazilian. NATAL: COBEP, 2011.

BERNARDELI, V. R. ; D.A. Andrade ; A. W. F. V. Silveira ; L.C. Gomes ; VIAJANTE, G. P. ; M.A.A.Freitas . “**Um Estudo Sobre A Máquina A Relutância Variável Operando Como Gerador Auto-Excitado**”. In: Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, 2011, Uberlândia. Anais Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, 2011.

Projeto Técnico

Estudo do comportamento da máquina a relutância variável operando como gerador auto-excitado,

FAPEMIG, projeto nr. APQ-00502-11, Demanda universal. Valor R\$ - 23.000,00;

Avaliação do desempenho de geradores a relutância variável autoexcitados conectados à rede elétrica,

FAPEMIG, projeto nr. APQ-01176-13, Demanda universal. Valor R\$ - 37.000,00;