Alexandre Coelho

Simulação, Projeto e Teste de um Gerador a Relutância Chaveado Trifásico 6 x 4

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Sistemas Dinâmicos
Orientador: Prof. Dr. Manoel Luís de Aguiar

São Carlos
2011

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Coelho, Alexandre.

C672s Simulação, projeto e teste de um gerador a relutância chaveado trifásico 6 x 4 / Alexandre Coelho ; orientador Manoel Luís de Aguiar. São Carlos, 2011.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Dinâmicos) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

1. Eletrônica de potência. 2. Máquina a relutância chaveada. 3. Gerador a relutância chaveado. 4. Simulação. 5. MatLab/Simulink. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Bacharel **ALEXANDRE COELHO**.

Dissertação defendida e julgada em 13/06/2011 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **MANOEL LUÍS DE AGUIAR** – (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Associado **DIÓGENES PEREIRA GONZAGA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **AUGUSTO FLEURY VELOSO DA SILVEIRA**
(Pontifícia Universidade Católica de Goiás/PUC-GO)

APROVADO

Prof. Titular **DENIS VINICIUS COURY**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica

Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Dedico este trabalho aos meus avós maternos, Maria Joana dos Santos Pereira (*in memoriam*) e Súdario de Souza Pereira (*in memoriam*), e aos meus avós paternos, Maria Silvério Ribeiro e José Coelho Ribeiro (*in memoriam*).

Agradeço a minha família por todo apoio e por serem a base de tudo que sou e busco ser. À minha mãe Maria Claret Coelho, ao meu pai Clarimar José Coelho e ao meu irmão Guilherme Coelho.

Um agradecimento ao avô José Coelho Ribeiro (*in memoriam*) por não ter medido esforços mesmo em épocas difíceis à educação e por ter passado este espírito ao meu pai. Um agradecimento ao meu pai, por este ter entendido a mensagem de seu pai e por tudo que ele é hoje, um grande amigo e companheiro do mundo da pesquisa, além de apresentar uma paixão contagiante por este mundo.

Agradeço a minha mãe por ser essa pessoa amável, amiga e uma grande mulher que abdicou de planos para se entregar totalmente à família, apoiando e fazendo com que a família cresça sempre.

Ao meu irmão, por ser sempre o melhor amigo e o companheiro que vem crescendo comigo e por tudo que representa na minha vida.

A todos os tios e primos que sempre apoiaram durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Manoel Luís de Aguiar pela oportunidade, apoio e orientação ao longo do mestrado.

Aos Professores Augusto Fleury e José Roberto pelas contribuições e apoio para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao companheiro de trabalho e grande amigo Eduardo Sylvestre Lopes de Oliveira que sempre esteve disposto a ajudar nos momentos necessários.

Aos companheiros e amigos da República Goiás é Mais (RGEM), que se tornaram a família do dia a dia, Eduardo Sylvestre, Gustavo Teodoro Laureano e Patrick Santos de Oliveira.

Aos amigos Marcelo Suetake, Etienne Biasotto, Antonio Helson, Marcel Cezare, Marcelo Santana, Fabbio Anderson, Rafael Jales, além de todos integrantes da República Gaiola e da República Corona +1 e todos os amigos do futebol, pelo companheirismo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também à Jussara e Marisa que sempre atendeu de forma carinhosa e atenciosa. Agradeço ao Rui por toda ajuda na montagem da bancada de testes.

“A vida é uma peça de teatro que não permite ensaios. Por isso, cante, chore, dance, ria e viva intensamente, antes que a cortina se feche e a peça termine sem aplausos.”

Charles Chaplin

Resumo

COELHO, A. Simulação, Projeto e Teste de um Gerador a Relutância Chaveado Trifásico 6×4 , 2011. 152 f. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

A Máquina a Relutância Chaveada ganhou considerável atenção da comunidade científica com o desenvolvimento da eletrônica de potência e é considerada hoje uma máquina elétrica promissora para algumas aplicações, principalmente aquelas onde há a necessidade de operação em velocidade variável seja como motor ou como gerador. Sendo assim, este trabalho apresenta a dinâmica de funcionamento de uma máquina a relutância chaveada, com uma estrutura 6×4 , ou seja contendo seis pólos no estator e quatro pólos no rotor, operando no modo gerador. A dinâmica de funcionamento é apresentada e comparada através de resultados experimentais e resultados simulados em ambiente Matlab/Simulink. Os resultados experimentais foram possíveis devido a construção de um protótipo da máquina e da montagem de uma bancada de testes. O projeto desenvolvido para construção do protótipo e da bancada de testes é apresentado neste trabalho.

Palavras-Chave: eletrônica de potência, máquina a relutância chaveada, gerador a relutância chaveado, simulação, matlab/simulink.

Abstract

Switched Reluctance Machines have received considerable attention from the scientific community due to advances in power electronics, and now is considered a promising electric machine for some applications, especially where variable speed operations are needed for motor or generator. Therefore, this work presents the dynamics of a switched reluctance machine, operating as a generator, with 6 x 4 structure, i.e., six stator poles and four poles in the rotor. Experimental results, which were obtained from a machine prototype installed on a test bench, were compared with Matlab/Simulink computational simulations. The designing aspects for the prototype construction are also discussed in this work.

Keywords: power electronics, switched reluctance machine, switched reluctance generator, simulation, matlab/simulink.

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Bancada de testes que será construída.	27
Figura 2.1 - Eletroímã construído em 1831 por Benjamin Silliman.	30
Figura 2.2 - Estrutura em dupla saliência de um GRC 6×4	34
Figura 2.3 - Perfil de indutância trapezoidal.	38
Figura 2.4 - Desenvolvimento das turbinas eólicas de 1980 a 2003 (BLAABJERG et al, 2006).....	44
Figura 2.5 - Diagrama de blocos que exemplifica o uso do GERC.	45
Figura 3.1 - Fase 1 e fase 2 do GRC para exemplificar a indutância mútua.	53
Figura 3.2 - Comportamento da curva de magnetização considerando a saturação magnética.....	55
Figura 3.3 - Comportamento da curva de magnetização desconsiderando a saturação magnética.....	56
Figura 3.4 - Perfil trapezoidal de indutância. Demonstração da variação em relação à posição do rotor.....	59
Figura 3.5 - Perfil real de indutância do protótipo construído.....	60
Figura 4.1 - Demonstração das larguras dos pólos do estator e rotor.....	67
Figura 4.2 - Perfil de indutância trapezoidal, presença de zona morta.....	67
Figura 4.3 - Perfil de indutância triangular.....	68
Figura 4.4 - Esquema elétrico para coleta do perfil e da superfície de indutância.	70
Figura 4.5 - Comportamento da indutância em função da posição do rotor e da corrente.....	71
Figura 4.6 - Superfície de indutância utilizada na simulação.....	71
Figura 4.7 - Esquema elétrico do conversor <i>Half-Bridge</i> para o GRC.	73
Figura 4.8 - Esquema elétrico do conversor série.	74
Figura 4.9 - Circuito elétrico ativo no momento de excitação da fase 1.	75
Figura 4.10 - Circuito elétrico ativo durante a entrega da potência gerada à carga.	75
Figura 4.11 - Simulação computacional do conversor serie.....	78
Figura 4.12 - Esquema computacional do conversor série.....	79
Figura 4.13 - Bloco S-Function.	79
Figura 4.14 - Perfil de indutância das três fases.	80
Figura 4.15 – Perfil de indutância utilizado na simulação, apenas uma fase	81
Figura 4.16 - Indutância e janela de condução da chave do conversor.	81
Figura 4.17 - Indutância e janela de condução das três fases.	82
Figura 4.18 - Bloco Simulink responsável pela resolução da equação de estados.....	83

Figura 4.19 - Desenvolvimento que ocorre no bloco GRC.....	84
Figura 4.20 - Cálculo do valor da corrente 1.	84
Figura 4.21 - Superfície da derivada da indutância.	85
Figura 4.22 - Cálculo do torque mecânico.	85
Figura 4.23 - Corrente na fonte de excitação.	87
Figura 4.24 - Tensão de excitação e corrente de entrada.	88
Figura 4.25 - Corrente de entrada e corrente de excitação.....	89
Figura 4.26 - Corrente de entrada e corrente de saída.	89
Figura 4.27 - Corrente no enrolamento, janela de condução e indutância.....	90
Figura 4.28 - Comportamento da tensão e corrente no enrolamento de uma das fases.	91
Figura 4.29 - Estrutura 6×4 com as fases indicadas.	91
Figura 4.30 - Janelas de condução e correntes nos enrolamentos de cada fase.	92
Figura 4.31 - Corrente de entrada, corrente de excitação e corrente de saída.	93
Figura 4.32 - Tensões e correntes nos enrolamentos das fases.	93
Figura 4.33 - Tensão e corrente gerada.	94
Figura 4.34 - Tensão e corrente gerada.	95
Figura 4.35 - Tensão e corrente na carga.	95
Figura 4.36 - Corrente gerada, corrente no capacitor e corrente na carga.	96
Figura 4.37 - Corrente na partida do gerador.	97
Figura 4.38 - Corrente na partida com pré-carga no capacitor.	97
Figura 4.39 - Tensão nas fases na partida do GRC.....	98
Figura 4.40 - Tensões nas fases na partida, capacitor junto à carga pré-carregado.	99
Figura 4.41 - Corrente no enrolamento, indutância, derivada da indutância e conjugado eletromagnético.	100
Figura 4.42 - Torque mecânico e torque eletromagnético.	100
Figura 4.43 - Conjugado mecânico e conjugado eletromagnético.....	101
Figura 4.44 - Potência mecânica de entrada.	102
Figura 4.45 - Potência elétrica de entrada.....	103
Figura 4.46 - Potência elétrica gerada.....	103
Figura 4.47 - Potência total de entrada, potência mecânica, potência elétrica de entrada e potência elétrica gerada.....	104
Figura 4.48 - Rendimento do GRC.	105
Figura 5.1 - Parâmetros construtivos do estator.....	116
Figura 5.2 - Parâmetros construtivos do rotor.....	117
Figura 5.3 - Lâmina de aço utilizada na construção do estator.....	119
Figura 5.4 - Lâmina de aço utilizada na construção do rotor.....	119

Figura 5.5 - Artefato construído para bonderização e empacotamento do estator.	120
Figura 5.6 - Estator sendo preparada para bonderização.	121
Figura 5.7 - Processo de montagem do estator.	121
Figura 5.8 - Processo de montagem do estator.	121
Figura 5.9 - Processo de montagem do estator na carcaça.	122
Figura 5.10 - Protótipo construído.	122
Figura 6.1 - Transformador trifásico variável.	126
Figura 6.2 - Ponte retificadora Semikron SKD 25/12.	126
Figura 6.3 - Circuito elétrico da ponte retificadora utilizada (Datasheet SKD 25/12).	127
Figura 6.4 - Conversor série montado.	127
Figura 6.5 - Mosfet IRFP 240 e diodo SKR 26/08.	128
Figura 6.6 - Sensoriamento realizado para acionar a chave eletrônica do conversor.	128
Figura 6.7 - Circuito de disparo.	129
Figura 6.8 - Motor de indução trifásico utilizado como entrada mecânica do gerador.	129
Figura 6.9 - Motor de indução trifásico acoplado ao gerador a relutância.	130
Figura 6.10 - Inversor de frequência utilizado.	130
Figura 6.11 - Protótipo montado na bancada de testes.	130
Figura 6.12 - Carga resistiva utilizada nos testes.	131
Figura 6.13 - Bancada de testes.	132
Figura 6.14 - Potência gerada em relação a velocidade.	133
Figura 6.15 - Tensão e corrente na excitação.	134
Figura 6.16 - Tensão e corrente na entrada.	134
Figura 6.17 - Tensão e corrente no enrolamento de uma das fases.	135
Figura 6.18 - Tensão e corrente nos enrolamento de uma fase, resultado simulado e experimental.	136
Figura 6.19 - Tensão e corrente na saída.	136
Figura 6.20 - Tensão e corrente na carga.	137

Lista de Abreviaturas

A	Unidade de corrente no MKS - Ampère
C	Capacitor de saída para amortecer oscilações na carga
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
D	Diodo da estrutura do conversor série
F	Unidade de capacitância no MKS – Faraday
FCEM	Força contra-eletromotriz
GRC	Gerador a relutância chaveado
GMR	Gerador motor de partida a relutância
GERC	Gerador eólico a relutância chaveado
H	Unidade de indutância no MKS - Henry
HB	Conversor meia ponte assimétrica, do inglês: <i>half bridge</i>
IEEE	Institute of Electrical and Eletronics Engineers
IGBT	Transistor bipolar de porta isolada
m	Unidade de distância no MKS - Metro
MOSFET	Transistor de efeito de campo de metal-óxido semiconductor
mm	Milímetros
MEA	More electric aircrafts
MR	Motor a relutância chaveado
MRC	Máquina a relutância chaveada
N	Unidade de força no MKS - Newton
P	Sinal de disparo das chaves controladas do GRCM
P1	Sinal de disparo das chaves controladas da fase 1

P2	Sinal de disparo das chaves controladas da fase 2
P3	Sinal de disparo das chaves controladas da fase 3
PWM	Modulação por largura de pulso, do inglês: <i>Pulse Width Modulation</i>
R	Resistência de carga
rad/s	Unidade de velocidade angular no MKS - Radianos por segundos
V	Unidade de tensão no MKS - Volts
W	Unidade de potência no MKS - Watts
Ω	Unidade de resistência no MKS - Ôhm

Lista de Símbolos

D	Coeficiente de atrito viscoso
i	Corrente da fase
$\dot{i}$	Derivada temporal da corrente na bobina da fase
J	Momento de inércia
L	Indutância de fase
L_{max}	Máxima indutância da fase
L_{min}	Mínima indutância da fase
R	Resistência ôhmica
s	Segundos
t	Tempo
T_m	Conjugado mecânico
T_{emag}	Conjugado eletromagnético
v	Tensão da fase
W^{co}	Co-energia
α_{es}	Arco polar do estator
α_{ro}	Arco polar do rotor
$\frac{di}{dt}$	Derivada temporal da corrente na bobina da fase
$\frac{d\theta}{dt}$	Variação da posição angular do rotor em relação ao tempo
$\frac{\partial i}{\partial t}$	Derivada parcial da corrente na bobina da fase

$\frac{\partial \lambda}{\partial t}$	Derivada parcial do fluxo magnético na bobina da fase
$\frac{\partial L}{\partial \theta}$	Derivada parcial da indutância em relação à posição angular instantânea do rotor
λ	Fluxo magnético
θ	Posição angular
$\theta_{on_{mot}}$	Posição angular onde a chave do conversor é acionada para funcionamento no modo motor
$\theta_{off_{mot}}$	Posição angular onde a chave do conversor é desligada para funcionamento no modo motor
$\theta_{on_{ger}}$	Posição angular onde a chave do conversor é acionada para funcionamento no modo gerador
$\theta_{off_{ger}}$	Posição angular onde a chave do conversor é desligada para funcionamento no modo gerador
ω	Velocidade angular

Sumário

RESUMO	XI
ABSTRACT.....	XIII
LISTA DE FIGURAS.....	XV
LISTA DE ABREVIATURAS	XIX
LISTA DE SÍMBOLOS	XXI
SUMÁRIO.....	XXIII
CAPÍTULO 1	25
INTRODUÇÃO	25
1.1 Objetivos	26
1.2 Estrutura do Documento	27
CAPÍTULO 2	29
A MÁQUINA A RELUTÂNCIA CHAVEADA	29
2.1 Introdução.....	29
2.2 Histórico do Desenvolvimento da Máquina a Relutância Chaveada	30
2.3 Considerações Sobre as Máquinas a Relutância Chaveada Modernas.....	34
2.4 Funcionamento Básico da Máquina a Relutância Chaveada.....	36
2.5 Aplicações Típicas	39
2.5.1 Aplicação Aeronáutica e Espacial.....	39
2.5.2 Aplicação Automotiva.....	41
2.5.3 Aplicação em Geração Eólica.....	42
2.6 Conclusões.....	46
CAPÍTULO 3	49
MODELO MATEMÁTICO	49
3.1 Introdução.....	49
3.2 Modelo Matemático.....	50
3.3 Conclusão	63
CAPÍTULO 4	65
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	65
4.1 Introdução.....	65
4.2 Considerações Para Realização da Simulação	66
4.2.1 Perfil de Indutância.....	66
4.2.2 O Conversor Utilizado	72
4.2.3 Matlab/Simulink.....	76
4.3 Simulação	77
4.4 Resultados Simulados	86
4.4.1 Introdução.....	86

4.4.2	Resultados Simulados.....	87
4.5	Conclusões	105
CAPÍTULO 5.....		109
PROJETO DA MÁQUINA A RELUTÂNCIA CHAVEADA		109
5.1	Introdução	109
5.2	Projeto do Gerador a Relutância Chaveado	110
5.2.1	Considerações importantes	110
5.2.2	Cálculos Para Definição dos Parâmetros Construtivos.....	112
5.3	Apresentação do Protótipo Construído	118
5.3.1	Aço Utilizado e Corte das Lâminas de Aço	118
5.3.2	Montagem do Protótipo	120
5.4	Conclusões	123
CAPÍTULO 6.....		125
BANCADA DE TESTES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS		125
6.1	Introdução	125
6.2	Bancada de Testes.....	126
6.3	Resultados Experimentais.....	132
6.4	Conclusão.....	138
CAPÍTULO 7.....		139
CONCLUSÕES.....		139
7.1	Trabalhos Futuros	140
7.1.1	Controle do Gerador	140
7.1.2	Comparação de uma Máquina a Relutância Chaveada Trifásica e uma Máquina a Relutância Chaveada Monofásica	141
APÊNDICE A		143
APÊNDICE B		145
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		147
ARTIGOS RELACIONADOS AO TRABALHO		151
Publicados.....		151
Aprovados Para Publicação.....		151

Capítulo 1

Introdução

A Máquina a Relutância Chaveada é um dos tipos mais simplificados de máquinas elétricas, conhecida desde o princípio dos estudos a cerca das máquinas elétricas no início do século dezenove, teve seu desenvolvimento de forma tardia, somente após o advento da eletrônica de potência (ANDERSON, 2001).

Este tipo de máquina despertou um crescente interesse da comunidade científica a partir do momento em que a eletrônica de potência foi se desenvolvendo. A princípio os estudos se concentraram mais no uso da máquina operando no modo motor a relutância chaveado, porém, atualmente pode-se perceber um crescente número de trabalhos a respeito do gerador a relutância chaveado.

O baixo custo de fabricação da máquina a relutância chaveada é conhecido como uma de suas vantagens. O avanço da eletrônica de potência faz com que o custo com utilização de componentes eletrônicos se reduza, pois os componentes vêm tendo redução nos preços, fator este que é interessante para manter o baixo custo de fabricação.

Além do desenvolvimento da eletrônica de potência, o desenvolvimento do micro processamento e do sensoriamento, são outros fatores que favorecem para que a máquina a

relutância se torne uma opção viável para algumas aplicações. Aplicações estas que normalmente serão onde a operação se dá com velocidades variáveis, como pode ser visto nos estudos existentes visando a utilização desta máquina na geração eólica de energia, em automóveis, aviões e até mesmo em eletrodomésticos.

Com as possibilidades de aplicação da máquina a relutância crescendo, a tendência do aumento no número de trabalhos investigando tal máquina acontece de forma natural, pois há o crescimento no número de interessados a compreender o funcionamento e realizar as evoluções necessárias para que a máquina se torne uma realidade. Devido a isso é possível encontrar um aumento significativo no número de trabalhos publicados sobre este conversor eletromecânico de energia.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo o estudo do Gerador a Relutância Chaveado (GRC).

O objetivo é mostrar a construção de um protótipo GRC trifásico 6×4 , como também sua dinâmica de funcionamento, utilizando tanto resultados simulados computacionalmente como resultados experimentais. Para isso um bom entendimento sobre o modelo matemático do gerador a relutância se fez necessário.

A Figura 1.1 apresenta simbolicamente a bancada de testes construída. Nesta Figura fica ilustrado por blocos o que foi necessário para construção da bancada de testes. O bloco Rotor representa um Motor de Indução Trifásico (MIT) utilizado para prover torque mecânico no eixo do gerador, este MIT foi ligado utilizando um inversor de frequência, facilitando assim testes com variação de velocidade. O protótipo construído é representado pelo bloco GRC. A tensão da rede é a tensão disponibilizada pela concessionária de energia, neste caso uma tensão de Corrente Alternada (CA) com 110 V fase-neutro e 220 V fase-fase. A ponte retificadora é responsável por retificar a tensão CA em tensão de Corrente Contínua (CC). O

bloco conversor é a representação do conversor eletrônico que realiza o acionamento das fases do GRC e a carga é a resistência elétrica que o GRC alimenta.

Figura 1.1 - Bancada de testes que será construída.

A construção de um protótipo se torna interessante, pois dessa forma investigações futuras podem ser realizadas utilizando a máquina a relutância chaveada, que pode funcionar tanto no modo motor, como no modo gerador.

1.2 Estrutura do Documento

A disposição dos capítulos e conteúdo se desenvolve da seguinte forma:

- Capítulo 2: apresenta um breve e resumido histórico sobre a máquina a relutância chaveada. Apresenta também a estrutura da máquina e seu princípio de funcionamento no modo gerador, além de algumas aplicações modernas do gerador a relutância chaveado.
- Capítulo 3: apresenta o modelo matemático do gerador a relutância chaveado.
- Capítulo 4: apresenta a simulação. Fazendo a consideração sobre o perfil da curva de indutância utilizada na simulação, demonstra o conversor utilizado e como foi feita a simulação no software Matlab.

- Capítulo 5: apresenta os resultados obtidos através da simulação do gerador a relutância chaveado, demonstrando o comportamento das curvas de tensão e corrente na excitação do gerador, no enrolamento da máquina e na carga elétrica que é alimentada pelo gerador, além do comportamento das potências de excitação, total de entrada e gerada. O rendimento do gerador é também demonstrado neste Capítulo.
- Capítulo 6: apresenta o projeto do protótipo construído, demonstrando como foi realizado o cálculo dos parâmetros da máquina.
- Capítulo 7: apresenta a bancada de testes que foi montada para que o protótipo pudesse ser operado. Apresenta também os resultados experimentais, demonstrando a dinâmica de funcionamento de forma experimental.
- Capítulo 8: disponibiliza as conclusões finais e as propostas para possíveis estudos que possam ser realizados utilizando o protótipo construído.
- Referências bibliográficas.

Capítulo 2

A Máquina a Relutância Chaveada

2.1 Introdução

A Máquina a Relutância Chaveada (MRC) é conhecida desde o início dos estudos com máquinas elétricas (1830 – 1850), estando entre os primeiros motores desenvolvidos (ANDERSON, 2001). Sendo assim um histórico a respeito desta máquina elétrica se torna interessante e é apresentado neste capítulo de forma resumida.

A MRC teve seu desenvolvimento tardio quando comparada com outros tipos de máquinas elétricas, sendo a necessidade de componentes eletrônicos de potência eficientes para seu acionamento, o principal fator para que os estudos se dessem de forma mais recente (ANDERSON, 2001). O princípio de funcionamento é simplificado e esta máquina elétrica funciona bem tanto como motor a relutância como gerador a relutância (RADUN, 1994; TORREY, 2002; FLEURY, 2008).

Os estudos em um primeiro momento se concentraram no Motor a Relutância Chaveado (MR), onde os primeiros trabalhos aparecem por volta dos anos 80. Já os trabalhos

a cerca do Gerador a Relutância Chaveado são mais recentes (CHUANG, 2005) e a produção científica cresceu bastante nos últimos anos.

O presente capítulo apresenta a MRC, um breve histórico e o GRC que é o tema deste trabalho.

2.2 Histórico do Desenvolvimento da Máquina a Relutância Chaveada

A origem das MRC se encontra no eletroímã de ferradura proposto por William Sturgeon (1824), e na sua versão melhorada proposta por Joseph Henry que foi construída em 1831 por Benjamin Silliman, e pode ser verificada na Figura 2.1. Este eletroímã foi capaz de suportar um peso de 1000 libras, que equivale aproximadamente a 453 quilogramas. A potência deste eletroímã para atrair uma armadura de ferro inspirou a idéia para a construção do primeiro motor elétrico, sendo este bastante rústico (ANDERSON, 2001).

Figura 2.1 - Eletroímã construído em 1831 por Benjamin Silliman.

Em 1833 William Ritchie então Professor de Filosofia Natural no *Royal Institution* e na Universidade de Londres, conhece o eletroímã proposto por Henry e da considerável potência obtida por este aparato. Intuitivamente percebe que se o eletroímã era para ser colocado em uso prático, algum modelo para descrever seu comportamento seria necessário, sendo assim o primeiro a tentar estabelecer alguma lei para descrever o comportamento magnético (ANDERSON, 2001; FLEURY, 2008). A conclusão mais significativa de Ritchie foi que encurtando o circuito magnético e mantendo o circuito elétrico bem acoplado, os resultados seriam melhores, ou seja, o eletroímã teria uma maior potência (ANDERSON, 2001).

A conclusão de Ritchie foi de certa forma esquecida por seus contemporâneos e as primeiras máquinas elétricas foram construídas através de tentativa e erro, contendo assim circuitos magnéticos pobres. Os primeiros projetos de máquinas elétricas, iniciados por volta de 1839, eram motores a relutância com forte influência da máquina a vapor, vistos como equivalentes. Somente após 1886 com o trabalho de John Hopkinson sobre o circuito magnético, que a importância em encurtar este circuito foi levada em consideração, melhorando assim os projetos das máquinas elétricas (ANDERSON, 2001; FLEURY, 2008).

Exemplos dos primeiros projetos podem ser citados em 1841 com Davidson e Taylor e em 1842 quando Willian Henley construiu para Charles Wheatstone dois pequenos motores excêntricos, constituídos na patente de Wheatstone de 1841 (ANDERSON, 2001; FLEURY, 2008).

A MRC foi sendo estudada em variados tipos de configurações por demais entusiastas da idéia, como por exemplo: Charles Page (1851) que dá início a um tipo de atuador linear de relutância; La Cour (1878) e Rayleigh (1879) com a roda fônica que era também um tipo de máquina a relutância. Porém antes do final do século XIX a MRC se torna uma curiosidade científica, devido ao desenvolvimento do motor comutado em 1870 e da descoberta da lei dos

circuitos magnéticos em 1880, além do entendimento de que as bobinas de armadura podiam ser expostas em ranhuras tanto em aplicações em Corrente Alternada – CA quanto em Corrente Contínua – CC. Resultando assim em motores de maior eficiência do que às MRC existentes (ANDERSON, 2001; FLEURY, 2008).

Versões da MRC podem ser citadas também nos anos 90, como por exemplo: o motor de passo do tipo M, que marca outro estágio das MRC na história, conhecido pela patente de Clausen de 1924 (ANDERSON, 2001), desenvolvido logo após a Primeira Guerra Mundial; o alternador de alta frequência de Walker de 1946 é outro exemplo (ANDERSON, 2001), dentre outras versões. Mas é somente a partir de 1960 que a MRC reaparece como uma idéia promissora.

O desenvolvimento da eletrônica de estado sólido no início de 1960, substituindo os conversores de arco de mercúrio e amplificadores magnéticos, fez com que os estudos utilizando aplicações com velocidades variáveis pudessem ser desenvolvidos com um menor custo e um maior desempenho, acelerando o desenvolvimento de tal aplicação, e é nesse cenário que as MRC retornam e ganham força.

Os anos 60 são considerados a transição de uma era histórica para uma era moderna das MRC. De acordo com (ANDERSON, 2001) em 1961 já se tem registro do uso de tiristores em um motor a relutância. Porém no início o desenvolvimento dos estudos da eletrônica de potência empregada na MRC se dá de forma lenta e é somente em meados de 1980 que ocorre uma aceleração no desenvolvimento das MRC.

Os fatores responsáveis pelo desenvolvimento de forma rápida das MRC a partir dos anos 80 são: o desenvolvimento da eletrônica de potência, que disponibiliza o transistor de junção bipolar, em um primeiro momento e depois o MOSFET de potência e o IGBT; a evolução no micro processamento e o desenvolvimento no sensoramento são os outros

fatores que favorecem, para que a MRC apareça para algumas aplicações como uma máquina viável, confiável e eficiente (ANDERSON, 2001; FLEURY, 2008).

O MOSFET de potência e o IGBT aparecem como dispositivos que facilitam o desenvolvimento do controle com comutação forçada e modulação da largura de pulso, além da possibilidade de trabalho em frequências mais elevadas, quando comparados com os tiristores.

Fica evidenciado neste breve histórico, que o desenvolvimento da eletrônica de potência foi fator determinante e decisivo para que a MRC reaparecesse como opção para algumas aplicações e para que ganhasse espaço na comunidade científica.

Nos últimos anos há um crescimento considerável de trabalhos publicados sobre a MRC. Em um primeiro momento os trabalhos se restringiam à MRC sendo utilizada como Motor a Relutância Chaveado – MR e aos métodos de chaveamento, tanto teoricamente quanto experimentalmente. No início de 1980 já era possível encontrar trabalhos sobre o MR e de acordo com (ANDERSON, 2001), estes tiveram um grande crescimento ultimamente. Os trabalhos acerca do Gerador a Relutância Chaveado – GRC se dão de forma mais recente e aparecem nos últimos anos (CHUANG, 2005), mais também apresentam um crescimento e um número considerável de trabalhos em um curto espaço de tempo.

Hoje tanto o MR quanto o GRC é um assunto de interesse da comunidade científica, pois o desenvolvimento dos trabalhos demonstra que a MRC é competitiva para algumas aplicações, sendo uma opção viável, confiável e eficiente como já foi citado (ANDERSON, 2001; FLEURY, 2008).

Esta seção apresentou um resumo histórico das MRC. A dificuldade de se encontrar fontes confiáveis de um histórico desse tipo de máquina é evidenciada em (FLEURY, 2008), sendo (ANDERSON, 2001) a principal fonte para um histórico mais detalhado.

2.3 Considerações Sobre as Máquinas a Relutância Chaveada Modernas

A MRC pode ser estudada em diversas configurações. A Figura 2.2 apresenta a estrutura de uma máquina trifásica com seis pólos no estator e quatro pólos no rotor, sendo esta configuração conhecida como $m \times n$, onde m é o número de pólos do estator e n é o número de pólos do rotor, ou também conhecida como configuração polifásica. Dentre as configurações polifásicas a topologia 6×4 é a mais conhecida e é a apresentada neste trabalho. Outro tipo de configuração, conhecida como monofásica apresenta a mesma quantidade de pólos no estator e no rotor, e é denominada como configuração $m \times m$, podendo ser 2×2 , 4×4 , 6×6 , sendo alguns dos exemplos da topologia monofásica.

Figura 2.2 - Estrutura em dupla saliência de um GRC 6×4 .

A MRC consiste em uma estrutura em dupla saliência e apresenta bobinas somente nos pólos do estator (MILLER, 2001; KRISHNAN, 2001; CARDENAS et al, 2004), como ficou evidenciado na Figura 2.2, fica claramente ilustrado que é uma máquina elétrica de simples construção. Um ou mais de um par de pólos do estator podem formar uma fase (BORGES, 2002; CHUANG et al, 2005). Neste caso apresentado os pares de pólos

diametralmente opostos do estator formam uma fase e suas bobinas são usualmente ligadas em série e percorridas pela mesma corrente pulsada (SAWATA et al, 1999).

A estrutura em dupla saliência garante um menor custo com material ferromagnético que também fica evidenciado na Figura 2.2.

As bobinas restritas aos pólos do estator garantem um menor custo com cobre, além de propiciar uma menor perda por efeito Joule, deixando o estator como responsável por este tipo de perda (TORREY, 2005). Com um menor custo no material ferromagnético e no cobre, o custo de fabricação da MRC se torna um fator interessante deste tipo de máquina (RADIMOV et al, 2004).

Tanto a estrutura em dupla saliência quanto as bobinas restritas aos pólos do estator permitem que esta máquina seja considerada de fácil resfriamento, tornando-a apta para aplicações em altas temperaturas (TORREY, 2005) e possibilitando também um aumento na densidade de potência (FLEURY et al, 2008).

A simples construção e o baixo custo de fabricação são apenas algumas das características positivas da MRC. As ausências de ímãs permanentes e escovas, aliadas a solidez do rotor reduzem em larga escala o custo com manutenção (FLEURY, 2008) e aumentam a robustez (RADIMOV et al, 2004) deste tipo de máquina, além de permitir uma operação em velocidades bastante elevadas, com possibilidade de aplicação em aeronáutica civil e militar (EL-NEMR et al, 2003; ICHINOKURA et al, 2003; SKVARENINA et al, 1997).

Outras qualidades podem ser citadas, como: alto rendimento, possibilidade de aplicação em uma larga faixa de velocidades (HAO et al, 2003) e em regime de velocidades variáveis. Com todas estas características positivas a MRC ganha espaço para estudos em algumas aplicações que serão neste trabalho apresentadas.

Mesmo com tantas vantagens não é possível encontrar uma MRC de forma comercial, porém os estudos a cerca desta máquina elétrica tem um crescimento significativo nos últimos anos, fato este que pode ajudar para que a MRC se torne uma realidade.

Alguns pontos desfavoráveis devem ser citados. O *ripple* de corrente, tensão e torque (RADIMOV et al, 2004; ICHINOKURA et al, 2003) são desvantagens conhecidas desta máquina. Fatores estes que a evolução na eletrônica de potência vem amenizando, porém a própria necessidade de um conversor estático é um fator negativo atribuído às MRCs. Este motivo torna interessante a aplicabilidade da MRC onde a eletrônica de potência se faz necessária. O problema acústico (LACHMAN et al, 2003; FLEURY, 2008; KRISHNAN, 2001) também é outro ponto citado como desvantagem inerente a este tipo de máquina.

O funcionamento da MRC não acontece de forma simplificada como o motor de indução, que é a máquina elétrica mais usada nos dias de hoje e pode ser ligada diretamente à rede elétrica, verificando apenas qual configuração de tensão e de partida se deseja utilizar. A MRC é essencialmente de CC e necessita de uma fonte CC para sua alimentação, além disso, é necessário um circuito conversor para seu acionamento e um sistema adequado para acionamento das chaves do conversor a ser utilizado (FLEURY, 2008).

2.4 Funcionamento Básico da Máquina a Relutância Chaveada

A MRC é um conversor eletromecânico de energia que pode funcionar muito bem para aplicações motoras e geradoras (SAWATA et al, 1999; SAWATA, 2001; DIAS et al, 2008), realizando apenas a alteração no ângulo de acionamento das chaves do conversor eletrônico.

De forma simplificada, a tensão nos terminais do enrolamento da MRC é:

$$v = R \cdot i + \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.1)$$

onde v é a tensão instantânea, i é a corrente instantânea, R a resistência ôhmica e λ é o fluxo magnético. Sendo estes dados referentes a uma fase, sendo que com exceção de R todos os outros termos vão variar de acordo com a posição do rotor em relação ao tempo t .

A relação da corrente com o fluxo (λ) se dá através da indutância própria (L), como pode ser verificado em:

$$\lambda = L \cdot i \quad (2.2)$$

Substituindo (2.2) em (2.1) e sabendo que L é uma função da posição angular (θ) do rotor, no domínio do tempo tem-se:

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

Considerando que a variação angular do rotor em relação ao tempo $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)$ é a velocidade angular (ω), a equação (2.3) pode ser escrita:

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

Verificando a equação (2.4), pode-se determinar que o primeiro termo do segundo membro ($R \cdot i$) é a queda de tensão ocorrida na resistência do enrolamento, que o segundo termo do segundo membro $\left(L \cdot \frac{\partial i}{\partial t}\right)$ é a queda de tensão indutiva e o terceiro termo do segundo membro da equação $\left(i \cdot \omega \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta}\right)$ é uma Força Contra Eletromotriz (FCEM), que depende da variação da indutância em relação à posição angular, da velocidade (ω) e da corrente (i).

A variação na indutância em relação à posição será determinante para escolha do modo de operação da MRC. No momento em que a variação da indutância em relação à

posição do rotor for positiva $\left(\frac{\partial L}{\partial \theta} > 0\right)$ a máquina funciona no modo motor, e no momento em que essa variação for negativa $\left(\frac{\partial L}{\partial \theta} < 0\right)$ a máquina é operada no modo gerador.

Na Figura 2.3 pode-se verificar que o momento de acionamento da chave do conversor vai ser o fator determinante para escolha do modo motor ou gerador, dependendo da configuração que se deseja utilizar. Para o funcionamento no modo motor, as chaves do conversor devem ser acionadas em $\theta_{on_{mot}}$. Para o funcionamento no modo gerador, o disparo das chaves deve ser realizado em $\theta_{on_{ger}}$. A Figura 2.3 demonstra também, um perfil de indutância trapezoidal para exemplificar o momento em que a variação da indutância em relação à posição é positiva e o momento em que essa variação é negativa.

Figura 2.3 - Perfil de indutância trapezoidal.

O funcionamento da MRC como gerador pode ser explicado analisando a Figura 2.2. Esta figura demonstra uma fase do gerador acionada no momento que sua indutância está no valor máximo, como exemplificado na Figura 2.3 este é o momento em que essa fase deve ser acionada para que a MRC funcione como gerador. Considerando que há um torque mecânico aplicado ao eixo da máquina, a tentativa de manutenção desta máxima indutância, que se encontra em equilíbrio, gera uma FCEM negativa, que é a tensão gerada. Quando ocorre o

desalinhamento dos pólos do estator e rotor dessa fase, as chaves do conversor são desligadas e outra fase é acionada, sempre em forma sequencial no caso do GRC trifásico 6×4 .

O controle do GRC ainda precisa ser aperfeiçoado e para cada tipo de aplicação necessita-se saber qual a técnica de controle será empregada. Nas aplicações como gerador motor de partida, a máquina vai funcionar como motor e como gerador, já para aplicações eólicas a máquina opera somente no modo gerador. É possível encontrar trabalhos tratando sobre o assunto do controle nos geradores a relutância chaveado, em (FLEURY, 2008) alguns trabalhos são apresentados.

2.5 Aplicações Típicas

Os estudos do GRC se concentram hoje em aplicações de velocidades variáveis e onde se faz necessária a utilização da eletrônica de potência, pois para estas aplicações o GRC se torna interessante. As aplicações em velocidades variáveis exigem a utilização de conversores eletrônicos não só nas MRCs, outras máquinas elétricas como a máquina de indução também necessitam de componentes eletrônicos para seu acionamento, tornando assim a MRC competitiva, pois as principais aplicações onde a MRC é hoje estudada se dão com velocidade variável e onde a busca por máquinas elétricas trabalhando com melhores rendimentos ainda é presente.

As principais aplicações que aqui serão citadas são: aeronáutica e espacial; automobilística e a aplicação em energia eólica. Cada uma dessas aplicações será detalhada nesta seção.

2.5.1 Aplicação Aeronáutica e Espacial

A dualidade de funcionamento da MRC, tendo uma boa operação tanto como MR como GRC (FLEURY, 2008), além da aplicabilidade em velocidades variáveis e um grande

leque de velocidades funcionais, permitiu que a MRC fosse estudada para aplicações aeronáuticas.

A força aérea americana é um dos grandes responsáveis pelo crescente número de trabalhos a cerca das MRC (FLEURY, 2008), com a criação do programa *More Electric Aircraft* (MEA). O programa americano estimula principalmente os trabalhos onde a máquina opera como Gerador Motor de Partida a Relutância (GMR), nome este que é a tradução do inglês *starter/generator* feita por (FLEURY, 2008).

O desenvolvimento da aplicação da MRC para esta finalidade é interessante. Este tipo de máquina elétrica é o único que funciona como gerador e não possui ímãs permanentes ou enrolamentos de cobre no rotor, sendo estes fatores os que a tornam vantajosa e com fortes possibilidades para esta aplicação (RADUN, 1994).

A não possibilidade de desligar a excitação é um problema inerente às máquinas de ímã permanente e às que possuem enrolamentos no rotor, quando estas funcionam como gerador. Problema este que não é encontrado na MRC, porém é importante um conhecimento de como realizar a excitação neste tipo de máquina, para conhecer suas limitações de operação (RADUN, 1994).

A MRC desempenha tanto o papel de motor a relutância quanto o papel de gerador a relutância, nesta aplicação. Como motor pode substituir sistemas hidráulicos, sendo esta substituição um dos principais objetivos estabelecidos pelo MEA, além da diminuição de peso e volume.

Nesta aplicação o uso do GRC é interessante para aplicações futuras, onde o mesmo apareceria como fonte elétrica para alimentação dos circuitos elétricos e eletrônicos que crescem cada vez mais nas aeronaves. Dessa forma o GMR seria acoplado diretamente ao eixo das turbinas do avião [67], sendo esta a fonte de torque, ou seja, a entrada mecânica para o funcionamento do GMR. Dessa forma a rotação das turbinas ocorrida com a queima de

combustíveis é aproveitada, possibilitando assim que os aviões se tornem cada vez mais elétricos, pois desta forma é possível pensar no armazenamento desta energia gerada em baterias, para utilização do sistema elétrico dos aviões.

A simulação de uma MRC para a aplicação no MEA pode ser encontrada em (SKVARENINA et al, 1997) e um projeto desta máquina foi apresentado em (MACMIM et al, 1989), de acordo com (FLEURY, 2008).

Outros diversos artigos podem ser encontrados tratando da aplicação aeronáutica e espacial, como: (ELBULUK et al, 1996; RADUN, 1994; MACMINN et al, 1989), dentre outros.

2.5.2 Aplicação Automotiva

A aplicação automobilística da MRC se parece com a aplicação aeronáutica, pois aqui a MRC também trabalha como GMR, sendo a intenção fazer com que os carros possam se tornar mais elétricos.

A crescente preocupação com conforto e segurança faz com que os carros utilizem cada vez mais opcionais eletrônicos, atuadores e controladores elétricos, fato este que chama a atenção, pois a possibilidade de fazer com que os carros se tornem mais elétricos, pode ser interessante para um grande desenvolvimento da MRC sendo aplicada como GMR.

Com os carros utilizando mais sistemas embarcados elétricos e eletrônicos, a opção por um método de tração elétrica também é muito estudada. A utilização de um gerador elétrico ligado diretamente ao eixo das rodas do veículo se torna interessante, pois assim a alimentação do sistema elétrico do carro, além da recarga da bateria pode ser feita utilizando a energia gerada através do aproveitamento do torque disponibilizado pelas rodas do carro.

Os veículos híbridos e elétricos utilizam a bateria elétrica parcialmente ou totalmente como a fonte de energia necessária para o seu funcionamento. O GMR aparece como uma

opção viável integrando o motor de partida e o alternador (FLEURY, 2008), podendo dessa forma realizar a recarga das baterias utilizadas no sistema híbrido ou totalmente elétrico.

O GMR aparece como uma opção viável devido suas qualidades, onde neste caso se torna interessante pelo bom desempenho com velocidades variáveis, o leque de velocidades operacionais, e a facilidade de resfriamento.

O controle para este tipo de aplicação e para a aplicação aeronáutica ainda merece uma atenção especial e vem se desenvolvendo (SILVEIRA et al, 2009; INDERKA et al, 2002). O controle é realizado em seu conversor, no sistema de disparo das chaves, pois a alternância de funcionamento como motor e gerador esta ligada justamente no momento em que a chave é disparada.

A questão ambiental também deve ser lembrada quando se fala de veículos híbridos e elétricos, pois pode haver uma redução considerável na queima de combustíveis fósseis, porém o grande aumento no consumo de energia elétrica também deve ser levado em consideração.

Há diversos trabalhos que podem ser verificados sobre esta aplicação, assim como: (FAHIMI, 2001; FAHIMI ET AL, 2004; SCHOFIELD et al, 2009; FAIZ et al, 2005), dentre outros que podem ser encontrados em (FLEURY, 2008). Nestes trabalhos podem ser encontrados resultados experimentais e de modelagem para a MRC funcionando nesta aplicação.

2.5.3 Aplicação em Geração Eólica

O consumo global de energia elétrica cresce e apresenta tendências de um crescimento contínuo e elevado, sendo assim, toda tecnologia disponível para uma geração e distribuição eficiente deve ser utilizada para que o consumidor final tenha uma energia de qualidade e com preço acessível (BLAABJERG et al, 2006; BLAABJERG et al, 2007; FLEURY et al, 2008c).

Com o crescimento acelerado do consumo de energia elétrica, a utilização de outras fontes de energia se faz necessária num futuro próximo, principalmente após a desregulamentação do sistema elétrico e a redução de investimentos em grandes centrais elétricas (BLAABJERG et al, 2006).

Outro ponto bastante em voga que deve ser levado em consideração é a questão ambiental e o desenvolvimento sustentável. As fontes convencionais de energia são consideradas agressivas ao meio ambiente, fator este que vem sendo cada vez mais discutido quando se fala em geração de energia elétrica. Assim, os investimentos para a utilização de fontes renováveis de energia ganham força e crescem a cada dia. Os investimentos focam principalmente a energia eólica e a energia solar, porém nos últimos anos a fonte eólica obteve a maior parte dos investimentos (BLAABJERG et al, 2007).

A utilização das renováveis já é uma realidade. A Europa tem um papel de destaque quando se trata da energia eólica, onde países como Alemanha, Espanha e Dinamarca devem ser lembrados. Os Estados Unidos e países como Portugal, Espanha, Austrália e Japão devem ser destacados pelo uso da energia solar.

Uma das respostas aos investimentos focados na energia eólica pode ser vista na Figura 2.4, onde há um crescimento na potência gerada com o aumento da altura das unidades geradoras. E fica evidenciado também com um desenvolvimento dessas unidades geradoras ocorrendo cada vez de forma mais rápida, considerando os últimos anos. A Figura 2.4 apresenta o desenvolvimento das turbinas eólicas de 1980 a 2003 e foi apresentada por (BLAABJERG et al, 2006). Esta figura apresenta também, que no ano de 2003 já era possível utilizar aerogeradores com capacidade de 5 MW de potência.

Figura 2.4 - Desenvolvimento das turbinas eólicas de 1980 a 2003 (BLAABJERG et al, 2006).

De acordo com a Figura 2.4, pode ser facilmente verificado que o aumento da potência elétrica gerada pelas turbinas eólicas acompanha o desenvolvimento da eletrônica de potência e o desenvolvimento das técnicas de controle empregadas para este tipo de aplicação.

A aplicação em energia eólica exige um tipo de máquina elétrica que tenha uma boa atuação em velocidades variáveis ou que seja adaptada para tal. O desenvolvimento de uma máquina elétrica para esta aplicação é visto com entusiasmo, pois o gerador de indução é hoje em maior parte utilizado, com o uso de escovas e caixas de câmbio para adequação de velocidade.

O GRC se tornou uma máquina promissora para aplicação eólica, pois o fato de ser uma máquina com um bom desempenho em velocidades variáveis, confiável, robusta, além das outras qualidades, se torna cada vez mais competitiva, devido ao fato da máquina de indução hoje utilizada para tal aplicação, necessitar de um conversor eletrônico de potência para seu acionamento e de uma caixa de câmbio para realizar regulagens na velocidade. O GRC tem a necessidade de um conversor eletrônico para seu funcionamento, porém não necessita de caixa de câmbio para regulagens de velocidade, pois o controle da potência gerada e da tensão gerada tem sido aprimorado e o GRC se torna cada vez mais competitivo para esta aplicação. Os parâmetros de controle no GRC aplicado a geração eólica de energia é o início e o fim da excitação e a velocidade (FLEURY, 2008), pois nesta aplicação a máquina

só opera no modo gerador. Em (FLEURY et al, 2008a, 2008c) é apresentada uma superfície de controle levando em consideração a variação da velocidade e a tensão de excitação.

Há um crescente número de trabalhos sendo desenvolvidos para o GRC aplicado na energia eólica. Um exemplo que pode ser citado da aplicação de um Gerador Eólico a Relutância Chaveado (GERC), é a utilização em pequenas comunidades ou comunidades rurais e cargas dispersas, que normalmente são atendidas no Brasil por tensão monofásica bastante oscilante, sendo assim uma energia de baixa qualidade.

Nesta ocasião o GERC pode ser a unidade geradora utilizada para atender tais consumidores, sem preocupações com a necessidade constante de ventos ou sincronismos com a rede elétrica, pois um conversor desenvolvido com exclusividade para o acionamento do GRC, conhecido como Conversor Série (CS) resolve estes problemas (FLEURY, 2008; FLEURY et al, 2008c). O problema da tensão monofásica pode ser resolvido com a utilização de um inversor PWM trifásico.

A Figura 2.5 demonstra o diagrama de blocos que exemplifica como seria o uso de um GERC em pequenas comunidades, comunidades rurais e cargas dispersas.

Figura 2.5 - Diagrama de blocos que exemplifica o uso do GERC.

Em (FLEURY, 2008) o CS foi desenvolvido e pode ser de melhor forma entendido. A utilização do GERC em pequenas comunidades foi resumidamente um exemplo citado neste trabalho e pode ser verificado em (FLEURY et al, 2008c), além destes outros trabalhos

(CHEN, 2008; CARDENAS et al, 2004; CARDENAS et al, 2005; CHANG et al, 2010), onde o GRC trabalha como aerogerador.

Para todas as aplicações aqui apresentadas é possível encontrar em (FLEURY, 2008) um conjunto de trabalhos citados.

2.6 Conclusões

O advento da eletrônica de potência é sem dúvida o que separa o ressurgimento dos estudos a cerca das MRC modernas. Pois as pesquisas sobre este tipo de máquina, ocorridos nos primórdios dos estudos das máquinas elétricas não tiveram êxito devido à ausência da eletrônica de potência.

A eletrônica de potência propicia novos estudos sobre a MRC e a torna competitiva nos dias de hoje para algumas aplicações, com o avanço das pesquisas a respeito desta máquina. As aplicações onde se tem velocidade variável e necessidade de conversores eletrônicos são normalmente onde se concentram os estudos das aplicações atuais das MRC.

A estrutura em dupla saliência com enrolamentos restritos ao estator, além da ausência de ímãs permanentes são os aspectos construtivos responsáveis pelas qualidades e desvantagens da MRC. Desvantagens essas que vem se reduzindo a cada dia com os desenvolvimentos da eletrônica de potência, do micro processamento e do sensoramento.

O desenvolvimento dos estudos a cerca deste tipo de máquina elétrica é interessante, pois com as qualidades aqui apresentadas, no futuro este tipo de máquina poderá ser largamente utilizada para interessantes aplicações que muitas das vezes estão ligadas a questões ambientais.

Os estudos deste trabalho se concentrarão no GRC trifásico 6×4 , que foi neste Capítulo apresentado. A intenção é que os estudos aqui apresentados contribuam para o

desenvolvimento deste tipo de máquina elétrica, pois a construção de um protótipo torna possível futuras investigações.

Capítulo 3

Modelo Matemático

3.1 Introdução

Um modelo matemático é constituído de uma equação ou um conjunto de equações que são utilizadas para descrever o comportamento de um fenómeno.

Um bom modelo matemático deve ser capaz de explicar o fenómeno matematicamente, ou seja, utilizar equações e ferramentas matemáticas para descrever como é o comportamento do fenómeno estudado.

O modelo matemático hoje é utilizado praticamente em todas as áreas científicas, como alguns exemplos pode-se citar: a biologia, a economia, a física, a química e a engenharia.

Na engenharia a utilização de modelos matemáticos é bastante comum, e se torna muitas vezes uma forma de explicar o funcionamento de artefactos desenvolvidos por esta área do conhecimento. A automação e o controle são áreas da engenharia onde a utilização do modelo matemático se torna indispensável, pois é com o modelo matemático do sistema que se deseja automatizar ou controlar que é possível realizar tais ações.

A modelagem matemática é altamente utilizada na engenharia elétrica, sendo utilizada para descrever o funcionamento de seus sistemas. Com o desenvolvimento computacional, hoje podem ser realizadas simulações dentro das mais diversas áreas da engenharia elétrica. Porém para realização de tais simulações o conhecimento e entendimento do modelo matemático se tornam necessário.

A simulação computacional se torna interessante, pois dessa forma pode-se verificar a dinâmica de funcionamento de uma máquina elétrica, por exemplo, antes da construção da mesma.

Esta etapa do trabalho apresentará o modelo matemático do gerador a relutância chaveado, modelo este que será utilizado na simulação apresentada no capítulo seguinte.

3.2 Modelo Matemático

Esta seção do trabalho apresenta a modelagem matemática de um GRC. A estrutura deste modelo matemático foi verificada em (SAWATA, 2001; FLEURY, 2008) e pode ser encontrado nestes trabalhos de forma mais detalhada.

Considerando um GRC rotativo, como foi demonstrado por (2.1), a tensão nos terminais da bobina de uma fase é:

$$v = R \cdot i + \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (3.1)$$

onde:

v – tensão instantânea.

R – resistência ôhmica.

i – corrente instantânea.

λ – fluxo magnético.

t – tempo.

O fluxo magnético se relaciona com a corrente através de:

$$\lambda = L \cdot i \quad (3.2)$$

sendo L a indutância de uma fase.

Utilizando a relação do fluxo magnético com a corrente na equação (3.1) e sabendo que L se altera com a posição angular do rotor (θ), tem-se:

$$v = R \cdot i + L \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + i \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (3.3)$$

Sabendo que a velocidade angular (ω) é a variação da posição angular em relação ao tempo $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)$, a equação (3.3) pode ser escrita como:

$$v = R \cdot i + \frac{\partial i}{\partial t} + i \cdot \omega \cdot \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (3.4)$$

Como já foi evidenciado no Capítulo 2, o terceiro termo do segundo membro da equação (3.4) é a FCEM, que vai ter o sinal positivo ou negativo determinado pela variação da indutância em relação à posição angular do rotor.

A indutância L é definida por:

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad (3.5)$$

onde:

$\mathfrak{R}$ – relutância magnética.

N – número de espiras das bobinas.

A relutância magnética normalmente é citada como equivalente magnético da resistência elétrica e é definida por:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \cdot A} \quad (3.6)$$

sendo:

μ - permeabilidade magnética equivalente (ferro e entreferro).

A – área transversal por onde circula o fluxo.

l – comprimento médio do circuito.

Dessa forma a indutância pode ser escrita por:

$$L = \mu \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l} \quad (3.7)$$

Como pode ser verificado em (3.7) a relutância ($\mathfrak{R}$) é o inverso da indutância (L). É sabido que a indutância está em constante variação na MRC e dessa forma pode-se afirmar que a relutância também se encontra em constante variação, fato este que ocorre devido à estrutura construtiva desta máquina. A origem do nome máquina a relutância variável ou máquina a relutância chaveada se dá simplesmente por essa constante variação na relutância.

A equação da tensão nos terminais da bobina apresentada por (3.1) é feita apenas para uma fase. Generalizando para ordem a se tem:

$$v_a = R_a \cdot i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (3.8)$$

Para esta generalização, tem-se que considerar a indutância própria de cada fase e a indutância mútua, que é a indutância de uma fase em relação à outra. Na Figura 3.1 pode ser verificado que a fase 1 está energizada. A indutância da fase 1 em relação a fase 2 é conhecida como indutância mútua (L_{12}).

Figura 3.1 - Fase 1 e fase 2 do GRC para exemplificar a indutância mútua.

Considerando, as indutâncias próprias, as indutâncias mútuas e que a máquina tenha f fases, o fluxo magnético é definido por:

$$\lambda_a = L_{a1} \cdot i_1 + L_{a2} \cdot i_2 + L_{a3} \cdot i_3 + \dots L_{af} \cdot i_f \quad (3.9)$$

com a variando de 1 a f . Na notação acima L_{aa} representa a indutância própria da fase a , enquanto L_{ab} com $a \neq b$ representa a indutância mútua entre as bobinas da fase a e b .

A equação (3.9) pode ser escrita da seguinte forma para f fases:

$$\lambda_a = L_{aa} \cdot i_a + \sum_{b=1}^f L_{ab} \cdot i_b, a \neq b \quad (3.10)$$

Substituindo (3.10) em (3.8), se tem a equação elétrica de fase na forma:

$$v_a = R_a \cdot i_a + \frac{d \left(L_{aa} \cdot i_a + \sum_{b=1}^f L_{ab} \right)}{dt} \quad (3.11)$$

com $a \neq b$ e f fases.

Expandindo a soma, para f fases, se tem:

$$\begin{aligned} v_1 &= R_1 \cdot i_1 + \frac{dL_{11} \cdot i_1}{dt} + \frac{dL_{12} \cdot i_2}{dt} + \dots + \frac{dL_{1f} \cdot i_f}{dt} \\ v_2 &= R_2 \cdot i_2 + \frac{dL_{22} \cdot i_2}{dt} + \frac{dL_{21} \cdot i_1}{dt} + \dots + \frac{dL_{2f} \cdot i_f}{dt} \\ v_f &= R_f \cdot i_f + \frac{dL_{f1} \cdot i_1}{dt} + \frac{dL_{f2} \cdot i_2}{dt} + \dots + \frac{dL_{ff} \cdot i_f}{dt} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Considerando que a indutância é uma função da posição angular do rotor e realizando a derivada dos produtos, tem-se para f fases:

$$\begin{aligned} v_1 &= R_1 \cdot i_1 + L_{11} \cdot \frac{di_1}{dt} + L_{12} \cdot \frac{di_2}{dt} + \dots + L_{1f} \cdot \frac{di_f}{dt} + i_1 \cdot \frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} + i_2 \cdot \frac{\partial L_{12}}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \dots + i_f \cdot \frac{\partial L_{1f}}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \\ v_2 &= R_2 \cdot i_2 + L_{22} \cdot \frac{di_2}{dt} + L_{21} \cdot \frac{di_1}{dt} + \dots + L_{2f} \cdot \frac{di_f}{dt} + i_2 \cdot \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} + i_1 \cdot \frac{\partial L_{21}}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \dots + i_f \cdot \frac{\partial L_{2f}}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (3.13) \\ v_f &= R_f \cdot i_f + L_{f1} \cdot \frac{di_1}{dt} + L_{f2} \cdot \frac{di_2}{dt} + \dots + L_{ff} \cdot \frac{di_f}{dt} + i_f \cdot \frac{\partial L_{f1}}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} + i_2 \cdot \frac{\partial L_{f2}}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \dots + i_f \cdot \frac{\partial L_{ff}}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \end{aligned}$$

Por definição, como já foi utilizado, $\frac{d\theta}{dt} = \omega$.

As equações apresentadas em (3.13) podem assumir a forma matricial que se segue:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + \omega \cdot \frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} & \omega \cdot \frac{\partial L_{12}}{\partial \theta} & \dots & \omega \cdot \frac{\partial L_{1f}}{\partial \theta} \\ \omega \cdot \frac{\partial L_{21}}{\partial \theta} & R_2 + \omega \cdot \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} & \dots & \omega \cdot \frac{\partial L_{2f}}{\partial \theta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega \cdot \frac{\partial L_{f1}}{\partial \theta} & \omega \cdot \frac{\partial L_{f2}}{\partial \theta} & \dots & R_f + \omega \cdot \frac{\partial L_{ff}}{\partial \theta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1f} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2f} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{f1} & L_{f2} & \dots & L_{ff} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \vdots \\ \dot{i}_f \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

As equações que descrevem o comportamento eletromagnético da máquina são apresentadas em (3.14). Para que o modelo matemático do GRC fique completo é necessária a apresentação das equações que descrevem o comportamento mecânico da máquina.

A dinâmica de funcionamento do GRC se diferencia do MR. O MR possui uma entrada elétrica e uma saída mecânica, enquanto o GRC tem duas entradas, uma elétrica e uma mecânica e uma saída elétrica.

O MR tem como entrada elétrica a alimentação em tensão CC e sua saída mecânica é o torque que ele fornece a uma carga mecânica, através de seu eixo.

O GRC possui como entrada elétrica uma tensão CC que será a excitação dos enrolamentos de cada fase e sua entrada mecânica é o conjugado fornecido por alguma máquina primária ou algo semelhante, como por exemplo, as pás de um aerogerador. Sua

saída elétrica consiste em uma tensão CC oscilante, porém esta oscilação pode ser corrigida com a utilização de capacitores.

O conjugado mecânico aplicado no GRC deve ser capaz de equilibrar o conjugado eletromagnético resistente, o atrito dos mancais do eixo e o vencimento da inércia rotacional, dessa forma a equação para o torque mecânico é:

$$T_m = -T_{emag} + D \cdot \omega + J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.15)$$

onde:

T_m – torque mecânico.

T_{emag} – torque eletromagnético.

D – coeficiente de atrito viscoso.

J – momento de inércia.

O torque eletromagnético é resistente no caso do GRC, pois ele age contra o torque mecânico imposto pelo eixo da máquina primária.

O torque eletromagnético é obtido através da co-energia (W^{co}) que é considerada na Figura 3.2 e apresenta o comportamento da curva de magnetização em uma posição θ . Esta figura considera a saturação do material magnético.

Figura 3.2 - Comportamento da curva de magnetização considerando a saturação magnética.

A Figura 3.3 demonstra o comportamento da curva de magnetização desconsiderando a saturação magnética, pode-se perceber que o comportamento neste caso é linear.

Figura 3.3 - Comportamento da curva de magnetização desconsiderando a saturação magnética.

A consideração da saturação magnética é importante, pois agrega resultados mais fieis ao real no momento de simulação do gerador, sendo assim neste trabalho a saturação magnética foi considerada.

O torque eletromagnético da fase de ordem a é definido por:

$$W_a^{co}(i, \theta) = \int_0^i \lambda(i, \theta) di \quad (3.16)$$

Como a equação (3.16) se aplica para cada fase da máquina, para f fases esta equação é definida por:

$$W^{co} = W_1^{co} + W_2^{co} + \dots + W_f^{co} \quad (3.17)$$

ou pode ser estabelecida, mais formalmente como:

$$W^{co}(i, \theta) = \sum_{b=1}^f W_b^{co}(i, \theta) \quad (3.18)$$

A equação (3.16) para a co-energia para f fases é:

$$W_f^{co}(i, \theta) = \int_0^i L_f i_f di_f \quad (3.19)$$

Da definição de indutância, se tem:

$$L_f = \frac{\lambda_f}{i_f} \quad (3.20)$$

dessa forma, considerando a fase 1 para exemplificar, tem-se:

$$W_1^{co} = \frac{1}{2} \cdot L_1 \cdot i_1^2 \quad (3.21)$$

e para f fases se tem:

$$W_f^{co} = \frac{1}{2} \cdot L_f \cdot i_f^2 \quad (3.22)$$

que pode ser expandida para:

$$W_f^{co} = \frac{1}{2} \cdot L_1 \cdot i_1^2 + \frac{1}{2} \cdot L_2 \cdot i_2^2 + \dots + \frac{1}{2} \cdot L_f \cdot i_f^2 \quad (3.23)$$

De acordo com (FITZGERALD et al, 1990), o conjugado eletromagnético instantâneo é dado por:

$$T_{emag} = \frac{\partial W^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (3.24)$$

que tem a expansão para f fases como:

$$T_{emag} = \frac{\partial W_1^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial W_2^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} + \dots + \frac{\partial W_f^{co}(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (3.25)$$

A junção de (3.23) com (3.24), permite dizer que o conjugado eletromagnético considerando f fases é:

$$T_{emag} = \frac{1}{2} \cdot i_1^2 \cdot \frac{\partial L_1}{\partial \theta} + \frac{1}{2} \cdot i_2^2 \cdot \frac{\partial L_2}{\partial \theta} + \dots + \frac{1}{2} \cdot i_f^2 \cdot \frac{\partial L_f}{\partial \theta} \quad (3.26)$$

Assim a equação (3.15) que determina o torque mecânico, pode ser escrita:

$$T_m = - \left(\frac{1}{2} \cdot i_1^2 \cdot \frac{\partial L_1}{\partial \theta} + \frac{1}{2} \cdot i_2^2 \cdot \frac{\partial L_2}{\partial \theta} + \dots + \frac{1}{2} \cdot i_f^2 \cdot \frac{\partial L_f}{\partial \theta} \right) + D \cdot \omega + J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.27)$$

As equações de estado que determinam o funcionamento da máquina podem ser agora estabelecidas. Com o comportamento eletromagnético e o comportamento mecânico definidos o modelo matemático agora se torna completo e é aqui apresentado:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_f \\ T_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & \omega \cdot \frac{\partial L_{12}}{\partial \theta} & \dots & \omega \cdot \frac{\partial L_{1f}}{\partial \theta} & 0 & 0 \\ \omega \cdot \frac{\partial L_{21}}{\partial \theta} & R_2 & \dots & \omega \cdot \frac{\partial L_{2f}}{\partial \theta} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega \cdot \frac{\partial L_{f1}}{\partial \theta} & \omega \cdot \frac{\partial L_{f2}}{\partial \theta} & \dots & R_f & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} \cdot i_1 \cdot \frac{\partial L_1}{\partial \theta} & -\frac{1}{2} \cdot i_2 \cdot \frac{\partial L_2}{\partial \theta} & \dots & -\frac{1}{2} \cdot i_f \cdot \frac{\partial L_f}{\partial \theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_f \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1f} & 0 & i_1 \cdot \frac{\partial L_{11}}{\partial \theta} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2f} & 0 & i_2 \cdot \frac{\partial L_{22}}{\partial \theta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{f1} & L_{f2} & \dots & L_{ff} & 0 & i_f \cdot \frac{\partial L_{ff}}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & \dots & J & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \vdots \\ \dot{i}_f \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

A equação matricial (3.28) determina o comportamento funcional do GRC considerando todas as indutâncias, tanto a própria quanto a mútua.

As indutâncias mútuas entre fases são desconsideradas na modelagem matemática do GRC, por possuírem valores muito baixos, devido ao fato do enrolamento estar situado nos pólos do estator de cada fase e cada fase ser excitada no seu tempo e independente das demais. Sendo assim de acordo com (DE PAULA et al, 2003; HWANG, 2002; FLEURY, 2008) as indutâncias mútuas podem ser desconsideradas na modelagem matemática, na simulação computacional e no projeto da máquina.

Desconsiderando as indutâncias mútuas, a equação (3.28) fica bastante simplificada e a solução deste tipo de sistema também se torna facilitado. A solução deste sistema pode ser feita utilizando métodos numéricos computacionais iterativos.

Considerando a indutância mútua nula, a equação (3.28) é reescrita como:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_f \\ T_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R_f & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} \cdot i_1 \cdot \frac{\partial L_1}{\partial \theta} & -\frac{1}{2} \cdot i_2 \cdot \frac{\partial L_2}{\partial \theta} & \dots & -\frac{1}{2} \cdot i_f \cdot \frac{\partial L_f}{\partial \theta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_f \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & i_1 \cdot \frac{\partial L_1}{\partial \theta} \\ 0 & L_2 & \dots & 0 & 0 & i_2 \cdot \frac{\partial L_2}{\partial \theta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & L_f & 0 & i_f \cdot \frac{\partial L_f}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \vdots \\ \dot{i}_f \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Comparando as equações (3.28) e (3.29) pode-se perceber que ocorre realmente uma simplificação de uma em relação à outra, devido à desconsideração das indutâncias mútuas.

O modelo matemático para um GRC trifásico pode ser verificado:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ T_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 \\ -i_1 \cdot s_1 & -i_2 \cdot s_2 & -i_3 \cdot s_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 & 0 & i_1 \cdot \frac{\partial L_1}{\partial \theta} \\ 0 & L_2 & 0 & 0 & i_2 \cdot \frac{\partial L_2}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & L_3 & 0 & i_3 \cdot \frac{\partial L_3}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dot{i}_3 \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

onde:

$$s_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial L_1}{\partial \theta}, s_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial L_2}{\partial \theta}, s_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial L_3}{\partial \theta} \quad (3.31)$$

Para exemplificar a variação de indutância ocorrida em s_1 , s_2 e s_3 , pode-se verificar a Figura 3.4, que demonstra um perfil de indutância trapezoidal.

Figura 3.4 - Perfil trapezoidal de indutância. Demonstração da variação em relação à posição do rotor.

Verificando a Figura 3.4 fica evidenciado que a variação da indutância em relação à posição do rotor para o funcionamento como gerador, é:

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = \frac{L_{\min} - L_{\max}}{\theta_5 - \theta_4} < 0 \quad (3.32)$$

e dessa forma, s_1 , s_2 e s_3 podem ser reescritos como:

$$s_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\min} - L_{\max}}{\theta_5 - \theta_4}, s_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\min} - L_{\max}}{\theta_5 - \theta_4}, s_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\min} - L_{\max}}{\theta_5 - \theta_4} \quad (3.33)$$

De acordo com a equação (3.32) a variação da indutância em relação à posição do rotor $\left(\frac{\partial L}{\partial \theta}\right)$ tem sinal negativo, sendo assim o conjugado eletromagnético (T_{emag}) terá sinal positivo sendo um conjugado contrário ao conjugado mecânico aplicado ao GRC. Dessa forma fica evidenciado como se dá o funcionamento do GRC.

O perfil trapezoidal apresentado na Figura 3.4 pode ser utilizado para realização de simulações computacionais, para obtenção de resultados que descrevem o comportamento do GRC. Porém o perfil de indutância apresentado experimentalmente segue uma curva e não uma reta, como o perfil trapezoidal. Dessa forma para valorizar os resultados simulados e para que estes resultados se aproximem dos resultados experimentais, o perfil de indutância utilizado foi o real do protótipo construído e pode ser verificado na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Perfil real de indutância do protótipo construído.

O perfil de indutância apresentado na Figura 3.5 é um perfil real apresentado pelo protótipo construído, a obtenção desse perfil foi possível através de um teste com rotor bloqueado.

Dessa forma, pode-se realizar uma aproximação senoidal para com os valores de máxima e mínima indutância para facilitar o equacionamento do GRC trifásico 6 x 4:

$$L_1 = m + n \cdot \cos(4 \cdot \theta) \quad (3.34)$$

$$L_2 = m + n \cdot \cos(4 \cdot \theta - 60^\circ) \quad (3.35)$$

$$L_3 = m + n \cdot \cos(4 \cdot \theta + 60^\circ) \quad (3.36)$$

onde m e n são constantes calculadas a partir dos valores de máxima e mínima indutância:

$$m = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2} \quad (3.37)$$

$$n = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2} \quad (3.38)$$

De acordo com as equações (3.34), (3.35) e (3.36), as variações das indutâncias em relação à posição do rotor pode ser definida como:

$$\frac{dL_1(\theta)}{d\theta} = -4 \cdot n \cdot \sin(4\theta) \quad (3.39)$$

$$\frac{dL_2(\theta)}{d\theta} = -4 \cdot n \cdot \sin(4 \cdot (\theta - 60^\circ)) \quad (3.40)$$

$$\frac{dL_3(\theta)}{d\theta} = -4 \cdot n \cdot \sin(4 \cdot (\theta + 60^\circ)) \quad (3.41)$$

Com a variação das indutâncias definidas, pode-se determinar agora que o conjugado eletromagnético (T_{emag}) definido na equação (3.26), para um GRC trifásico usando um perfil senoidal de indutância pode ser escrito como:

$$T_{emag} = -2 \cdot n \cdot i_1^2 \cdot \sin(4 \cdot \theta) - 2 \cdot n \cdot i_2^2 \cdot \sin(4 \cdot (\theta - 60^\circ)) - 2 \cdot n \cdot i_3^2 \cdot \sin(4 \cdot (\theta + 60^\circ)) \quad (3.42)$$

Com o conjugado eletromagnético definido, considerando o perfil senoidal de indutância, o conjugado mecânico para um GRC trifásico, pode ser escrito como:

$$T_m = -\left(-2 \cdot n \cdot i_1^2 \cdot \sin(4 \cdot \theta) - 2 \cdot n \cdot i_2^2 \cdot \sin(4 \cdot (\sin - 60^\circ)) - 2 \cdot n \cdot i_3^2 \cdot \sin(4 \cdot (\sin + 60^\circ))\right) + D \cdot \omega + J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.43)$$

Com a modificação no perfil de indutância, uma nova equação matricial pode ser definida para definição das equações de estados do GRC trifásico:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ T_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 \\ -i_1 \cdot s_1 & -i_2 \cdot s_2 & -i_3 \cdot s_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 & 0 & 2 \cdot i_1 \cdot s_1 \\ 0 & L_2 & 0 & 0 & 2 \cdot i_2 \cdot s_2 \\ 0 & 0 & L_3 & 0 & 2 \cdot i_3 \cdot s_3 \\ 0 & 0 & 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dot{i}_3 \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$s_1 = -2 \cdot n \cdot \sin(4 \cdot \theta), s_2 = -2 \cdot n \cdot \sin(4 \cdot (\theta - 60^\circ)), s_3 = -2 \cdot n \cdot \sin(4 \cdot (\theta + 60^\circ)) \quad (3.45)$$

Fica evidenciado na equação (3.44) que aqui também a indutância mútua é desconsiderada.

As equações matriciais (3.30) e (3.44) podem assumir a forma:

$$[v] = [R] \cdot [i] + [L] \cdot \dot{[i]} \quad (3.46)$$

Da equação (3.46) podem-se determinar as equações de estados do GRC trifásico isolando $\dot{[i]}$, tendo assim:

$$\dot{[i]} = [v] \cdot [L]^{-1} - [R] \cdot [i] \cdot [L]^{-1} \quad (3.47)$$

A equação (3.47) é capaz de descrever o comportamento de cada fase do GRC e pode-se observar que se trata de equações diferenciais onde para cada valor de entrada $[v]$ se tem um valor de saída $[i]$, a solução para este tipo de equação pode ser encontrada através de métodos numéricos de integração tal como Runge-Kutta. Fica evidenciado também que as matrizes $[R]$ e $[L]$ vão depender dos parâmetros construtivos da máquina.

Dessa forma a utilização das equações (3.30) e (3.44) para compreensão do funcionamento do GRC e para realização de simulações computacionais se dá de forma satisfatória.

3.3 Conclusão

O modelo matemático apresentado nesta etapa do trabalho consiste em um modelo que considera a saturação magnética. Consideração esta que pode gerar melhores resultados simulados no que diz respeito à energia gerada.

Para que a saturação magnética possa ser considerada são necessários resultados experimentais. Com estes resultados a curva de indutância real do GRC pode ser obtida com uma interpolação polinomial, este perfil de indutância foi apresentado na Figura 3.5.

A simulação do GRC pode ser realizada utilizando perfil de indutância triangular e trapezoidal, porém os resultados perdem em qualidade, pois o perfil real da máquina a relutância não é linear, dessa forma a equação (3.44) deve ser utilizada para que os resultados simulados fiquem próximos ao resultado experimental, neste trabalho foi utilizado o perfil real de indutância do protótipo construído para obtenção dos resultados simulados.

O conhecimento do modelo matemático se torna um interessante aliado para o entendimento do funcionamento e do comportamento elétrico e mecânico no estudo de máquinas elétricas. Este conhecimento também faz com que a simulação computacional possa ser realizada de forma satisfatória, demonstrando o comportamento funcional da máquina. Fica assim evidenciada a importância que o modelo matemático tem no estudo de máquinas elétricas.

Capítulo 4

Simulação Computacional

4.1 Introdução

A simulação computacional é uma ferramenta utilizada há bastante tempo por diversas áreas do conhecimento. Os avanços das ferramentas matemáticas e computacionais propiciaram um grande aumento no uso das simulações.

O desenvolvimento dos processadores e dos recursos computacionais fez com que novos softwares pudessem ser desenvolvidos exclusivamente para realização de simulações.

Cada área se adaptou como pôde até que pudesse contar com um software desenvolvido para as simulações aplicadas a seus problemas. Pois pode-se encontrar simulações de MR realizadas no programa Spice, programa este que foi desenvolvido especialmente para circuitos eletrônicos (FLEURY, 2008). Podem ser encontradas várias simulações de diversos tipos de máquinas elétricas utilizando a linguagem C, que não foi desenvolvida com este objetivo.

Na engenharia hoje a simulação computacional é altamente utilizada. Com resultados simulados é possível verificar a viabilidade de projetos ou melhoria dos mesmos, pode-se ter redução de custos, podem-se comparar resultados experimentais com os resultados simulados, e assim se certificar que o projeto realmente atendeu as expectativas obtidas com a simulação.

A simulação computacional de máquinas elétricas pode ser feita utilizando diversos softwares, cabendo ao usuário esta escolha. O modelo matemático da máquina a ser simulada é indispensável e é bom que o programa a ser utilizado tenha um bom desempenho na resolução de equações diferenciais através de métodos iterativos.

Esta etapa do trabalho é responsável por apresentar a simulação de um GRC utilizando o modelo matemático apresentado no Capítulo anterior, e como esta simulação foi desenvolvida. É apresentado também o conversor que será utilizado na simulação e como é seu funcionamento, além de todas as considerações feitas para realização da simulação.

4.2 Considerações Para Realização da Simulação

4.2.1 Perfil de Indutância

A variação da indutância é uma propriedade inerente das MRCs devido a sua estrutura construtiva, sendo assim ao realizar uma simulação computacional deste tipo de máquina é fundamental estabelecer qual será o comportamento da curva de indutância que será utilizada.

Como foi demonstrada no modelo matemático na equação (3.7), a indutância vai ser em função dos parâmetros físicos definidos na construção da máquina. A curva de indutância depende destes parâmetros e da largura dos pólos do estator e do rotor. A Figura 4.1 demonstra estas larguras, onde $l_{p_{es}}$ é a largura do pólo do estator e $l_{p_{ro}}$ é a largura do pólo do rotor.

Figura 4.1 - Demonstração das larguras dos pólos do estator e rotor.

Com $l_{pes} \neq l_{pro}$ a indutância tem um comportamento trapezoidal como pode ser verificado na Figura 4.2. A figura demonstra também os momentos de indutância mínima (L_{min}) e de indutância máxima (L_{max}). Neste caso onde a largura dos pólos do estator são maiores que a largura dos pólos do rotor (podendo ocorrer o inverso também) a posição entre θ_2 e θ_3 evidencia que a indutância máxima é mantida por um instante, antes de iniciar seu decréscimo, este intervalo é conhecido como zona morta (TEIXEIRA, 2008).

Figura 4.2 - Perfil de indutância trapezoidal, presença de zona morta.

Na Figura 4.2 pode-se ver como caráter demonstrativo o posicionamento relativo do estator, do rotor e o comportamento da curva de indutância com o movimento do rotor, análise esta feita em uma das fases. De 0 a θ_1 , o pólo do estator e o pólo do rotor estão desalinhados e a indutância é mínima, fato este que ocorre também entre θ_4 e θ_5 . Em θ_1 é

iniciado o alinhamento do dente do estator com o dente do rotor. De θ_1 a θ_2 há um crescimento no valor da indutância, onde a variação da indutância em relação à posição do rotor tem sinal positivo, sendo a região onde o conversor deve ser acionado para o funcionamento da máquina como MR. Em θ_3 , tem início o desalinhamento entre o dente do estator e o dente do rotor, sendo este o momento onde teoricamente ocorre o acionamento do conversor para que a MRC opere como GRC, pois de θ_3 a θ_4 há o decréscimo na variação da indutância com relação à posição.

Quando a largura dos pólos do estator é igual a largura dos pólos do rotor ($l_{pes} = l_{pro}$), o comportamento da indutância é diferente do mostrado na Figura 4.2 e pode ser verificado na Figura 4.3, onde fica demonstrado que a indutância neste caso decresce após o alinhamento, não tendo a região conhecida como zona morta.

Figura 4.3 - Perfil de indutância triangular.

O perfil de indutância mostrado na Figura 4.3 é conhecido como perfil triangular de indutância, e a posição do estator e do rotor é novamente apresentada como caráter demonstrativo, além do comportamento da curva de indutância em relação ao movimento do rotor, analisando somente uma fase. Na Figura 4.3, quando $0 \leq \theta \leq \theta_1$ e $\theta_3 \leq \theta \leq \theta_4$ o pólo do estator se encontra em total desalinhamento com o pólo do rotor, e a indutância tem seu valor

mínimo. Em θ_1 se dá início o alinhamento do dente do estator com o dente do rotor. Entre θ_1 e θ_2 ocorre a variação positiva da indutância em relação à posição. Em θ_2 se dá início o desalinhamento do dente do estator com o dente do rotor. De θ_2 a θ_3 a variação da indutância em relação à posição tem sinal negativo.

A simulação apresentada neste capítulo utiliza o perfil de indutância coletado utilizando o protótipo desenvolvido e proposto por este trabalho.

Um teste com rotor bloqueado foi realizado no protótipo construído para obtenção do perfil e da superfície de indutância.

O teste com rotor bloqueado consistiu em escolher uma das fases aleatoriamente e utilizar uma fonte CC para alinhar os pólos do estator e rotor desta fase, o rotor do GRC foi bloqueado e este momento foi considerado a posição de 0° , sendo este o momento de máxima indutância. A partir da posição de 0° , o rotor foi sendo bloqueado novamente a cada 2° , onde cada vez que ele era bloqueado se utilizava uma fonte variável CA 60 Hz para excitar o enrolamento, variando-se a corrente de 0,5 a 12 A, com incremento de 0,5 A, dessa forma até que fosse possível conhecer a curva de indutância que possui um período de 90° . Um voltímetro e um amperímetro foram utilizados para coleta dos dados que resultou em um banco de dados que possibilitou ilustrar o perfil e superfície de indutância do protótipo. A Figura 4.4 apresenta o esquema elétrico que foi utilizado para obter o banco de dados com o experimento de rotor bloqueado, a fase 1 foi escolhida apenas como caráter ilustrativo, nesta figura, V representa o voltímetro e A representa o amperímetro.

Figura 4.4 - Esquema elétrico para coleta do perfil e da superfície de indutância.

Utilizando o banco de dados obtido com o experimento de rotor bloqueado a indutância pode ser calculada utilizando:

$$L = \left[(v/i)^2 - R^2 \right]^{1/2} \times (2 \cdot \pi \cdot f)^{-1} \quad (4.1)$$

onde v é a tensão aferida pelo voltímetro apresentado pela Figura 4.4, i é a corrente aferida pelo amperímetro apresentado pela Figura 4.4, R é a resistência elétrica dos enrolamentos da fase e f é a frequência em Hertz da tensão CA.

O comportamento do perfil de indutância em relação à posição do rotor e corrente apresentado pelo protótipo 6×4 proposto neste trabalho é ilustrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Comportamento da indutância em função da posição do rotor e da corrente.

Para realização da simulação do protótipo GRC construído foi utilizada uma superfície de indutância que foi traçada com o banco de dados do experimento de rotor bloqueado e com a utilização de um software que fez a interpolação desta superfície. A superfície usada na simulação pode ser verificada na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Superfície de indutância utilizada na simulação.

Os perfis de indutância apresentados na Figura 4.2 e na Figura 4.3 podem ser utilizados para realizar a simulação do GRC, mas o perfil de indutância utilizado foi o experimentalmente obtido, para que o resultado simulado seja o mais fiel possível ao protótipo projetado, considerando assim a saturação magnética.

A estrutura construtiva da MRC faz com que a indutância esteja constantemente variando. A constante variação da indutância esta intimamente ligada ao torque pulsante produzido por esta máquina como pode ser verifica em (LEE, 2010).

Devido a essa variação constante a forma de acionamento das chaves do conversor é um fator extremamente importante.

4.2.2 O Conversor Utilizado

A necessidade de um conversor eletrônico para acionamento da MRC já está evidenciada durante todo o trabalho. O conversor utilizado tanto na simulação quanto nos resultados experimentais está aqui apresentado.

O conversor utilizado no acionamento do GRC consiste em um conversor CC-CC, cujo objetivo é determinar, verificando o perfil de indutância do GRC, em qual momento cada fase deve ser alimentada.

O histórico dos estudos a cerca dos conversores utilizados para acionamento da MRC, aponta o conversor *Half-Bridge* (HB), como um dos mais utilizados neste tipo de máquina elétrica. Na verdade a sua utilização no GRC foi uma herança do MR, pois o conversor HB é largamente utilizado no acionamento do MR.

O conversor HB é constituído de duas chaves e dois diodos como pode ser verificado na Figura 4.7, que demonstra o circuito para uma fase de uma MRC. Seu funcionamento no MR é satisfatório, pois o mesmo permite o funcionamento em quatro etapas, sendo: a excitação, roda livre conhecida também como *freewheeling*, regeneração e desativação (FLEURY, 2008). Esse bom funcionamento no caso do MR, fez com que o acionamento dos

GRC se baseasse inicialmente também no conversor HB, pois os estudos a cerca do GRC e seu acionamento se deu de forma mais recente.

Figura 4.7 - Esquema elétrico do conversor *Half-Bridge* para o GRC.

Com o desenvolvimento dos estudos do GRC e seu acionamento, outros conversores foram desenvolvidos na tentativa de economia de componentes eletrônicos e principalmente tendo a preocupação com o rendimento do GRC.

Podem ser citados como exemplos dois conversores desenvolvidos para o acionamento do GRC, que são apresentados em (FLEURY, 2008). O Conversor Série (CS) e o Conversor Sequencial surgem como opção e se adaptam muito bem a algumas aplicações onde o GRC pode ser considerado forte candidato.

O CS, por exemplo, pode ser utilizado no Gerador Eólico a Relutância Chaveado como forma de evitar problemas de sincronismo com a rede elétrica, pois esta seria a excitação do gerador (FLEURY et al, 2008c). Pode evitar também que na falta de ventos o consumidor fique sem energia, podendo assim ser abastecido diretamente pela rede elétrica da concessionária de energia, além de ter um menor custo com componentes eletrônicos, pois possui apenas uma chave e um diodo por fase como pode ser verificado na Figura 4.8, também tem um melhor rendimento quando comparado com o conversor HB que pode ser

verificado em (FLEURY, 2008; FLEURY et al, 2008b; FLEURY et al, 2008d), estes trabalhos apresentam a comparação de rendimento entre os conversores HB, CS e o conversor sequencial.

Figura 4.8 - Esquema elétrico do conversor série.

Devido o melhor rendimento do conversor CS e da economia proporcionada pelo número reduzido de componentes eletrônicos, este conversor foi o selecionada para aplicação neste trabalho.

O GRC trifásico 6×4 aqui estudado tem o acionamento de suas fases realizado de forma sequencial e cada fase é acionada no seu tempo. Normalmente é utilizado um sensor de posição que é acoplado ao eixo da máquina. Sensor esse que vai determinar o momento de acionamento das chaves eletrônicas do conversor. A necessidade deste sensor é uma desvantagem da MRC, porém já é possível encontrar trabalhos que buscam outra forma para determinar o acionamento das chaves do conversor, por exemplo, utilizando técnicas neuro-fuzzy, como pode ser verificado em (BORGES, 2002; HENRIQUES, 2004).

O funcionamento do conversor CS atuando no GRC pode ser de melhor forma entendido separando as etapas de excitação e de entrega da potência gerada à carga. A Figura 4.9 demonstra o circuito elétrico ativo no momento em que ocorre a excitação da fase 1 de um GRC 6×4 , esta etapa nas outras fases ocorre da mesma forma.

Figura 4.9 - Circuito elétrico ativo no momento de excitação da fase 1.

O circuito elétrico onde a potência gerada é entregue a carga pode ser verificado na Figura 4.10, novamente para exemplificar a fase 1 foi utilizada.

Figura 4.10 - Circuito elétrico ativo durante a entrega da potência gerada à carga.

Analisando a Figura 4.9 e a Figura 4.10 fica demonstrado o funcionamento do conversor CS. A Figura 4.9 apresentou o período de excitação da máquina, onde neste momento a chave controlada está acionada e o diodo não conduz. A Figura 4.10 demonstra

como a energia gerada é entregue à carga, neste momento a chave controlada não está acionada e o diodo está conduzindo.

Analisando a Figura 4.10 pode-se verificar que a fonte CC, que nesta figura simula a excitação das bobinas, esta presente tanto no momento de excitação quanto no momento em que a tensão gerada é entregue a carga, estando em serie com a bobina neste momento, este é o motivo do nome conversor série.

A dinâmica de funcionamento do conversor CS que é o utilizado nas simulações computacionais do GRC, foi nesta etapa apresentada.

4.2.3 Matlab/Simulink

Como foi mencionado no início deste Capítulo, o software utilizado na simulação computacional é uma escolha feita pelo usuário. Neste trabalho o Matlab foi a ferramenta escolhida para realização da simulação.

A escolha do software Matlab se deve a sua facilidade de manuseio. Agregando a essa facilidade a possibilidade de resolução de problemas iterativos e a disponibilidade de ferramentas voltadas para resolução de equações diferenciais fez com que esse software fosse o escolhido para realização da simulação.

O modelo matemático apresentou uma equação de estados com equações diferenciais a serem resolvidas, que em suas soluções apresentam uma iteratividade. O método Runge-Kutta é o método empregado para resolução ou aproximação numérica de equações diferenciais ordinárias, utilizando métodos iterativos.

Na simulação realizada foi utilizado o método numérico Runge-Kutta, disponibilizado pelo Matlab como ode45 para solução da equação de estados, utilizando métodos iterativos.

A ferramenta Simulink disponível no Matlab é amplamente utilizada para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. A escolha dessa ferramenta se dá pela facilidade

de programação, pois possibilita a simulação de máquinas elétricas de forma simplificada, onde a programação é feita por blocos e pode ser facilmente aprendida.

O Simulink disponibiliza bibliotecas para resolução de diversos tipos de problemas da engenharia. Neste caso, *SimPowerSystems* foi a biblioteca utilizada para simular o conversor CS, pois esta biblioteca tem os componentes eletrônicos necessários para simulação do conversor.

Outra disponibilidade do Simulink é o bloco S-Function, que neste caso foi utilizado para determinar a janela de condução das chaves utilizadas no conversor, através de linhas de código.

O software Matlab é uma ferramenta poderosa para resolução dos mais diversos problemas encontrados na Engenharia Elétrica, e como o mesmo foi utilizado para a simulação do GRC é neste capítulo apresentada.

4.3 Simulação

A simulação computacional de um GRC no domínio do tempo com um modelo matemático que considera a saturação magnética foi feita utilizando o software Matlab, onde a ferramenta utilizada na simulação foi o Simulink (*Simulation and Model-Based Design*).

O primeiro passo para realizar a simulação foi o conhecimento do modelo matemático do GRC. A equação matricial (3.44) foi a utilizada para a simulação realizada.

Com a utilização da biblioteca do Simulink *SimPowerSystems*, o conversor CS foi simulado e pode ser verificado na Figura 4.11. Esta figura demonstra apenas os componentes eletrônicos, onde:

Ch – são as chaves controladas, que neste caso são MOSFETs com resistência interna de $0,18 \, \Omega$. Este valor de resistência é o apresentado pelo *datasheet* do MOSFET utilizado no experimento prático.

D – são os diodos de potência, com resistência interna de $11\text{ m}\Omega$, sendo este valor de resistência apresentado no *datasheet* do diodo usado no experimento prático.

FC – são as fontes de corrente que foram utilizadas para simular os enrolamentos das fases.

RC – é a carga elétrica, onde R é a resistência elétrica com $11,1\ \Omega$ e C é o capacitor com capacitância de 6 mF . Sendo estes valores os utilizados nos testes experimentais.

Figura 4.11 - Simulação computacional do conversor serie.

A utilização de um capacitor em paralelo com a resistência elétrica é especificado para que o nível de oscilação da tensão possa ser reduzido, diminuindo assim o *ripple* de tensão entregue a carga.

A Figura 4.12 demonstra como é o esquema computacional do conversor CS. Comparando a Figura 4.12 com a Figura 4.11, pode-se verificar que além dos componentes eletrônicos se tem agora os pulsos (P1, P2 e P3) dos *gates* das chaves, os equipamentos de medida de tensão e corrente (voltímetros e amperímetros) e a corrente que vai ser utilizada pela fonte de corrente que simula as bobinas de cada fase.

Figura 4.12 - Esquema computacional do conversor série.

Os pulsos P1, P2 e P3 são gerados com a utilização do bloco S-Function do Simulink. Dessa forma através de linhas de código, analisando o momento em que cada fase deve ser acionada os pulsos foram gerados. A Figura 4.13 demonstra o bloco S-Function onde foram feitas as linhas de código que podem ser verificadas no Apêndice A deste trabalho.

A entrada teta do bloco S-Function demonstrado na Figura 4.13 simboliza o valor de θ que é calculado a partir da velocidade angular da máquina, pois como é sabido $\omega = \frac{d\theta}{dt}$. O valor de θ é essencial para se obter os pulsos que vão acionar as chaves do conversor.

Figura 4.13 - Bloco S-Function.

A Figura 4.13 apresenta também [tetal1], [tetal2] e [tetal3], que são utilizados para determinar o período da indutância em cada uma das fases. Em cada fase o período é o mesmo de 90° , porém há uma defasagem de 30° graus de uma em relação à outra.

A Figura 4.14 apresenta o perfil de indutância utilizado em cada uma das fases na simulação e a defasagem de 30° de um perfil para outro.

Figura 4.14 - Perfil de indutância das três fases.

Para uma melhor visualização do perfil de indutância utilizado na simulação, a Figura 4.15 apresenta o perfil de apenas uma fase.

Figura 4.15 – Perfil de indutância utilizado na simulação, apenas uma fase .

Utilizando a mesma fase apresentada na Figura 4.15, a Figura 4.16 demonstra o pulso gerado para realizar o acionamento desta fase.

Figura 4.16 - Indutância e janela de condução da chave do conversor.

Na Figura 4.16 o pulso que é a janela de condução da chave do conversor teve seus valores ajustados para uma melhor visualização, pois seu valor mínimo é zero e o valor máximo é um. A chave eletrônica conduz no momento em que o pulso estiver em seu valor

máximo. O pulso para acionamento da chave do conversor é realizado no momento em que a variação da indutância se dá de forma negativa, justamente no momento em que a máquina opera como gerador.

Analisando a Figura 4.16 fica perceptível também que a janela de condução da chave eletrônica não tem seu início no momento em que a indutância é máxima. Em (FLEURY, 2008) o pulso da chave eletrônica do conversor também não foi realizado no momento de máxima indutância, sendo assim uma investigação foi realizada no protótipo proposto neste trabalho para conhecer em qual momento cada fase deve ser acionada para um melhor rendimento. A janela de condução para os testes apresentados se inicia 5° antes do valor máximo de indutância, pois dessa forma este protótipo tem um melhor rendimento.

Cada fase é excitada durante 30° e permanece sem excitação durante 60° , então cada fase tem sua janela de condução no valor máximo durante 30° e o valor mínimo é permanecido durante 60° . Na Figura 4.17 é possível verificar o perfil de indutância de cada fase e sua respectiva janela de condução, sendo que os valores do pulso foram modificados para uma melhor visualização.

Figura 4.17 - Indutância e janela de condução das três fases.

Como agora o perfil de indutância e os pulsos para o acionamento das chaves do conversor para cada fase são conhecidos, utilizando a programação por blocos disponibilizada pelo Simulink a equação matricial apresentada em (3.44) é resolvida. Para demonstrar como é feita a simulação do GRC pode-se verificar a Figura 4.18, que demonstra a programação feita no Simulink para desenvolver as equações de estado da máquina.

Figura 4.18 - Bloco Simulink responsável pela resolução da equação de estados.

O bloco GRC apresentado pela Figura 4.18 é o bloco principal para o desenvolvimento da equação de estados do GRC. Pode-se observar que os dados de entrada são: as tensões de cada fase e uma velocidade constante de $120,41 \frac{rd}{s}$. Os dados de saída são: as correntes de cada fase, o torque mecânico da máquina e o valor da posição angular (θ).

Fica evidenciado, observando os dados de entrada e de saída utilizados no bloco GRC da Figura 4.18, que a resolução da equação de estados é totalmente iterativa, pois os valores de tensão são obtidos com uma medição realizada na fonte de corrente que vai simular o enrolamento da máquina. Os valores de corrente utilizados por esta fonte de corrente são os valores calculado pelo bloco GRC. A medida dos valores de tensão e os cálculos dos valores de corrente são realizados a todo tempo durante a simulação, evidenciando assim a iteratividade do processo de resolução da equação matricial.

Na Figura 4.18 o bloco GRC é usado para representar o gerador, o desenvolvimento que ocorre neste bloco pode ser verificado na Figura 4.19.

Figura 4.19 - Desenvolvimento que ocorre no bloco GRC.

Para um melhor entendimento da Figura 4.19, a fase 1 é selecionada para exemplificar como se obtém o valor de corrente, utilizado pela fonte de corrente que simula o enrolamento da máquina. Na Figura 4.20 pode-se verificar como é obtido o valor de corrente da fase 1. Nas outras fases o processo é o mesmo.

Figura 4.20 - Cálculo do valor da corrente 1.

Na Figura 4.20, v_1 representa a tensão medida no enrolamento, R_1 é a resistência elétrica do enrolamento. O bloco Superfície L representa a superfície de indutância apresentada na Figura 4.6, todo momento da simulação o valor da indutância é obtido através

da corrente i_1 e de t_{etal1} , da mesma forma ocorre com o bloco DL/Dt_{eta} que é o bloco que representa a derivada da indutância. A Figura 4.21 apresenta a superfície da derivada da indutância. Na Figura 4.6 os valores da indutância (L), e na Figura 4.21 os valores da variação da indutância (dL), são obtidos através de uma Lookup Table.

Figura 4.21 - Superfície da derivada da indutância.

O bloco T_m é também apresentado pela Figura 4.19. Este bloco representa o torque mecânico da máquina, processo este que pode ser mais bem entendido analisando a Figura 4.22.

Figura 4.22 - Cálculo do torque mecânico.

Analizando a Figura 4.22 fica evidenciado que a simulação computacional é o desenvolvimento das equações de estado apresentadas no capítulo anterior, pois a equação apresentada para calcular o torque mecânico demonstrada em (3.15), é o que representa a Figura 4.22. Nesta simulação a velocidade foi considerada constante.

Como a simulação computacional do GRC trifásico deve ser realizada, e os passos para o entendimento de como foi feita esta simulação, foram apresentados nesta etapa do trabalho.

4.4 Resultados Simulados

4.4.1 Introdução

Utilizando a simulação que foi apresentada no Capítulo 4, foi possível avaliar o comportamento do GRC através das curvas de tensão e corrente, que podem ser obtidas na excitação, no enrolamento das fases e na carga elétrica que o GRC alimenta. Além disso foi verificado o comportamento dos torques mecânico e eletromagnético e as potências de excitação, total de entrada e gerada.

Além dos resultados demonstrarem o comportamento do GRC, pode-se verificar se a simulação computacional realizada apresenta resultados coerentes, pois as curvas de tensão e corrente devem seguir o padrão apresentado por outros trabalhos que demonstram o comportamento do GRC.

Na literatura é possível encontrar muitos trabalhos que apresentam o comportamento do GRC (FLEURY, 2008; HENRIQUES, 2004; CARDENAS et al, 2004), podem-se assim certificar que os resultados aqui apresentados são coerentes e realmente demonstram o comportamento de um GRC trifásico 6×4 .

4.4.2 Resultados Simulados

Os resultados apresentados são obtidos em uma simulação computacional realizada utilizando o software Matlab. Simulação essa que foi apresentada no Capítulo anterior.

Todos os resultados simulados utilizaram uma velocidade constante de $120,41 \frac{rd}{s}$.

A tensão de excitação foi simulada por uma fonte de tensão CC, com um valor de 35 V.

A corrente de entrada pode ser verificada na Figura 4.23, podendo-se observar um comportamento pulsante no perfil de corrente, devido ao acionamento realizado. O acionamento realizado na configuração trifásica se dá de forma sequencial, e cada fase é excitada ao seu tempo, sendo que os perfis repetitivos da corrente se referem a cada uma das fases.

Figura 4.23 - Corrente na fonte de excitação.

Na Figura 4.24 pode ser verificada a corrente de entrada instantânea, a tensão de excitação e a corrente de excitação média. Nesta figura pode-se observar que o valor da

tensão de excitação é os 35 V aplicados pela fonte CC. A corrente instantânea apresenta valores de pico de aproximadamente 12 A, e a corrente média possui um valor de 10,5 A.

Figura 4.24 - Tensão de excitação e corrente de entrada.

A Figura 4.25 apresenta a corrente de entrada fornecida pela fonte CC e a corrente de excitação das fases do GRC. Como foi explicado no Capítulo anterior o conversor CS participa tanto do momento de excitação quanto do momento de entrega da potência gerada pela fase à carga, devido a isso se pode verificar que a corrente de entrada fornecida pela fonte não é somente a corrente de excitação.

Figura 4.25 - Corrente de entrada e corrente de excitação.

A Figura 4.26 apresenta a corrente de entrada e a corrente de saída do GRC.

Figura 4.26 - Corrente de entrada e corrente de saída.

A Figura 4.27 apresenta a corrente nos enrolamentos de uma das fases. A janela de condução (pulso) das chaves do conversor da mesma fase pode ser verificada também nesta figura. O comportamento da indutância desta mesma fase é também apresentado na Figura 4.27. Os valores de indutância e da janela de condução foram reajustados para uma melhor

visualização, a indutância teve seus valores aumentados em 300 vezes enquanto que o pulso foi aumentando em 10 vezes.

Figura 4.27 - Corrente no enrolamento, janela de condução e indutância.

Observando a Figura 4.27, pode-se perceber que a janela de condução das chaves do conversor, vai se posicionar no momento em que a curva de indutância está na decrescente e tem sua variação com valor negativo, esta figura utiliza apenas uma das fases para exemplificar, mas o comportamento nas outras fases se dá da mesma forma. A corrente possui valor aproximado de 12 A no seu máximo ponto.

A seguir será ilustrado o comportamento da tensão e corrente no enrolamento da máquina. A Figura 4.28 apresenta o comportamento da tensão de excitação, tensão gerada, corrente de excitação e corrente gerada, utilizando apenas uma fase para ilustrar estes comportamentos no enrolamento da máquina.

O comportamento da tensão de excitação apresenta o que ocorre com a tensão no momento em que a chave do conversor CS esta acionada. O acionamento da chave ocorre no momento em que a variação da indutância em relação ao posicionamento do rotor, se dá de forma negativa, ocasionando assim numa FCEM de valor negativo, dessa forma o

comportamento da tensão gerada pode ser verificado na Figura 4.28, quando a tensão se encontra com valores negativos.

Figura 4.28 - Comportamento da tensão e corrente no enrolamento de uma das fases.

A Figura 4.29 apresenta a estrutura de um GRC e cada fase dessa estrutura 6×4 .

Figura 4.29 - Estrutura 6×4 com as fases indicadas.

No funcionamento do GRC trifásico, enquanto uma fase se encontra na etapa de geração, a próxima fase que será acionada já se encontra no momento de excitação. Dessa

forma, enquanto uma fase esta sendo excitada, a fase anteriormente excitada encontra-se no momento de geração.

Lembrando que os pares diametralmente opostos do estator formam uma fase, e considerando que o rotor tem rotação no sentido horário, conhecendo o perfil da corrente nos enrolamentos das fases, pode-se verificar na Figura 4.30, que enquanto a corrente da fase 1 se encontra no momento de geração, a fase 3 já esta acionada e se encontra no momento de excitação. Esta mesma verificação pode ser vista para a fase 2, enquanto a fase 3 esta gerando a fase 2 já esta sendo excitada. E da mesma forma, enquanto a fase 2 esta gerando a fase 1 esta sendo excitada.

Figura 4.30 - Janelas de condução e correntes nos enrolamentos de cada fase.

A Figura 4.31 apresenta a corrente de entrada, a corrente de excitação e a corrente de saída do GRC, pode-se verificar nessa figura novamente que enquanto uma fase esta no momento de geração a fase seguinte acionada já se encontra no momento de excitação. A corrente de entrada vai ser a soma da corrente de excitação com a corrente de saída, pois a fonte CC participa tanto do momento de excitação quanto do momento de geração. Nesta figura se pode observar um destaque no ponto de 0,315 s para as curvas apresentadas, neste

ponto a corrente de excitação é 2,747 A, a corrente de saída é 9,507 A e a corrente de entrada é 12,25 A, que é justamente a soma da corrente de excitação com a corrente de saída.

Figura 4.31 - Corrente de entrada, corrente de excitação e corrente de saída.

A Figura 4.32 apresenta as tensões e correntes nos enrolamentos das três fases, considerando novamente a estrutura apresentada na Figura 4.29 e a rotação do rotor no sentido horário.

Figura 4.32 - Tensões e correntes nos enrolamentos das fases.

Pode-se verificar na Figura 4.32 que há um momento em que não há tensão gerada e isso ocorre devido à estrutura do gerador a relutância. O momento de não geração da tensão vai ocasionar em uma tensão de saída pulsante que pode ser verificada na Figura 4.33, que também apresenta a corrente de saída do gerador. No caso da simulação realizada, a tensão pulsante é filtrada por um capacitor de 6 mF que resulta numa tensão com pequena ondulação.

Figura 4.33 - Tensão e corrente gerada.

A Figura 4.33 apresenta a tensão e corrente gerada de forma instantânea, enquanto que na Figura 4.34 apresenta-se estes valores e o valor médio de corrente de saída. A Figura 4.34 apresenta um valor de tensão média próximo a 74 V e um valor de corrente média próxima de 6 A.

Figura 4.34 - Tensão e corrente gerada.

Na Figura 4.35 pode-se observar a tensão e corrente na carga, análise está realizada no resistor que simula a carga elétrica, com valor de $11,1 \Omega$. Analisando a Figura 4.35 pode-se verificar que a ação do capacitor faz com que a corrente na carga tenha um valor próximo ao médio mostrado na Figura 4.34, com pouca oscilação.

Figura 4.35 - Tensão e corrente na carga.

Na Figura 4.36, é apresentada a corrente na saída, a corrente na carga e a corrente no capacitor. Pode-se observar a corrente na saída bastante pulsante, a corrente na carga com pouca oscilação, e a corrente no capacitor que demonstra ser uma corrente de recarga. Pode ser verificado também o período em que o capacitor alimenta a carga, fazendo com que ocorra uma diminuição na oscilação da corrente que chega até o resistor.

Figura 4.36 - Corrente gerada, corrente no capacitor e corrente na carga.

A Figura 4.37 apresenta os valores de corrente das três fases na partida do GRC, pode-se perceber que na partida o GRC também apresenta problemas de elevação na corrente como outros tipos de máquinas. O capacitor utilizado juntamente com a carga se encontra descarregado no momento da partida e este é o motivo para tal problema na partida do GRC, porém o uso desse capacitor é fundamental para diminuir a oscilação da tensão entregue à carga.

Figura 4.37 - Corrente na partida do gerador.

A forma de correção do problema apresentado na Figura 4.37 é uma pré-carga do capacitor que se encontra junto à carga antes do início do funcionamento da máquina. Utilizando a pré-carga do capacitor a Figura 4.38 apresenta as correntes no momento de partida do GRC.

Figura 4.38 - Corrente na partida com pré-carga no capacitor.

A Figura 4.39 apresenta o comportamento das tensões das 3 fases no momento da partida do GRC. Nesta figura o capacitor que se encontra junto à carga está descarregado no momento de partida do GRC.

Figura 4.39 - Tensão nas fases na partida do GRC.

Da mesma forma da corrente na partida, pode ser utilizado um capacitor pré-carregado para solucionar o problema encontrado pela tensão. A Figura 4.40 apresenta as tensões nas fases na partida com o capacitor pré-carregado.

Figura 4.40 - Tensões nas fases na partida, capacitor junto à carga pré-carregado.

Pode ser observado na Figura 4.41 a corrente, o torque eletromagnético, além do perfil de indutância e sua variação $\left(\frac{dL}{d\theta}\right)$. As curvas apresentadas na Figura 4.41 são apenas em relação a uma fase do GRC, sendo o comportamento das outras fases semelhante. Os valores de indutância e da derivada da indutância tiveram seus valores reais alterados, para que a visualização do comportamento pudesse ser realizada, cada uma dessas grandezas teve um aumento de 300 vezes.

Figura 4.41 - Corrente no enrolamento, indutância, derivada da indutância e conjugado eletromagnético.

A Figura 4.42 apresenta o conjugado mecânico instantâneo e o conjugado mecânico médio, além de apresentar também o conjugado eletromagnético resultante instantâneo e médio. O valor de pico do conjugado mecânico instantâneo tem aproximadamente 2,2 N.m, enquanto que o valor médio apresentado possui 1,4 N.m. O valor de pico do conjugado eletromagnético tem aproximadamente -2 N.m, e o valor médio apresenta -1,25 N.m.

Figura 4.42 - Torque mecânico e torque eletromagnético.

De acordo com a equação (3.15), o torque mecânico é calculado por:

$$T_m = -T_{emag} + D \cdot \omega + J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (4.2)$$

sabendo que nesta simulação a velocidade é constante, o torque mecânico, vai ser obtido através de:

$$T_m = -T_{emag} + D \cdot \omega \quad (4.3)$$

caso o coeficiente de atrito (D) fosse igual a zero, o torque mecânico e o torque eletromagnético seriam iguais em módulo. O coeficiente de atrito (D) utilizado nesta simulação tem o valor de 0,00148.

A Figura 4.43 demonstra o torque mecânico instantâneo e médio e o torque eletromagnético instantâneo e médio. Nesta figura como caráter comparativo o conjugado eletromagnético foi apresentado com o módulo de seus valores. Fica evidenciado nesta figura que a diferença de um perfil de conjugado para o outro, é apenas o segundo termo do segundo membro da equação (4.3).

Figura 4.43 - Conjugado mecânico e conjugado eletromagnético.

A potência mecânica de entrada pode ser verificada na Figura 4.44, que apresenta além da potência mecânica instantânea de entrada, ilustra também a potência mecânica média de entrada. A potência mecânica instantânea tem valores de pico próximos de 268 W, e o valor médio apresenta valor de 172,62 W.

Figura 4.44 - Potência mecânica de entrada.

A Figura 4.45 apresenta a potência elétrica de entrada instantânea e a potência elétrica de excitação média. O valor da potência elétrica de entrada instantânea apresentada na Figura 4.45 é de 447,8 W de pico e a potência elétrica de entrada média tem valor de 371,82 W.

Figura 4.45 - Potência elétrica de entrada.

Na Figura 4.47 é apresentada a potência gerada instantânea e a potência gerada média. Esta potência é calculada a partir da tensão gerada e da corrente de saída do gerador. O valor de pico da potência elétrica gerada instantânea é de 829 W e a potência elétrica gerada média é 478,23 W.

Figura 4.46 - Potência elétrica gerada.

Na Figura 4.47 é apresentada a potência gerada e a potência total de entrada, que vai consistir na soma da potência mecânica de entrada e da potência elétrica de entrada, que também são ilustradas nesta figura.

Figura 4.47 - Potência total de entrada, potência mecânica, potência elétrica de entrada e potência elétrica gerada.

Os valores das potências apresentadas na Figura 4.47, são:

- Potência elétrica de entrada: 371,82 W.
- Potência mecânica: 172,62 W.
- Potência total de entrada: 544,44 W.
- Potência elétrica gerada: 478,23 W.

Sabendo-se que a excitação do gerador é toda realizada pela fonte CC externa e que não ocorre auto-excitação para este caso, o rendimento foi calculado através da potência elétrica gerada e da potência total de entrada:

$$R = \frac{P_{eleg}}{P_{tent}} \quad (4.4)$$

onde:

R – Rendimento.

P_{eleg} – Potência elétrica gerada.

P_{tent} – Potência total de entrada.

A Figura 4.48 apresenta o rendimento do GRC, este rendimento apresenta valor próximo a 0,88.

Figura 4.48 - Rendimento do GRC.

4.5 Conclusões

Este Capítulo apresentou o perfil de indutância utilizado e os resultados obtidos na simulação computacional.

O conhecimento do comportamento da indutância é imprescindível para realização da simulação.

O conversor utilizado nas simulações também foi apresentado. O seu funcionamento atuando no GRC foi explicado, considerando duas etapas. A etapa de excitação do enrolamento da máquina, e a etapa de entrega à carga da potência gerada. Pode-se concluir que o acionamento de cada fase do conversor é extremamente importante para uma boa operação do GRC.

O software escolhido para realizar a simulação foi o Matlab, onde foi utilizada a ferramenta Simulink. A forma como a simulação é realizada foi apresentada, demonstrando por etapas como é feita a resolução da equação de estados do GRC.

A simulação foi realizada utilizando o modelo matemático de um GRC, apresentado no Capítulo 3.

A saturação magnética foi levada em consideração nesta simulação, pois a mesma utilizou superfícies de indutância e de sua derivada obtidas no protótipo GRC apresentado neste trabalho.

A simulação foi realizada no domínio do tempo e apresentou como resultados os comportamentos das curvas de tensão e corrente na excitação do gerador, no enrolamento das fases e na carga alimentada pelo GRC. As potências de entrada e gerada também podem ser verificadas, assim como o rendimento do gerador.

Devido a sua estrutura de construção o que se pôde perceber foi que a corrente de excitação, a tensão e corrente nos enrolamentos, bem como a tensão e corrente na carga apresenta comportamento pulsante, sendo que a utilização do capacitor ameniza este problema na carga.

O conjugado mecânico e o conjugado eletromagnético também apresentaram o comportamento pulsante.

Fica evidenciado pelos resultados que a máquina teve um bom funcionamento como gerador, tendo um rendimento de 0,88. Uma potência total de entrada de 544,44 W foi necessária para gerar uma potência elétrica de 478,23 W.

A realização da simulação é de extrema importância, pois assim há a possibilidade de comparação dos resultados experimentais com os obtidos na simulação, além de facilitar investigações como a melhor posição para acionamento da máquina. A previsão dos

componentes utilizados experimentalmente pôde também ser feito através da simulação, pois assim foi possível saber em quais níveis de tensão e corrente se iria trabalhar.

O cálculo do rendimento do gerador foi apresentado neste trabalho somente na simulação, sendo outro fator importante da simulação e neste capítulo evidenciado.

Capítulo 5

Projeto da Máquina a Relutância Chaveada

5.1 Introdução

O principal objetivo deste trabalho é a construção de um protótipo de uma Máquina a Relutância Chaveada, com o intuito de uma investigação inicial do seu funcionamento como gerador.

O protótipo construído seguiu os passos apresentados em (KRISHNAN, 2001), (TEIXEIRA, 2008) e (COSTA, 2004) também contribuem no que diz respeito à construção do protótipo aqui apresentado.

O retorno dos estudos a cerca das MRC de forma recente e em um primeiro momento teve como prioridade os estudos sobre o motor a relutância. Trabalhos que apresentem construção de uma MRC para atuar especificamente como gerador ainda são pouco comuns e a literatura especializada é quase inexistente.

O projeto aqui apresentado segue passos para construção de um motor a relutância, porém como a máquina opera bem tanto como motor quanto como gerador (MILLER, T. J. E. 2001), esta máquina neste trabalho é estudada no modo gerador.

Nos projetos de máquinas elétricas normalmente os parâmetros construtivos são calculados a partir de um conjunto de especificações iniciais (COSTA, 2004), como: potência de saída, velocidade nominal, a densidade magnética do aço utilizado, dentre outras, neste projeto os parâmetros construtivos foram da mesma forma calculados.

Este Capítulo apresenta o protótipo construído, demonstrando como cada um dos parâmetros construtivo foi calculado.

5.2 Projeto do Gerador a Relutância Chaveado

5.2.1 Considerações importantes

O método utilizado para execução do projeto deste protótipo se assemelha a metodologia utilizada para projeto de outras máquinas elétricas, onde a base inicial para cálculo dos parâmetros da máquina é obtida a partir de dados de saída, como a potência, corrente e velocidade (TEIXEIRA, 2008; COSTA, 2004).

A primeira consideração a ser feita foi o número de fases do protótipo, sabendo que a quantidade de fases neste tipo de máquina não é fixa e vai depender dos interesses de cada estudo.

O aumento no número de fases se torna interessante no que diz respeito à descontinuidade magnética apresentada por este tipo de máquina, com este aumento no número de fases esta descontinuidade tende a se reduzir (TEIXEIRA, 2008), mas um grande número de fases poderia trazer uma elevação de custo na montagem do protótipo e nos componentes eletrônicos, pois é sabido que a máquina necessita de um conversor para realizar seu acionamento.

Como a princípio o objetivo inicial do protótipo é o estudo do mesmo atuando como gerador, a preocupação com a partida da máquina não foi um fator relevante, porém houve

certa consideração, pois a máquina pode vir a ser estudada como motor, e neste caso a partida não é feita por um torque mecânico aplicado ao eixo.

A partida no modo motor é um pouco mais complexa, a escolha no número de pólos pode influenciar na partida da máquina em qualquer posição que o rotor esteja sem a necessidade de bobinas auxiliares (TEIXEIRA, 2008).

Outro ponto que deve ser levado em consideração é a influência das indutâncias mútuas, o modelo matemático apresentado desconsiderou tal influência por elas serem mínimas. No projeto da máquina para minimizar a influência das mútuas segundo (LAWRENSON, 1980), tais considerações devem ser feitas:

- Os pólos ativos devem ser excitados aos pares e diametralmente opostos;
- A parte móvel (neste caso o rotor) deve possuir um número par de pólos.

A potência mecânica estipulada para este protótipo foi de 1000 W, outra consideração inicial para início dos cálculos dos parâmetros foi que o estator deveria apresentar 6 pólos e o rotor 4, sendo assim uma máquina 6×4 trifásica. As considerações iniciais para execução do projeto podem ser vistas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Considerações iniciais para execução do projeto

Parâmetros	Valor	Unidade
Número de pólos do estator	6	pólos
Número de pólos do rotor	4	pólos
Número de fases	3	fases
Número de fases em condução	1	fases
Potência mecânica	1000	W
Velocidade nominal	1300	rpm
Densidade magnética (joelho da curva do aço)	1,5	T

Como a máquina 6×4 tem uma fase acionada de cada vez e de forma sequencial o número de fases em condução é 1, cada par de pólos do estator diametralmente oposto forma uma fase, sendo assim uma máquina de 3 fases.

A velocidade nominal foi selecionada em 1300 rpm devido resultados apresentados em (FLEURY, 2008; FLEURY et al, 2008; FLEURY et al, 2008a; RIBEIRO et al, 2008), trabalhos estes que utilizam um gerador 6 x 4 com uma potência próxima da escolhida neste trabalho.

O ruído acústico é um dos pontos negativos atribuídos a MRC, desse modo algumas considerações devem ser feitas de acordo com (KRISHNAN, 2001; TEIXEIRA, 2008), como:

- Comprimento da culatra: um maior comprimento de culatra aumenta a estabilidade mecânica, diminuindo a vibração da máquina.
- Tamanho do entreferro.
- Compactação das lâminas: um alto fator de empacotamento das lâminas do estator e do rotor auxilia a redução de forças radiais que aumentam o ruído acústico.

5.2.2 Cálculos Para Definição dos Parâmetros Construtivos

De acordo com (KRISHNAN, 2001; TEIXEIRA, 2008) o menor valor para os arcos polares é obtido por:

$$\min(\alpha_{es}, \alpha_{ro}) = \frac{2 \cdot \pi}{f \cdot N_{ro}} = \frac{4 \cdot \pi}{N_{es} \cdot N_{ro}} \quad (5.1)$$

dessa forma:

$$\alpha_{es} = \frac{4 \cdot \pi}{N_{es} \cdot N_{ro}} = 0,5236 \cong 30^\circ \quad (5.2)$$

onde:

α_{es} – arco polar do estator.

α_{ro} – arco polar do rotor.

f – número de fases.

N_{es} – número de pólos do estator.

N_{ro} – número de pólos do rotor.

De acordo com (LAWRENSON, 1980) e respeitando o limite máximo para o arco do rotor, $\alpha_{ro} = 0,593 \cong 34^\circ$. O arco polar do estator pode ser verificado na Figura 5.1 e o arco polar do rotor pode ser visualizado na Figura 5.2.

A partir da potência mecânica e da velocidade nominal, que são uma das considerações iniciais utilizadas para obtenção dos parâmetros construtivos, o conjugado mecânico é obtido por:

$$C_{mec} = \frac{P_{mec}}{V_{rpm} \cdot \frac{\pi}{30}} = 7,3456 \text{ N.m} \quad (5.3)$$

onde:

C_{mec} – conjugado mecânico.

P_{mec} – potência mecânica.

V_{rpm} – velocidade em rpm.

A potência mecânica da máquina pode ser obtida através de:

$$P_{mec} = k_e \cdot k_d \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k \cdot B \cdot D_{int}^3 \cdot A_{esp} \cdot V_{rpm} \quad (5.4)$$

Na equação (5.4), k_e representa a eficiência de conversão eletromagnética e de acordo com (KRISHNAN, 2001; TEIXEIRA, 2008), foi admitido para este projeto o valor de 0,7.

O parâmetro k_d é considerado o ciclo de trabalho da máquina e é definido pelo acionamento da máquina, e é calculado por:

$$k_d = \frac{\theta_c}{2 \cdot \pi} \cdot f \cdot N_{ro} \quad (5.5)$$

sendo que θ_c é o ângulo de condução da fase, neste caso $\theta_c = \alpha_{es}$, f é o número de fases e N_{ro} é o número de pólos do rotor. Sendo assim $k_d = 1$.

A constante k_1 é dada por:

$$k_1 = \frac{\pi^2}{120} \quad (5.6)$$

então, $k_1 = 0,0822$.

O valor de k_2 é determinado entre 0,65 e 0,75 de acordo com (KRISHNAN, 2001; TEIXEIRA, 2008). Este parâmetro vai depender do ponto de operação da máquina que é determinado pelas dimensões da mesma, como neste momento ainda não é possível obter as dimensões, este parâmetro foi escolhido com valor de 0,72, estando entre os possíveis valores.

O valor de k foi determinado 0,7 de acordo com (TEIXEIRA, 2008). O valor de k é obtido de acordo com a aplicação da máquina projetada, para servo aplicações o valor de k varia entre 1 e 3, para não servo aplicações o valor de k vai variar entre 0,25 e 0,7.

A densidade magnética (B) da equação (5.4) é 1,5 T. Este valor é o disponibilizado pelo fabricante do aço utilizado.

O carregamento específico (A_{esp}), normalmente esta dentro da faixa de $2500 < A_{esp} < 90000$ (KRISHNAN, 2001; TEIXEIRA, 2008) e neste caso foi utilizado o valor de 35000.

De posse de todos os parâmetros para cálculo da potência mecânica, e substituindo os valores na equação (5.4), pode-se determinar que o diâmetro interno da máquina é $D_{int} \cong 80$ mm.

O diâmetro externo (D_{ext}) da máquina é estipulado pelo diâmetro interno. Normalmente o diâmetro interno é de 0,4 a 0,7 vezes o valor do diâmetro externo. Neste trabalho foi considerado que:

$$D_{int} = 0,5 \cdot D_{ext} \quad (5.7)$$

e dessa forma o diâmetro externo (D_{ext}) possui 160 mm.

O próximo passo é determinar o comprimento da pilha, que pode ser calculado a partir de (KRISHNAN, 2001; TEIXEIRA 2008; COSTA, 2004):

$$L_{pilha} = k \cdot D_{int} \cong 55 \text{ mm} \quad (5.8)$$

O comprimento da pilha (L_{pilha}) tem um valor aproximado de 55 mm, pois as lâminas do aço utilizado têm 0,5 mm.

O comprimento do dente (pólo) (l_{pes}) do estator é obtido por:

$$l_{pes} = D_{int} \cdot \text{sen} \left(\frac{\alpha_{es}}{2} \right) = 20,7 \text{ mm} \quad (5.9)$$

O comprimento do dente do rotor é calculado por:

$$l_{pro} = D_{int} \cdot \text{sen} \left(\frac{\alpha_{ro}}{2} \right) = 23,4 \text{ mm} \quad (5.10)$$

O cálculo da culatra do estator é feito utilizando o valor do comprimento do pólo do estator, e esta culatra deve ter no mínimo a metade do comprimento do pólo, de acordo com (KRISHNAN, 2001). Dessa forma $l_{pes} > c_{es} \geq 0,5 \cdot l_{pes}$, no caso deste projeto o valor que vai determinar a dimensão da culatra é 0,6. E assim a culatra do estator tem o valor de:

$$c_{es} = 0,6 \cdot l_{pes} = 12,42 \text{ mm} \quad (5.11)$$

A culatra do rotor (c_{ro}) vai ter seu valor determinado por: $0,5 \cdot l_{pes} < c_{ro} < 0,75 \cdot l_{pes}$.

E dessa forma o fator multiplicativo para cálculo da culatra do rotor é 0,6, e este valor é obtido por:

$$c_{ro} = 0,6 \cdot l_{pes} = 12,42 \text{ mm} \quad (5.12)$$

A altura do pólo do estator (h_{es}), é:

$$h_{es} = \frac{D_{ext} - (D_{int} + 2 \cdot c_{es})}{2} = 27,58 \text{ mm} \quad (5.13)$$

e a altura do pólo do rotor (h_{ro}) pode ser obtida por:

$$h_{ro} = \frac{D_{int} - 2 \cdot l_{ent} - D_{eixo} - 2 \cdot c_{ro}}{2} = 9,83 \text{ mm} \quad (5.14)$$

no cálculo da altura do rotor, o comprimento do entreferro é l_{ent} e D_{eixo} simboliza o diâmetro do eixo. O comprimento do entreferro é 0,3 mm e o diâmetro do eixo é de 34,9 mm.

O projeto do estator e do rotor foi feito no software Solid Works, este projeto foi utilizado para realizar o corte das chapas de aço para construção do protótipo. A estrutura do estator com a medida de seus parâmetros pode ser verificada na Figura 5.1.

Figura 5.1 - Parâmetros construtivos do estator.

Na Figura 5.2 o rotor é apresentado contendo os valores de seus parâmetros construtivos.

Figura 5.2 - Parâmetros construtivos do rotor.

Em (KRISHNAN, 2001; TEIXEIRA, 2008; COSTA, 2004) é possível obter como calcular a quantidade de enrolamentos por fase, para realização deste cálculo é necessário uma tabela AWG que será utilizada na montagem. O cálculo foi realizado de acordo com (TEIXEIRA, 2008), porém pela existência de diversas tabelas AWG o número de espiras por fase foi convenientemente decidido no momento da montagem do protótipo.

A montagem do protótipo foi realizada em um representante WEG, primeiramente foi escolhida a corrente de pico de 15 A, sendo assim de acordo com a tabela AWG utilizada pela WEG o fio selecionado foi o 14 AWG. Durante a montagem foi utilizado 70 espiras por pólo do estator, totalizando assim em 140 espiras por fase.

A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros construtivos do protótipo montado.

Tabela 5.2 - Parâmetros do protótipo montado.

Parâmetros	Símbolo	Valor
Diâmetro interno	D_{int}	80 mm
Diâmetro externo	D_{ext}	160 mm
Comprimento da pilha	L_{pilha}	55 mm
Comprimento do dente do estator	l_{pes}	20,71 mm
Comprimento do dente do rotor	l_{pro}	23,38 mm
Culatra do estator	c_{es}	12,42 mm
Culatra do rotor	c_{ro}	12,42 mm
Altura do dente do estator	h_{es}	27,58 mm

Altura do dente do rotor	h_{ro}	9,83 mm
Entreferro	l_{ent}	0,3 mm
Diâmetro do eixo	D_{eixo}	34,9 mm
Número de espiras por fase	NE	140

5.3 Apresentação do Protótipo Construído

O protótipo foi construído utilizando o projeto apresentado. Utilizando os parâmetros construtivos do estator apresentados na Figura 5.1 e os parâmetros construtivos do rotor apresentados na Figura 5.2 o corte nas laminas de aço foi realizado.

5.3.1 Aço Utilizado e Corte das Lâminas de Aço

O aço utilizado na construção deste protótipo foi uma doação feita pela Tecumseh do Brasil para a Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Departamento de Engenharia Elétrica (SEL) da Universidade de São Paulo (USP). O aço é o POSCO 50PN470 da Companhia de Aço e Ferro Pohang, companhia essa que é da Coréia do Sul e terceira maior produtora de aço do mundo, este aço foi integrado a linha de produção da Tecumseh recentemente. Este aço é um aço elétrico de grão não orientado. A lâmina utilizada foi de 0,5 mm.

Os cortes das chapas de aço foram realizados na cidade de Batatais – SP na empresa TLBergamini, onde foi utilizado uma máquina de corte a laser de fabricação Alemã. O corte a laser foi o escolhido com o objetivo de uma boa precisão e qualidade no corte das lâminas.

Após o corte das lâminas do estator e rotor um tratamento término foi realizado na Tecumseh do Brasil sede São Carlos – SP.

A Figura 5.3 apresenta uma lâmina do estator do protótipo, como cada lâmina têm 0,5 mm e o comprimento da pilha da máquina é de 55 mm, foram utilizadas 110 lâminas para formação do estator.

Figura 5.3 - Lâmina de aço utilizada na construção do estator.

A Figura 5.4 demonstra uma lâmina do rotor. A lâmina de aço utilizada no estator é a mesma utilizada na construção do rotor, sendo assim da mesma forma são utilizadas 110 lâminas para formação do rotor.

Figura 5.4 - Lâmina de aço utilizada na construção do rotor.

5.3.2 Montagem do Protótipo

A montagem do protótipo foi dividida em duas etapas. Primeiramente a montagem do estator foi realizada pela Tecumseh do Brasil sede São Carlos e a fase de montagem do rotor e montagem do protótipo em sua carcaça foi realizada pela Eletro Cabral, representante WEG localizada em Acreúna – GO.

O artefato construído pela Tecumseh para bonderização e empacotamento das lâminas do estator pode ser verificado na Figura 5.5.

Figura 5.5 - Artefato construído para bonderização e empacotamento do estator.

O processo de montagem do estator pode ser verificado na Figura 5.6, na Figura 5.7 e na Figura 5.8.

Figura 5.6 - Estator sendo preparada para bonderização.

Figura 5.7 - Processo de montagem do estator.

Figura 5.8 - Processo de montagem do estator.

Após a montagem do estator, o rotor foi montado em seu eixo e o protótipo foi montado em sua carcaça. A carcaça utilizada foi a carcaça WEG 100L e suas especificações podem ser verificadas no Apêndice C.

A Figura 5.9 apresenta a montagem do estator na carcaça, nesta figura podem-se verificar também os enrolamentos do estator.

Figura 5.9 - Processo de montagem do estator na carcaça.

O protótipo construído é apresentado na Fig. 6.10.

Figura 5.10 - Protótipo construído.

5.4 Conclusões

Este Capítulo teve como objetivo demonstrar o projeto de uma MRC, que vai ser posta em operação a princípio no modo gerador.

O projeto aqui apresentado constituiu nos passos apresentados por (KRISHNAN, 2001), (TEIXEIRA, 2008) e (COSTA, 2004) que trata do projeto de motores a relutância chaveado. O projeto foi feito realizando primeiramente a escolha da potência mecânica, pois é com a escolha deste parâmetro que é possível realizar o projeto.

A dificuldade no encontro de uma literatura específica é o ponto desfavorável na realização de um projeto deste tipo de máquina. Alguns dos parâmetros ainda são determinados dentro de uma larga faixa de valores possíveis, porém o crescente número de trabalhos sobre a MRC ajudará neste aspecto.

Após a construção do protótipo foi necessário a construção de uma bancada de testes para realizar os testes no protótipo, podendo assim apresentar a sua dinâmica de funcionamento.

Capítulo 6

Bancada de Testes e Resultados Experimentais

6.1 Introdução

Com o protótipo do gerador construído, foi necessária também a montagem de uma bancada de testes para investigação na dinâmica de funcionamento de um GRC trifásico. A construção deste protótipo é extremamente importante, pois dessa forma investigações futuras realizadas neste protótipo podem contribuir para que a MRC se torne uma realidade.

A bancada de testes é neste Capítulo apresentada. A MRC necessita de um conversor eletrônico, de uma ponte retificadora, além de um circuito de disparo que é responsável por acionar a chave do conversor eletrônico, este conjunto de requisitos faz parte da bancada de testes apresentada.

Os resultados experimentais que demonstram a dinâmica de funcionamento do protótipo operando no modo gerador são também neste Capítulo apresentados.

6.2 Bancada de Testes

Para obtenção dos resultados experimentais uma bancada de testes foi montada para realização dos testes. Esta bancada de testes foi apresentada na Figura 1.1. Nesta bancada de testes se têm: um transformador trifásico variável, a ponte retificadora, o conversor eletrônico, o circuito de disparo responsável por acionar a chave do conversor, o motor de indução responsável pela entrada mecânica do gerador e equipamentos de medição.

O transformador trifásico CA variável utilizado nos testes pode ser verificado na Figura 6.1.

Figura 6.1 - Transformador trifásico variável.

A tensão de excitação do GRC é uma tensão CC, assim uma ponte retificadora Semikron SKD 25/12 foi utilizada e a mesma pode ser verificada na Figura 6.2.

Figura 6.2 - Ponte retificadora Semikron SKD 25/12.

O circuito elétrico da ponte retificadora utilizada é apresentado na Figura 6.3.

Figura 6.3 - Circuito elétrico da ponte retificadora utilizada (Datasheet SKD 25/12).

Um conjunto de capacitores foi utilizado para reduzir a oscilação da tensão retificada, o filtro capacitivo utilizado foi de 18 mF.

O conversor utilizado foi o conversor série e este já foi aqui apresentado. A Figura 6.4 apresenta o conversor montado.

Figura 6.4 - Conversor série montado.

Na montagem do conversor apresentado pela Figura 6.4 a chave eletrônica utilizada foi o MOSFET IRFP 240 e o diodo foi o SKR 26/08. Estes componentes são apresentados na Figura 6.5.

Figura 6.5 - Mosfet IRFP 240 e diodo SKR 26/08.

As chaves de cada fase devem ser acionadas cada uma ao seu tempo e de forma sequencial, para este acionamento um circuito de disparo foi montado. É realizado o sensoramento utilizando foto sensores para detectar em qual momento cada fase deve ser acionada e através deste sensoramento o circuito eletrônico montado faz com que a chave eletrônica do conversor conduza no momento correto. O sensoramento é realizado utilizando um disco de acrílico similar ao rotor do protótipo, onde se tem alternadamente 30° de condução e 60° de não condução, na Figura 6.6 pode-se verificar o disco e os foto sensores. Para exemplificar se pode observar nesta figura que neste momento o foto sensor da fase 2 esta acionando esta fase, enquanto as fases 1 e 3 não estão sendo acionadas.

Figura 6.6 - Sensoramento realizado para acionar a chave eletrônica do conversor.

O sinal emitido pelo foto transistor é recebido por um circuito de disparo, este é responsável por emitir o sinal de *gate* ao MOSFET do conversor, excitando assim o enrolamento de cada fase. O circuito de disparo montado é apresentado na Figura 6.7.

Figura 6.7 - Circuito de disparo.

O gerador a relutância possui uma entrada elétrica que é a tensão CC que excita a fase e uma entrada mecânica, nos testes realizados a entrada mecânica foi o torque mecânico disponibilizado por um MIT, este motor é apresentado na Figura 6.8.

Figura 6.8 - Motor de indução trifásico utilizado como entrada mecânica do gerador.

A Figura 6.9 apresenta o MIT acoplado ao protótipo GRC.

Figura 6.9 - Motor de indução trifásico acoplado ao gerador a relutância.

O MIT foi alimentado por um inversor de frequência, a tensão de entrada foi de 380 V, e este inversor foi utilizado para facilitar variações de velocidade do MIT e consequentemente do GRC. A Figura 6.10 apresenta o inversor de frequência utilizado.

Figura 6.10 - Inversor de frequência utilizado.

O protótipo montado instalado na bancada de testes é apresentado na Figura 6.11.

Figura 6.11 - Protótipo montado na bancada de testes.

A tensão gerada pelo GRC é uma tensão oscilante, devido a isso um capacitor de 6 mF foi utilizado para diminuir o *ripple* de tensão. Essa tensão foi entregue a uma carga elétrica de 11,1 Ω , na Figura 6.12 a resistência é apresentada.

Figura 6.12 - Carga resistiva utilizada nos testes.

Uma visão geral da bancada é apresentada na Figura 6.13. Nesta figura podem-se verificar também alguns dos equipamentos de medida, foram utilizados dois multímetros ET-2700 Minipa, um multímetro Fluke 289 e um multímetro Fluke 189, todos os multímetros utilizados são True RMS. Um osciloscópio digital TDS-3034B Tektronix também foi utilizado.

Figura 6.13 - Bancada de testes.

6.3 Resultados Experimentais

Com a bancada de testes montada é possível demonstrar resultados simulados e experimentais que apresentam a dinâmica de funcionamento do protótipo montado. Alguns resultados experimentais já foram apresentados como o perfil e superfície de indutância, além da superfície da derivada da indutância em relação à posição do rotor, estes resultados experimentais já apresentados são utilizados para realizar a simulação do protótipo no software Matlab.

O primeiro teste realizado no GRC montado foi um teste onde a velocidade foi variada de 600 a 5000 rpm. O intuito deste teste é descobrir para este protótipo em qual velocidade o mesmo vai operar de forma mais satisfatória. Para este teste em todos os níveis de velocidade a tensão de excitação foi mantida em 35 V. De forma quantitativa a potência gerada neste caso foi considerada a potência elétrica de saída menos a potência elétrica de entrada. A Figura 6.14 apresenta a variação da potência gerada em relação à velocidade.

Figura 6.14 - Potência gerada em relação a velocidade.

Na Figura 6.14 pode-se perceber que com o aumento da velocidade a partir de 600 rpm o nível da potência gerada se eleva até um ponto máximo e depois decresce, este ponto máximo de geração ocorre em 1150 rpm, este comportamento é apresentado por outros trabalhos que utilizam o GRC trifásico (FLEURY, 2008).

Já que 1150 rpm é o ponto de melhor rendimento do protótipo, em todos os testes apresentados esta velocidade foi a utilizada, inclusive nos resultados simulados já apresentados. A tensão de excitação também foi mantida fixa em 35 V para todos os resultados que se seguem.

A Figura 6.15 apresenta a tensão e corrente na entrada. Fica evidenciada a tensão oscilante e este problema pode ser de melhor forma corrigido aumentando a robustez do filtro capacitivo que se encontra junto a ponte retificadora. A corrente pulsante é uma das características do GRC e fica também evidenciada nesta figura.

A corrente foi oscilografada por um osciloscópio digital que disponibiliza equipamento capaz de ilustrar tal comportamento, não sendo necessário assim utilizar

sensores resistivos para obter a onda de corrente, este equipamento foi utilizado em todos os testes apresentados.

Figura 6.15 - Tensão e corrente na excitação.

A Figura 6.16 apresenta também a tensão e corrente na entrada alterando apenas a escala de tempo.

Figura 6.16 - Tensão e corrente na entrada.

O comportamento da tensão e corrente no enrolamento de uma das fases foi apresentado nos resultados simulados na Figura 4.28. Este comportamento experimental pode ser verificado na Figura 6.17.

Figura 6.17 - Tensão e corrente no enrolamento de uma das fases.

A Figura 6.17 apresentou uma tensão de excitação de 35 V, a tensão gerada apresenta níveis próximos a 40 V. Os valores de pico de corrente estão próximos de 15 A. Nesta figura fica evidenciado que a área da curva de corrente no momento de geração é bem maior do que a área da curva de corrente no momento de excitação.

A Figura 6.18 apresenta a tensão e corrente no enrolamento de uma das fases. Nesta figura é possível verificar o resultado simulado e o resultado experimental. O comportamento das curvas e os níveis de tensão e corrente nos dois resultados são extremamente próximos, validando assim que o protótipo construído tem seu comportamento dentro do esperado e que os resultados apresentados na simulação são realmente do protótipo apresentado neste trabalho.

Figura 6.18 - Tensão e corrente nos enrolamento de uma fase, resultado simulado e experimental.

A tensão gerada é entregue a carga, a utilização de um filtro capacitivo para diminuir as oscilações já foi citada anteriormente. Na Figura 6.19 são apresentadas a tensão e corrente de saída antes do capacitor.

Figura 6.19 - Tensão e corrente na saída.

A Figura 6.20 apresenta a tensão e corrente na carga. Nesta figura pode-se perceber a ação do filtro capacitivo, diminuído a oscilação da tensão e fazendo com que a corrente não fique pulsada.

Figura 6.20 - Tensão e corrente na carga.

Como caráter comparativo, considerando que a potência gerada é a potência elétrica de saída menos a potência elétrica de entrada e mantendo a tensão de excitação em 35 V tanto na simulação quanto experimentalmente, tem-se:

➤ Simulação:

- ✓ Corrente de entrada: 10,62 A
- ✓ Tensão de saída: 72,99 V
- ✓ Corrente de saída: 6,55 A
- ✓ Potência de entrada: 371,7 W
- ✓ Potência de saída: 478,08 W
- ✓ Potência gerada: 106,38 W.

➤ Experimental:

- ✓ Corrente de entrada: 10,85 A
- ✓ Tensão de saída: 72,25 V
- ✓ Corrente de saída: 6,6 A
- ✓ Potência de entrada: 379,81 W

✓ Potência de saída: 476,85 W

✓ Potência gerada: 97,04 W.

Analisando a potência gerada na simulação que é de 106,38 W e a potência gerada experimentalmente que é de 97,04 W, há uma diferença de 9,34 W. Essa diferença foi atribuída às perdas reais que se tem com cabeamento e equipamentos de medição, pois na simulação essas perdas não são consideradas. Pode-se perceber que os valores de corrente de entrada e saída e tensão de saída além das potências de entrada e saída estão todos muito próximos, certificando assim a simulação e os resultados experimentais apresentados.

6.4 Conclusão

A bancada de testes montada foi apresentada nesta etapa do trabalho. A montagem desta bancada é extremamente importante, pois dessa forma se tem um protótipo MRC onde é possível realizar investigações, podendo assim contribuir para que este tipo de máquina se torne uma realidade.

Os resultados experimentais apresentam a dinâmica de funcionamento do GRC montado, estes resultados estão coerentes com a simulação apresentada certificando que o protótipo montado trabalha bem como gerador.

Pode-se verificar nos resultados o comportamento da tensão e corrente na entrada, no enrolamento das fases e na saída do gerador. As necessidades dos filtros capacitivos junto à ponte retificadora e junto à carga ficam evidenciadas, sendo possível uma melhoria nos resultados aumentando-se a robustez destes filtros.

Capítulo 7

Conclusões

O objetivo deste trabalho foi apresentar o GRC trifásico, demonstrando um breve histórico, sua estrutura construtiva, princípio de funcionamento, possíveis aplicações modernas, sua simulação computacional, o projeto de um protótipo e a montagem de uma bancada de testes juntamente com os resultados experimentais. O modelo matemático que considera a saturação magnética foi apresentado e é utilizado para realização da simulação.

A simulação apresentada demonstrou que a máquina a relutância pode ser usada no modo gerador, com um rendimento de 0,88, neste caso. Fato este que se torna interessante devido às qualidades desta máquina e possível aplicabilidade em velocidades variáveis. As desvantagens conhecidas da máquina a relutância vem sendo amenizadas com o desenvolvimento da eletrônica de potência, micro processamento e sensoramento.

Os resultados experimentais apresentados ilustraram a dinâmica de funcionamento do gerador montado neste trabalho. Estes resultados experimentais estão bastante próximos dos resultados simulados apresentados, sendo possível assim certificar que o GRC tem um bom funcionamento no modo gerador.

Tanto os resultados simulados quanto os resultados experimentais apresentaram as tensões e corrente na excitação, nos enrolamentos e na saída do gerador. Nestes resultados ficam evidenciadas as oscilações de tensão e a corrente pulsante, sendo o uso do filtro capacitivo a forma de reduzir tal problema.

A construção do protótipo do gerador possibilitou o envolvimento de procedimento e técnicas de construção de máquinas elétricas. Estes procedimentos e técnicas foram devidamente relatados na dissertação, como forma de permitir sua reprodução ou proceder aprimoramentos deste assunto.

Da mesma forma a preparação e montagem da bancada de ensaio foi devidamente documentada para futuros usuários ou futuros aprimoramentos.

Finalmente o envolvimento com todo sistema durante testes e coleta de dados possibilitou conhecer diversos aspectos da operação do gerador a relutância chaveado com vista a aplicações em velocidade variável, bem como da instrumentação e acionamento associado.

7.1 Trabalhos Futuros

7.1.1 Controle do Gerador

Os resultados experimentais apresentados neste trabalho foram obtidos com o uso da bancada de testes montada e sem a aplicação de nenhum tipo de controle, ou seja, os resultados foram obtidos em malha aberta.

O rendimento do protótipo testado pode ser otimizado com aplicação de técnicas de controle. O acionamento pode ser controlado através de sua janela de condução e investigações podem ser feitas com o intuito de realizar essa otimização. Testes de comparação de qual técnica de controle podem ser mais bem utilizadas neste tipo de máquina também pode ser realizados.

Aplicação de controle para manutenção da potência gerada ou da tensão gerada pode ser realizada mesmo quando houver variação de velocidade e este controle se torna interessante para a aplicação em geração eólica de energia.

A utilização de técnica neuro-fuzzy pode ser investigada para realizar o acionamento do gerador e pode trazer uma melhoria nos resultados.

7.1.2 Comparação de uma Máquina a Relutância Chaveada Trifásica e uma Máquina a Relutância Chaveada Monofásica

Este trabalho apresentou o Gerador a Relutância Chaveado Trifásico 6×4 e a construção de um protótipo. Juntamente com este projeto foi desenvolvido outro protótipo de um Gerador a Relutância Chaveado Monofásico 6×6 , que resultou em outra Dissertação de Mestrado.

Com os dois protótipos uma comparação pode ser realizada de qual das topologias tem o melhor desempenho pra cada tipo de aplicação. Este trabalho apresenta nas seções de Artigos Publicados e Artigos Aceitos Para Publicação alguns trabalhos iniciais que foram desenvolvidos realizando esta comparação para o a máquina operando no modo gerador.

O trabalho de comparação se torna interessante, pois a máquina a relutância monofásica ainda é pouco conhecida, principalmente no modo gerador, assim realizando esta comparação pode-se determinar em qual aplicação cada máquina tem um melhor rendimento.

Apêndice A

O Apêndice A apresenta as linhas de código utilizadas na S-Function do Matlab.

Linhas de código essas que foram responsáveis pelo acionamento de cada chave do conversor na simulação.

```
function [sys,x0]=GRlookt(t,x,u,flag)
% flag == 0 avalia condicoes iniciais
% flag == 1 retorna derivadas continuas da S-Function
% flag == 2 retorna derivadas discretas da S-Function
% flag == 3 retorna vetor de saida
% flag == 4 retorna tempo do proximo passo discreto
%
% sizes(1) == nro estados cont
% sizes(2) == nro estados discr
% sizes(3) == nro saidas
% sizes(4) == nro entradas
% sizes(5) == nro raizes descontinuas
% sizes(6) == loop algebrico
global teta P tetal teta2 teta3 tetal1 tetal2 tetal3
P=[0 0 0];
if (flag == 0)
% condições iniciais
x0=0;
sys=[1 0 6 1 0 0];
elseif (flag == 1)
    teta=u;
    sys=1;
    % Saídas

elseif (flag == 3)
    theta=((teta/360)-floor(teta/360))*360;

    if (theta > 0 & theta <= 30) | (theta > 90 & theta <= 120) | (theta >
180 & theta <= 210) | (theta > 270 & theta <= 300)
        P=[1 0 0];
        elseif (theta > 60 & theta <= 90) | (theta > 150 & theta <= 180)
| (theta > 240 & theta <= 270) | (theta > 330 & theta <= 360)
            P=[0 1 0];
        elseif (theta > 30 & theta <= 60) | (theta > 120 & theta <= 150)
| (theta > 210 & theta <= 240) | (theta > 300 & theta <= 330)
            P=[0 0 1];

    end
    tetal=teta-50;
    tetal1=((tetal/90)-floor(tetal/90))*90;
    teta2=teta-20;
    tetal2=((teta2/90)-floor(teta2/90))*90;
    teta3=teta-80;
    tetal3=((teta3/90)-floor(teta3/90))*90;

    sys=[P tetal1 tetal2 tetal3];
end
```


Apêndice B

O Apêndice B apresenta os parâmetros da carcaça utilizada. Lembrando que a carcaça utilizada é a 100L.

CARCAÇA	A	AA	AB	AC	AD	B	BA	BB	C	CA	Ponta de eixo dianteira						Ponta de eixo traseira						H	HA	HC	HD	K	L	LC	S1	d1	d2	Rolamentos			
											D	E	ES	F	G	GD	DA	EA	TS	FA	GB	GF											Diant.	Tras.		
63	109	21	116	125	119	80	22	95	40	78	11j6	23	14	4	8.5	4	9j6	20	12	3	7.2	3	63	8	124		7	216	241						6201-ZZ	
71	112	30	132	141	127	90	38	113.5	45	88	14j6	30	18	5	11j6	5	11j6	23	14	4	8.5	4	71	12	139			248	276						6203-ZZ	
80	125	35	149	159	136		40	125.5	50	93	19j6	40	28	6	15.5	6	14j6	30	18		11		80	13	157			276	313						6204-ZZ	
90S						100																					10	304	350						6205-ZZ	
90L	140	38	164	179	155		42	131	56	104	24j6	50	36		20		16j6	40	28	5	13	5	90	15	177			329	375						6204-ZZ	
100L	160	49	188	199	165		50	173	63	118	28j6	60	45	8		7	22j6	50	36	6	18.5	6	100	16	198										6205-ZZ	
112M	190	48	220	222	184	140		177	70	128					24		24j6				20		112	18.5	235	280			376	431						6205-ZZ
132S							55	187																			12		393	448						6206-ZZ
132M						178		225																					452	519						6206-ZZ
132M/L	216	51	248	270	212		72	250							8		28j6	60	45	8	24	7	132	20	274	319			490	557						6207-ZZ
160M						210		254																			14.5		515	582						6209-ZZ
160L	254	64	308	312	255		65	298									42k6				12	37	8	160	22	317	370			598	712					6209-C3
180M						241		298																						642	756					6209-Z-C3
180L	279	80	350	358	275		75	294																						664	782					6211-Z-C3
200M						229		332			110						48k6	110			14	42.5	9	180	28	360	413			702	820					6212-Z-C3
200L	318	82	385	396	300		85	370							16	49	10						200	30	402	464				729	842					6212-Z-C3
225S/M	356	80	436			286		391	149	280	55m6*		100				55m6*		100	16	49	10	225	34	466	537			817	935						
						255		311		255	60m6						60m6													847	995					
250S/M	406		506			312		349		312	60m6*						60m6*																			
						274		349		274	65m6						60m6																			
280S/M	457		557			368		419		350	65m6*						60m6*																			
						299		419		299	75m6						65m6																			
315S/M						376		457		376	65m6*						65m6*																			
						325		457		325	80m6	170	160	22	71	14	65m6																			
315B	182	630	698	590	630	162	830				65m6*	140	125	18	58	11	65m6*																			
						100m6					100m6	210	200	28	90	18																				
355M/L	610	140	750	816	685	560		630		560	65m6*	140	125	18	58	11	60m6*	140	125	18	53	11	355	50	725	834	28		1396	1561						
						388		760		388	100m6	210	200	28	90	16	80m6	170	160	22	71	14														

* Dimensões da ponta de eixo para motores em II pólos.

- A partir da carcaça 160, inclusive, os rolamentos são com folga radial C3.
- Nas carcaças acima de 280 S/M a medida H tem tolerância -1mm.
- Dimensões são normalizadas pela norma NBR 5432, sujeitas a alteração sem aviso prévio.
- Para motores não acendíveis, carcaças somente superiores a 90S.

Referências Bibliográficas

ANDERSON, A. F., Development history, *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*, pp. 6 a 33, Edited by T J Miller, Newness Power Engineering Series, 2001.

BLAABJERG, F., CHEN, Z., TEODORESCO, R., IOV, F., Power electronics in wind turbine systems, *Power Electronics and Motion Control Conference - IPEMC – IEEE*, 2006.

BLAABJERG, F., IOV, F., Wind power – A power source now enabled by power electronics, *9th Brazilian Power Electronics Conference Records*, Blumenau, Brasil, 2007.

BORGES, T. T., Motor a relutância chaveado com controle Fuzzy e detecção indireta de posição, Tese, *Universidade Federal de Uberlândia*, 2002, 183pp..

CARDENAS, R., PEÑA, R., PEREZ, M., ASHER, G., CLARE, J., WHEELER, P., Control system for grid generation of a switched reluctance generator driven by a variable speed wind turbine, *30th Annual Conference of IEEE, Industrial Electronics Society – IECON*, 2004.

CARDENAS, R., PEÑA, R., PEREZ, M., 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, 2005, pp. 781-791.

CHANG, Y. C., LIAW C. M., Establishment of a switched reluctance generator based common DC micro-grid system, *Journal IEEE*.

CHE, H., Implementation of a three-phase switched reluctance generator system for wind power applications, *14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology – IEEE*, 2008.

CHUANG, L., JIAGENG, Y., XUEZHING, Z., LIU, D., Investigation and practice for basic theory of switched reluctance generators, *Proceedings of the Eight International Conference on Electrical Machines and Systems*, Volume 1, 2005, pp. 575-579.

DE PAULA, P. P., DA SILVA, W. M., CARDOSO, J. R., NABETA, S. I., Assessment of the influences of the mutual inductances on switched reluctance machines performance, *International Electric Machines and Drives Conference – IEMDC – IEEE*, 2003.

DIAS, R. J., COELHO, A., FLEURY A., About phases dependence in a switched reluctance generator, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality – ICREPQ*, 2008.

ELBUK, M. E., KANKAM, M. D., Potential starter/generator technologies for future aerospace applications, *Proceedings of the National Aerospace and Electronics Conference, NAECON – IEEE*, Volume 1, 1996, pp. 75-82.

EL-NEMR, M. K., AL-KHAZENDAR, M. A., RASHAD, E. M., HASSANIN, M. A., Modeling and steady-state analysis of switched reluctance generators, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Volume 3, 13-17 Julho 2003.

FAHIMI, B., A switched reluctance machine based starter-generator for more electric cars, *International Electric Machines and Drives, IEMDC – IEEE*, 2001, pp. 73-78.

FAHIMI, B., EMADI, A., SEPE, R. B., A switched reluctance machine-based starter/alternator for more electric cars, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Volume 19, Issue 1, March 2004, pp. 116-124.

FITZGERALD, A. E., KINGSLEY, JR. C., UMANS, S. D., Electric Machinery, *McGraw-Hill Series in Electrical Engineering*, 1990, 585 pp.

FLEURY, A., Modelagem, construção, testes e análise de desempenho de um gerador a relutância chaveado, Tese, *Universidade Federal de Uberlândia*, 2008, 258 pp.

FLEURY, A., CABRAL, L. G., RIBEIRO, F. S. L., ANDRADE, D. A., SILVEIRA, A. W. F. V., Análise do comportamento experimental de um gerador a relutância em regime de velocidade e excitação variáveis, *Congresso Brasileiro de Automática – CBA*, 2008.

FLEURY, A., ANDRADE, D. A., SILVEIRA, A. W. F. V., RIBEIRO, F. S. L., COELHO, A., CABRAL, L. G., Dependence of the switched reluctance generator output on the speed and the excitation voltage, *34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society – IECON*, 2008a.

FLEURY, A., OLIVEIRA, E. S. L., NETO, G. A. C. F., OLIVEIRA, T. F., ANDRADE, D. A., SILVEIRA, A. W. F. V., Comparação de desempenho de três conversores para acionamentos de geradores a relutância chaveados, *Congresso Brasileiro de Automática – CBA*, 2008b.

FLEURY, A., DIAS, R. J., COELHO, A., OLIVEIRA, E. S. L., ANDRADE, D. A., SILVEIRA, A. W. F. V., Gerador a relutância chaveado para energia eólica, *VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais – INDUSCON*, 2008c.

FLEURY, A., ANDRADE, D. A., OLIVEIRA, E. S. L., NETO, G. A. C. F., OLIVEIRA, T. F., DIAS, R. J., SILVEIRA, A. W. F. V., Study on an alternative converter performance for switched reluctance generator, *34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society – IECON*, 2008d.

HAO, C., QIUSHANG, S., A switched reluctance variable speed generator, *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering – CCECE – IEEE*, Volume 1, 2003, pp. 467-470.

HENRIQUES, L. O. A. P., Implementação de estratégia de minimização de oscilações de torque e remoção de sensor de posição para um acionamento de relutância variável usando técnica Neuro-Fuzzy, Tese, *Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE*, 2004.

HWANG, G. R., Modelagem da máquina a relutância chaveada considerando a saturação magnética, Dissertação, *Universidade Federal de Uberlândia*, 2002, 89 pp.

ICHINOKURA, O., KIKUCHI, T., NAKAMURA, K., WATANABE, T., HAI-JIAO, G., Dynamic simulation model of switched reluctance generator, *IEEE Transactions on Magnetics*, Volume 39, Issue 5, Parte 2, Setembro 2003, pp. 3253-3255.

INDERKA, R. B., MENNER, M., DONCHER, R. W. A. A., Control of switched reluctance drives for electric vehicle applications, *IEEE Transactions on industrial electronics*, Volume 49, Issue 1, Fevereiro, 2002.

KRISHNAN, R., Switched reluctance motor drives, modeling, simulation, analysis, design and applications, *Industrial Electronic Series*, Book, 393 pp.

LACHAMAN, T., MOHAMAD, T. D., ONYANGO, G. L. A., Analytical methods for prediction of acoustic noise generation in switched reluctance motors, *Proceedings, IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing*, Volume 1, Outubro 2003, pp. 226-231.

LAWRENSON, P. J., STEPHENSON, J. M., CORDA, J., FULTON, N. N., Variable-speed switched reluctance motors. *Proceedings, IEE Electric Power Applications*, Volume 127, Issue 4, 1980, pp. 253-265.

LEE, J., Structural design optimization of electric motors to improve torque performance, Tese, *University of Michigan*, 2010.

MACMINN, S. R., JONES, W. D., A very high-speed switched-reluctance starter-generator for aircraft engine applications, *Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference – NAECON*, Volume 4, 1989, pp. 1758-1764.

MILLER, T. J. E., Electronic Control of switched reluctance machines, Livro, *Newness Power Engineering Series*, 2001, 272 pp..

RADIMOV, N., BEN-HAIL, N., RABINOVICI, R., Simple model of switched-reluctance machine based only on aligned and unaligned position data, *IEEE Transactions on Magnetics*, Volume 40, Issue 3, Maio 2004, pp. 1562-1572.

RADUN, A., Generating with the switched reluctance motor, *9th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC*, Volume 1, 1994, pp. 41-47.

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, Agosto 1999, pp. 774-781.

SAWATA, T., The switched reluctance generator, *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*, Edited by T J E Miller, *Newness Power Engineering Series*, 2001, pp. 237-250.

SILVEIRA, A. W. F. V., ANDRADE, D. A., FLEURY, A., GOMES, L. C., BISSOCHI, C. A., Control of the SRM operating as a motor/generator, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE*, 5-8 Julho, 2009.

SKVARENINA, T. L., PEKAREK, S., WASYNCZUK, O., KRAUSE, P. C., THIBODEAUX, R. J., WEIMER, J., Simulation of a switched reluctance, more electric air craft power system using a graphical user interface, *Proceedings of the 32nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, IECE*, Volume 1, 27 de Julho - 1 Agosto, 1997, pp. 580-584.

TEIXEIRA, V. S. C., Projeto de motores a relutância variável e ferramenta computacional para determinação das características estáticas da máquina, Dissertação, *Universidade Federal do Ceará*, 2008.

TORREY, D. A., Switched reluctance generators and their control, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume 49, Issue 1, Fevereiro 2002, pp. 3-14.

Artigos Relacionados ao Trabalho

Publicados

OLIVEIRA, E. S. L., AGUIAR, M. L., COELHO, A., Simulação de um sistema completo de gerador a relutância chaveado monofásico em ambiente Matlab, *Congresso Brasileiro de Automática – CBA, Bonito – MS, Brasil*, 2010.

OLIVEIRA, E. S. L., COELHO A., AGUIAR, M. L., Simulação de um gerador a relutância chaveado monofásico para aplicações especiais, *XIV Congreso Latino Americano de Automática, XIX Congreso de La Asociación Chilena de Control Automático – ACCA, Santiago, Chile*, 2010.

OLIVEIRA, E. S. L., COELHO, A., AGUIAR, M. L., Gerador a relutância chaveado monofásico aplicado em sistema híbrido eólico-fotovoltaico descentralizado, *2010 IEEE/PES Transmission & Distribution Latin America, São Paulo – SP, Brasil*, 2010.

COELHO, A., OLIVEIRA, E. S. L., AGUIAR, M. L., Comparação de geradores a relutância chaveado monofásico e trifásico em ambiente Matlab, *2010 IEEE/PES Transmission & Distribution Latin America, São Paulo – SP, Brasil*, 2010.

Aprovados Para Publicação

COELHO, A., OLIVEIRA, E. S. L., AGUIAR M. L., SUETAKE, M., Comparação Experimental de um Gerador a Relutância Chaveado Trifásico e um Gerador a Relutância Chaveado Monofásico, *9th Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE*.

OLIVEIRA, E. S. L., COELHO, A., AGUIAR M. L., SUETAKE, M., Desenvolvimento de um Gerador a Relutância Variável Monofásico Para Energia Eólica, *9th Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE*.

COELHO, A., OLIVEIRA, E. S. L., SUETAKE, M., AGUIAR M. L., Experimental Performance Comparison Between Single-phase and Three-phase Switched Reluctance Generator, *XI Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP*.

OLIVEIRA, E. S. L., COELHO, A., SUETAKE, M., AGUIAR M. L., Investigations on Single-phase Switched Reluctance Generator Under Variable Speed Operations, *XI Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP*.

COELHO, A., OLIVEIRA, E. S. L., SUETAKE, M., AGUIAR M. L., Comparação de um Gerador a Relutância Chaveado Trifásico e um Gerador a Relutância Chaveado Monofásico em Ambiente Matlab, *IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética – CBEE*.

OLIVEIRA, E. S. L., COELHO, A., SUETAKE, M., AGUIAR M. L., Modelagem Computacional de um Gerador a Relutância Chaveado Monofásico Considerando a Saturação Magnética, IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética – CBEE.