

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO

**POTENCIALIZAÇÃO DO RENDIMENTO DO
GERADOR A RELUTÂNCIA CHAVEADO
EMPREGANDO TÉCNICA DE RASTREAMENTO
ASSOCIADA A CONTROLE DE TENSÃO OTIMIZADO**

Wanderson Rainer Hilário de Araújo

[UFG] & [EMC]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
16/12/2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

☐ Dissertação ☒ Tese

2. Nome completo do autor

Wanderson Rainer Hilário de Araújo

3. Título do trabalho

"Potencialização do Rendimento do Gerador a Relutância Chaveado Empregando Técnica de Rastreamento Associada a Controle de Tensão Otimizado"

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM ☐ NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Wesley Pacheco Calixto, Usuário Externo**, em 18/01/2021, às 09:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **WANDERSON RAINER HILÁRIO DE ARAÚJO, Discente**, em 18/01/2021, às 13:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1808310** e o código CRC **132D59BB**.

Referência: Processo nº 23070.052999/2020-04

SEI nº 1808310

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO

**POTENCIALIZAÇÃO DO RENDIMENTO DO
GERADOR A RELUTÂNCIA CHAVEADO
EMPREGANDO TÉCNICA DE RASTREAMENTO
ASSOCIADA A CONTROLE DE TENSÃO OTIMIZADO**

Wanderson Rainer Hilário de Araújo

Tese apresentada à Banca Examinadora como exigência parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e de Computação pela Universidade Federal de Goiás (UFG), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), sob a orientação do Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto

[UFG] & [EMC]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
16/12/2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Araújo, Wanderson

Potencialização do Rendimento do Gerador a Relutância Chaveado
Empregando Técnica de Rastreamento Associada a Controle de
Tensão Otimizado [manuscrito] / Wanderson Araújo. - 2020.
CXXX, 130 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Wesley Calixto.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de
Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2020.
Bibliografia.

Inclui abreviaturas, símbolos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Gerador a relutância chaveado. 2. Otimização. 3. Técnica de
rastreamento. 4. Algoritmo genético. 5. Controle de tensão. I. Calixto,
Wesley, orient. II. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata nº 10/2020 da sessão de Defesa de Tese de Wanderson Rainer Hilário de Araújo que confere o título de Doutor em **Engenharia Elétrica e de Computação**, na área de concentração em **Engenharia Elétrica**.

Aos **dezesesseis dias do mês de dezembro de dois mil e vinte**, a partir das **14h00min.**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada **“Controle Otimizado do Gerador a Relutância Chaveado Associado a Técnica de Rastreamento para Potencialização do Rendimento”**. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Wesley Pacheco Calixto** (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof Dr. **Antônio Paulo Mendes Breda Dias Coimbra** (FEEC/UC-Portugal), membro titular externo; Prof. Dr. **Luiz Eduardo Bento Ribeiro** (ENGPROD/IFG), membro titular externo, Prof. Dr. **Marcos Antônio de Sousa** (ENG/PUCGoiás) membro titular externo e Prof. Dr. **Marco Antonio Assfalk de Oliveira** (EMC/UFG) membro titular externo ao programa, **cujas participações ocorreram através de videoconferência**. Durante a arguição os membros da banca **fizeram** sugestão de alteração do título do **trabalho**. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Wesley Pacheco Calixto, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **dezesesseis dias do mês de dezembro de dois mil e vinte**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

"Potencialização do Rendimento do Gerador a Relutância Chaveado Empregando Técnica de Rastreamento Associada a Controle de Tensão Otimizado"



Documento assinado eletronicamente por **Wesley Pacheco Calixto**, **Usuário Externo**, em 19/01/2021, às 18:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Eduardo Bento Ribeiro**, **Usuário Externo**, em 20/01/2021, às 00:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **WANDERSON RAINER HILÁRIO DE ARAÚJO**, **Discente**, em 20/01/2021, às 14:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1813507** e o código CRC **58174DC6**.

*"Sometimes you wake up. Sometimes the fall kills you. And
sometimes, when you fall, you fly".*

NEIL GAIMAN
em *"Fables & Reflections"*, 1993.

*Dedico este trabalho à minha esposa Ana Carolina e ao meu
filho João. Este trabalho também é de vocês.*

AGRADECIMENTOS

Considerando a longa e difícil jornada para chegar até aqui, é possível que eu, injustamente, esqueça de mencionar alguém que tenha contribuído de alguma forma com a conclusão deste trabalho. Porém, tentarei ser atento e justo em meus agradecimentos. O primeiro vai para meus pais, Antônio Roberto de Araújo e Maria Aparecida Hilário de Araújo, pessoas que embora tenham sido formadas na simplicidade, nunca pouparam esforços para me encorajar e manter minha persistência nos estudos.

Um agradecimento especial ao professor, orientador e amigo, Wesley Pacheco Calixto, que, a partir de um altruísmo sem limites, não poupa esforços para ajudar a quem precisa, especialmente no campo da ciência e da tecnologia, apesar das inúmeras adversidades enfrentadas pela ciência brasileira.

Agradeço imensamente ao amigo Márcio Rodrigues da Cunha Reis, cujo brilhantismo despertou e avançou em elevadas e positivas taxas de variação. Sua contribuição neste e em demais trabalhos que já realizei é explícita e indispensável. Em se tratando de colegas de pesquisa, um agradecimento não poderia faltar a Viviane Margarida Gomes, a qual contribuiu substancialmente com a análise de sensibilidade presente neste trabalho.

Agradeço a PUC Goiás, por abrigar toda a plataforma experimental utilizada nesta pesquisa. Um agradecimento ao amigo e parceiro de trabalho Fábio Manoel Sá Simões, pelo exemplo de profissional e dedicação na formação profissional de engenheiros e, também, ao grande mestre Augusto Fleury Veloso da Silveira (in memoriam), professor na graduação e na vida. Seus ensinamentos serão levados para sempre.

Agradeço a UFG, por ofertar à sociedade este programa de pós-graduação e contribuir com o desenvolvimento da nação.

RESUMO

Este trabalho apresenta a potencialização do rendimento do Gerador a Relutância Chaveado (GRC) submetido ao controle da tensão de saída. O rendimento é potencializado empregando técnica de rastreamento atuando nos ângulos de chaveamento do conversor de potência. Por se tratar de uma máquina CC, o controle da tensão de saída é aplicado para adequar este valor a sistemas de conversão CC-CA e a controladores de carga. O controlador PID é empregado e, por se tratar de um controlador de apenas uma saída, outras grandezas não são contempladas pela atuação do controlador. Neste trabalho, há o interesse em potencializar o rendimento do GRC para tornar este tipo de máquina mais atrativo para geração de energia elétrica em sistemas distribuídos e em instalações sem conexão com a rede de distribuição principal. Sendo assim, paralelamente ao controlador PID é aplicada uma técnica de rastreamento para o rendimento do GRC com algoritmo de perturba e observa. Outros procedimentos são apresentados como a obtenção de uma superfície de indução para aprimorar as modelagens matemática e computacional do gerador, além do desenvolvimento de um sistema de detecção indireta de conjugado. Resultados de simulação e experimentais são apresentados para validação e discussão do estudo proposto.

Palavras chave: Gerador a relutância chaveado, Otimização, Técnica de rastreamento, Algoritmo genético, Controle de tensão.

EFFICIENCY ENHANCING OF THE SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR USING TRACKING TECHNIQUE ASSOCIATED WITH OPTIMIZED VOLTAGE CONTROL

ABSTRACT

This work presents the potentialization of the efficiency of the Switched Reluctance Generator (GRC) submitted to the control of the output voltage. The efficiency is enhanced by using tracking technique acting on the switching angles of the power converter. As it is a DC machine, the control of the output voltage is applied to adapt this value to DC-AC conversion systems and load controllers. The PID controller is used and, because it is a controller with only one output, other quantities are not contemplated by the performance of the controller. In this work, there is an interest in enhancing the performance of the GRC to make this type of machine more attractive for generating electricity in distributed systems and in installations without connection to the main distribution network. Therefore, in parallel to the PID controller, a tracking technique is applied to the GRC performance with a disturb and observe algorithm. Other procedures are presented, such as obtaining an inductance surface to improve the mathematical and computational modeling of the generator, in addition to the development of an indirect conjugate detection system. Simulation and experimental results are presented for validation and discussion of the proposed study.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	27
CAPÍTULO 2 GERADOR A RELUTÂNCIA CHAVEADO	35
2.1 Histórico das Máquinas de Relutância Chaveadas	35
2.2 Aplicação das Máquinas de Relutância Chaveadas	35
2.3 Características Construtivas	38
2.4 Princípio de Funcionamento	40
2.5 Conversor de Potência	41
2.6 O Gerador a Relutância Chaveado no Contexto da Energia Eólica	44
2.7 Considerações Finais	49
CAPÍTULO 3 MODELAGEM DO GERADOR A RELUTÂNCIA CHAVEADO	51
3.1 Modelo Matemático do Gerador a Relutância Chaveado	51
3.2 Simulação do Gerador a Relutância Chaveado	56
3.3 Considerações Finais	61
CAPÍTULO 4 PROCESSOS DE OTIMIZAÇÃO	63
4.1 Problemas de Otimização	63
4.2 Métodos Determinísticos de Otimização	65
4.3 Métodos Heurísticos de Otimização	66
4.3.1 Algoritmo Genético	67
4.4 Regressão Paramétrica	69
4.5 Análise de Sensibilidade	70
4.6 Considerações Finais	72

CAPÍTULO 5 METODOLOGIA	73
5.1 Projeto e Desenvolvimento da Plataforma Experimental	73
5.2 Elaboração e Validação do Modelo Computacional	76
5.3 Projeto e Construção do Sistema de Detecção Indireta de Conjugado	79
5.4 Avaliação da Janela de Condução do Conversor de Potência	81
5.5 Análise de Sensibilidade das Variáveis de Controle e Acionamento do GRC	83
5.6 Otimização do Controlador de Tensão do GRC	84
5.7 Avaliação das Variáveis Manipuladas no Controle de Tensão do GRC	85
5.8 Desenvolvimento da Técnica de Rastreamento para Potencialização do Rendimento do GRC	86
5.9 Considerações Finais	87
CAPÍTULO 6 RESULTADOS	89
6.1 Apresentação da Plataforma Experimental Desenvolvida	89
6.2 Resultados de Simulação para Validação do Modelo Computacional	91
6.3 Resultados Experimentais e de Simulação para Validação do Sistema de Detecção Indireta de Conjugado	98
6.4 Resultados de Simulação para Avaliação da Janela de Condução do Con- versor de Potência	101
6.5 Resultados Referentes aos Índices de Sensibilidade dos Parâmetros do GRC	102
6.6 Resultados Experimentais e de Simulação para Avaliação da Otimização do Controlador PID de Tensão do GRC	105
6.7 Levantamento de Superfícies para Indicação da Variável Manipulada mais Favorável ao Controle	108
6.8 Resultados Experimentais e de Simulação para Avaliação de Desempenho da Técnica de Rastreamento para Potencialização do Rendimento do GRC	110
6.9 Discussão	114
CAPÍTULO 7 CONCLUSÃO	117
7.1 Contribuições do Trabalho	118
7.2 Trabalhos Futuros	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Publicações em periódicos e conferências do IEEE relacionadas ao gerador a relutância chaveado.	30
2.1 Pacotes de lâminas do estator e do rotor da máquina de relutância chaveada.	38
2.2 (a) Corte transversal da máquina de relutância chaveada 6×4 . (b) Linhas de fluxo do circuito magnético formado como resultado da energização de uma das fases da máquina de relutância chaveada.	39
2.3 Comportamento da indutância de uma das fases em função da posição angular θ	40
2.4 Esquemático do conversor <i>AHB</i>	42
2.5 Etapas de acionamento de uma das fases da máquina.	43
2.6 Ilustração do comportamento da corrente e da tensão na bobina para as etapas de acionamento.	44
2.7 Esquemático do conversor <i>AHB</i> para acionamento da máquina como gerador.	45
2.8 Integração máquina elétrica/caixa de transmissão do sistema eólico. . . .	46
2.9 Atlas brasileiro do potencial solar.	47
2.10 Atlas brasileiro do potencial eólico.	48
3.1 Comportamento do fluxo concatenado em função da corrente e da posição angular do rotor.	52
3.2 Circuito elétrico equivalente de uma fase do GRC.	52
3.3 Curva de magnetização típica para uma fase do GRC.	54
3.4 Diagrama básico do sistema de simulação.	56
3.5 Comportamento senoidal das indutâncias por fase - modelo linear.	59
3.6 Representação da indutância da bobina de uma das fases do GRC considerando vários segmentos de reta.	60
3.7 Comportamento dinâmico da indutância das bobinas para o modelo de representação pela série de Fourier com interpolação.	61
3.8 Ilustração da superfície de indutância com conjunto de pontos levantados experimentalmente.	62
4.1 Pontos ótimos locais e globais para função de duas dimensões.	65
4.2 Fluxograma do funcionamento do algoritmo genético.	68

4.3	Fluxograma do procedimento para identificação de sistema.	69
4.4	Diagrama do processo de otimização da regressão paramétrica.	70
4.5	Áreas para análise de sensibilidade de parâmetros.	71
5.1	Diagrama em blocos da plataforma experimental a ser desenvolvida. . . .	74
5.2	Conversor de potência para excitação do GRC.	75
5.3	Conversor $CA - CC$ controlado para excitação do gerador.	76
5.4	Circuito para levantamento dos pontos de indutância.	77
5.5	Diagrama do sistema para detecção indireta de conjugado.	80
6.1	Fotografia da bancada conjunto experimental desenvolvido.	89
6.2	Esquemático do circuito driver para integração do controlador com os IGBT do conversor AHB.	90
6.3	Superfície experimental de indutância do GRC.	92
6.4	Superfície contínua de indutância em comparação com a superfície expe- rimental.	93
6.5	Resultado de simulação: indutância, comando lógico de chaveamento, tensão e corrente em uma das bobinas do GRC.	95
6.6	Comparação dos resultados experimentais com os resultados do modelo computacional em malha aberta para $\alpha = 100^\circ$ e $V_1 \approx 143 \text{ V}$	96
6.7	Comparação dos resultados experimentais com os resultados do modelo computacional em malha aberta para $\alpha = 110^\circ$ e $V_1 \approx 202 \text{ V}$	97
6.8	Comparação dos resultados experimentais com os resultados do modelo computacional em malha aberta para $\alpha = 120^\circ$ e $V_1 \approx 267 \text{ V}$	98
6.9	Avaliação das grandezas mecânicas do modelo computacional em compa- ração com resultados experimentais (excitação de 100 V) (a) Conjugado (b) Rendimento.	99
6.10	Avaliação das grandezas mecânicas do modelo computacional em compa- ração com resultados experimentais (excitação de 150 V) (a) Conjugado (b) Rendimento.	100
6.11	Resultado de simulação para a varredura do ângulo θ_{ON} (a) Potências do GRC (b) Rendimento e oscilação de conjugado.	101
6.12	Sensibilidade da potência gerada perante às variações de V_1 , θ_{OFF} e ω . .	103
6.13	Sensibilidade do rendimento gerada perante às variações de V_1 , θ_{OFF} e ω .	103
6.14	Sensibilidade da oscilação de conjugado gerada perante às variações de V_1 , θ_{OFF} e ω	104

6.15	Repota do controlador PID de tensão empregando V_1 como variável manipulada (referência de 80 V). (a) Resultado de Simulação (b) Resultado Experimental.	106
6.16	Repota do controlador PID de tensão empregando V_1 como variável manipulada (referência de 100 V). (a) Resultado de Simulação (b) Resultado Experimental.	107
6.17	Repota do controlador PID de tensão empregando V_1 como variável manipulada (referência de 120 V). (a) Resultado de Simulação (b) Resultado Experimental.	107
6.18	Superfícies obtidas via simulação para o controlador PID atuando em V_1 e em θ_{OFF} . (a) Tensão gerada V_2 . (b) Tensão de excitação V_1	108
6.19	Superfícies obtidas via simulação para o controlador PID atuando em V_1 e em θ_{OFF} . (a) Rendimento η . (b) Oscilação de conjugado T_R	109
6.20	Resultado de simulação para referência de 100 V: (a) Evolução dos ângulos θ_{ON} e θ_{OFF} com o algoritmo MEPT (b) Desempenho do controlador de tensão em paralelo com o algoritmo MEPT.	110
6.21	Resultados de simulação e experimental para referência de 100 V (a) Resultado de simulação: elevação do rendimento com o algoritmo MEPT (b) Resultado experimental: desempenho do controlador e rendimento do GRC.	111
6.22	Resultado de simulação para referência de 120 V: (a) Evolução dos ângulos θ_{ON} e θ_{OFF} com o algoritmo MEPT (b) Desempenho do controlador de tensão em paralelo com o algoritmo MEPT.	112
6.23	Resultados de simulação e experimental para referência de 120 V (a) Resultado de simulação: elevação do rendimento com o algoritmo MEPT (b) Resultado experimental: desempenho do controlador e rendimento do GRC.	113
6.24	Resultado de simulação para referência de 140 V: (a) Evolução dos ângulos θ_{ON} e θ_{OFF} com o algoritmo MEPT (b) Desempenho do controlador de tensão em paralelo com o algoritmo MEPT.	113
6.25	Resultados de simulação e experimental para referência de 140 V (a) Resultado de simulação: elevação do rendimento com o algoritmo MEPT (b) Resultado experimental: desempenho do controlador e rendimento do GRC.	114

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
5.1 Valores utilizados na Análise de Sensibilidade.	83
6.1 Características da máquina simulada.	94
6.2 Índices de sensibilidade das variáveis do GRC.	104
6.3 Parâmetros do controlador PID de tensão que emprega V_1 como variável manipulada.	105
6.4 Parâmetros do controlador PID de tensão que emprega θ_{OFF} como variável manipulada.	105

LISTA DE SÍMBOLOS

C_R	–	Passo polar do rotor
η	–	Rendimento total do gerador a relutância chaveado
λ	–	Fluxo concatenado da bobina
θ	–	Posição angular do rotor
θ_{OFF}	–	Ângulo de desligamento das bobinas
θ_{ON}	–	Ângulo de acionamento das bobinas
θ_D	–	Janela de condução do conversor de potência
ρ	–	Densidade do ar
ω	–	Velocidade angular do rotor
A_S	–	Área da seção transversal do rotor da turbina eólica
B	–	Indução Magnética
C_P	–	Coeficiente de potência do gerador eólico
D	–	Coeficiente de atrito
e	–	Força contraeletromotriz
f	–	Frequência da rede elétrica
f_x	–	Função de avaliação dos processos de otimização
FA	–	Fase A do Gerador a Relutância Chaveado
FB	–	Fase B do Gerador a Relutância Chaveado
FC	–	Fase C do Gerador a Relutância Chaveado
H	–	Intensidade de Campo Magnético
i	–	Corrente elétrica
I_1	–	Corrente de entrada (excitação) do Gerador a Relutância Chaveado
I_2	–	Corrente de saída (geração) do Gerador a Relutância Chaveado
J	–	Momento de inércia
k_d	–	Ganho derivativo do controlador
kg	–	Quilograma
k_i	–	Ganho integral do controlador
k_p	–	Ganho proporcional do controlador
L	–	Indutância
L_0	–	Componente contínua (CC) da indutância
L_a	–	Indutância na posição de alinhamento dos polos
L_{MAX}	–	Valor máximo (pico) da indutância do gerador
L_{MIN}	–	Valor mínimo (vale) da indutância do gerador
L_n	–	Componente harmônica da indutância do gerador
L_u	–	Indutância na posição de desalinhamento dos polos
N_e	–	Número de polos do estator
N_r	–	Número de polos do rotor
P_1	–	Potência elétrica de entrada (excitação) do Gerador a Relutância Chaveado
P_2	–	Potência elétrica de saída (geração) do Gerador a Relutância Chaveado
P_{mec}	–	Potência mecânica de entrada do Gerador a Relutância Chaveado
P_R	–	Número de polos do rotor do Gerador a Relutância Chaveado
R_E	–	Resistência das bobinas do estator do Gerador a Relutância Chaveado

t	–	Tempo
T_M	–	Conjugado total
T_{EM}	–	Conjugado Eletromagnético
T_R	–	Nível de oscilação de conjugado
V_1	–	Tensão de entrada (excitação) do gerador
V_2	–	Tensão de saída (geração) do gerador
W_{CO}	–	Coenergia

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	–	Algoritmo Genético
AHB	–	<i>Assymmetric Half Bridge</i> - Conversor em Meia Ponte Assimétrica
ANEEL	–	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	–	Corrente Alternada
CC	–	Corrente Contínua
GRC	–	Gerador a Relutância Chaveado
IEEE	–	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IGBT	–	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> - Transistor Bipolar de Porta Isolada
LWT	–	<i>Large Wind Turbine</i> - Turbina Eólica de Grande Porte
MEPT	–	<i>Maximum Efficiency Point Tracking</i> - Rastreamento do ponto de máximo rendimento
MIT	–	Motor de Indução Trifásico
MPPT	–	<i>Maximum Power Point Tracking</i> - Rastreamento do ponto de máxima potência
PID	–	Proporcional, Integral e Derivativo
PROINFA	–	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
PWM	–	<i>Pulse Width Modulation</i> - Modulação por Largura de Pulso
rpm	–	Rotações por minuto
SCR	–	<i>Silicon Controlled Rectifier</i> - Retificador Controlado de Silício
SRG	–	<i>Switched Reluctance Generator</i> - Gerador a Relutância Chaveado
SRM	–	<i>Switched Reluctance Motor</i> - Motor a Relutância Chaveado
SWT	–	<i>Small Wind Turbine</i> - Turbina Eólica de Pequeno Porte

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica a partir da queima de combustíveis fósseis é apontada frequentemente como uma das principais causas de impactos negativos ao ambiente, sobretudo o aquecimento global. Além disto, recursos como o petróleo, gás natural e carvão possuem escassez de reservas que servirão a humanidade não mais que 200 anos ([MURAHARA; SEKI, 2008](#)).

Por outro lado, a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis possui destaque na comunidade científica internacional, especialmente nos últimos anos. O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers* - IEEE), uma das maiores entidades profissionais do mundo, possui base de dados composta por publicações em periódicos e em conferências que é integrada por mais de 11.000 estudos relacionados à energia eólica entre os anos de 2000 e 2017. Números semelhantes são apresentados para pesquisas relacionadas à energia solar (mais de 7.000) e à geração distribuída.

A característica não poluente associada ao caráter não esgotável das fontes renováveis as tornam recursos promissores para o futuro. Além disto, expectativas são depositadas em tais fontes considerando a possibilidade de utilização das mesmas para geração de energia descentralizada ([SAKAKIBARA et al., 2015](#); [REN et al., 2014](#); [FELGNER et al., 2014](#)). Esta característica pode proporcionar sistema resiliente no que diz respeito a acidentes que ocorrem com centrais elétricas concentradas em territórios reduzidos. Este aspecto é positivo, especialmente em países como o Japão, onde onerosos sistemas centralizados de grande porte podem ocasionar desastres ambientais ([SOGABE et al., 2016](#)).

Uma das principais fontes de energias renováveis é a eólica, que é produzida por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação e está permanentemente disponível. Os parques eólicos são conjuntos de centenas de geradores individuais ligados a rede de transmissão de energia elétrica (*on-grid*) ou em áreas isoladas (*off-grid*) ([VITTAL VIJAY; AYYANAR, 2013](#)). A instalação da geração eólica pode ser em terra (*onshore*) ou no mar (*offshore*). O custo de instalação do sistema *offshore* é elevado quando comparado ao custo de instalação do sistema *onshore*, no entanto, a geração através do sistema *offshore* é maior e pode ser utili-

zada por países com pequenas extensão territorial (HEIER, 2014). Na transformação da energia cinética de translação em energia cinética de rotação e depois da energia cinética de rotação em energia elétrica, são empregadas máquinas elétricas, com preferência para as que podem operar com velocidade variável.

Dentre as publicações que apontam a direção das pesquisas relacionadas a máquina elétrica com velocidade variável, Shin e Lee (2016) apresentam técnica de otimização utilizando algoritmo genético, para o projeto do gerador a relutância chaveado (GRC), de forma a potencializar parâmetros como rendimento, potência de saída e velocidade nominal, minimizando perdas no cobre e no material magnético, melhorando a densidade de potência, em W/kg . Ainda sobre o projeto do GRC, porém com aplicações mais específicas, Lafoz et al. (2016) apresentam o projeto e o acionamento do GRC para altas velocidades, visando a aplicação da máquina em aeronaves. Barros et al. (2017) apresentam a aplicação do GRC de 2 kW para geração eólica empregando controle por modos deslizantes, possibilitando a geração de energia elétrica para ampla faixa de velocidade.

Várias pesquisas são concentradas no controle do GRC, possibilitando o controle de tensão ou potência de saída, controle sobre a injeção de potência na rede, entre outros. Osorio et al. (2016) apresentam o controle da tensão de saída do GRC empregando a técnica de modos deslizantes e Dou et al. (2016) apresentam o controle da potência de saída do GRC empregando a relação entre esta grandeza, a velocidade rotórica e o ângulo de acionamento das bobinas, possibilitando o controle associado à elevação do rendimento do gerador. Fernandes et al. (2016) associam o controle do GRC com a técnica de rastreamento de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT) e Vujicic e Calasan (2016) implementam o controle do gerador empregando a técnica de acionamento sem sensor (*sensorless*), efetuando a estimativa de parâmetros para a identificação da posição instantânea do rotor.

Rahmanian et al. (2017) empregam o GRC em sistema de geração de energia com conexão à rede, utilizando a técnica de MPPT juntamente com redes neurais e lógica *Fuzzy*. Saraiva et al. (2017) desenvolvem estudo sobre o acionamento da máquina de relutância chaveada operando como gerador. Os autores demonstram que o sistema possui dependência com os parâmetros de acionamento: i) tensão de excitação e ii) ângulos de chaveamento das bobinas, impactando diretamente na potência gerada, quando acionado como gerador. Mishra e Singh (2016) descrevem estudos do acionamento da máquina a relutância chaveada excitada por fonte solar fotovoltaica, com

a máquina sendo utilizada em sistema de bombeamento. Em relação ao controle da potência gerada, o estudo desenvolvido por [Reis et al. \(2015\)](#) indica direcionamento para a variável manipulada no controle, uma vez que no estudo em questão, o controle de velocidade da máquina de relutância chaveada operando como motor através da tensão de excitação, proporciona melhores valores de rendimento se comparado ao controle através do chaveamento.

O GRC apresenta como principais características: i) baixo custo, ii) construção simples e robusta, iii) possui independência das bobinas das fases (tolerante a falhas), iv) pode operar em ampla faixa de velocidade e v) possui alta densidade de potência. Estas características têm potencializado as investigações do uso do gerador para aplicações de geração de energia elétrica em diversos tipos de sistemas. Os estudos relacionados à melhoria do acionamento e do controle do gerador são explorados em [Reis et al. \(2017\)](#), onde técnicas de otimização são aplicadas a um dos parâmetros de acionamento do gerador de forma a elevar o rendimento do mesmo. A característica relacionada à elevada densidade de potência é alcançada quando a máquina opera na região de saturação. Porém, requisitos de conjugado de saída, na operação como motor, torna-se necessária a determinação de perfis de corrente adequados, ao invés do perfil retangular convencional. [Xu et al. \(2002\)](#) apresentam otimização multiobjetivo de forma a se obter perfis de corrente para a máquina operando como motor. O estudo apresentado por [Liu et al. \(2015\)](#) aplica a otimização, especialmente o algoritmo genético, ao controlador por modos deslizantes em motor de arranque-alternador.

Em relação ao uso específico em sistemas de geração de energia, [Mohseni et al. \(2012\)](#) empregam o algoritmo genético em sistema de rastreamento de máxima potência do GRC, destacando as vantagens deste tipo de máquina elétrica sobre as máquinas convencionais empregadas para geração eólica, como o gerador de indução duplamente excitado e o gerador de indução a ímã permanente.

O cenário atual tem despertado o interesse da comunidade científica no que diz respeito à geração de energia, principalmente em tecnologias que permitam a geração de energia elétrica associada à minimização de emissão de poluentes ([REN et al., 2010](#); [VASSALLO et al., 2015](#)). Neste contexto, o gerador a relutância chaveado (GRC) tem se promovido e se destacado como dispositivo de conversão de energia adequado para alguns sistemas de geração. Na base de dados do IEEE, são apontadas 343 publicações em conferências e periódicos com o termo *Switched Reluctance Generator*

entre os anos 1995 e 2020. A Fig. 1.1 ilustra o crescimento das publicações relacionadas ao GRC a partir de 2010. Nesta mesma base, são apontadas mais de 3.800 publicações em conferências e periódicos com o termo *Switched Reluctance Machine*. O crescimento acentuado ocorre também com a quantidade de patentes registradas relacionadas à máquina de relutância chaveada (NASSEREDDINE, 2011). Tais pesquisas alavancaram os projetos das máquinas de relutância chaveadas, inserindo este tipo de máquina elétrica no mercado de dispositivos de velocidade variável.

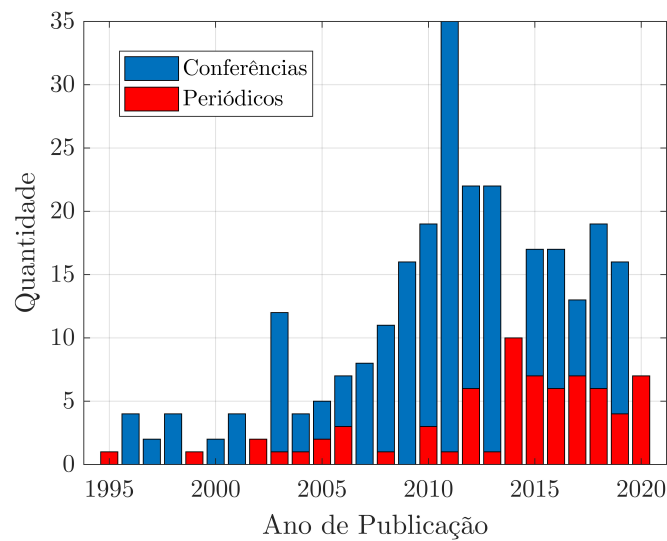


Figura 1.1 - Publicações em periódicos e conferências do IEEE relacionadas ao gerador a relutância chaveado.

No cenário nacional, os sistemas de geração de energia elétrica isolados e caracterizados como microgeração, são objetos de investimentos amparados por programas do governo federal como o Programa Luz para Todos e o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA). Estes sistemas contribuem positivamente com o Programa Luz para Todos, criado em 2003 com o objetivo de atender 10 milhões de pessoas residentes em áreas rurais e/ou remotas até 2008. Coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, o Programa Luz para Todos sofreu prorrogações que se estenderam até 2018, com o intuito de atender escolas rurais, populações localizadas em áreas de extrema pobreza, quilombolas, indígenas, assentamentos, ribeirinhos, pequenos agricultores, famílias em reservas extrativistas e afetadas por empreendimentos do setor elétrico, além de poços de água comunitários (ENERGIA, 2014). Além disto, o alcance do Programa Luz para Todos apresenta resultado no qual

50% de sua execução está localizada nos estados da região nordeste, principalmente na Bahia, onde, conforme o atlas eólico deste estado, possui regiões com ventos cuja velocidade média anual atingem 5 m/s , favoráveis à geração eólica para torres com alturas acima de 10 metros. Nestas mesmas localidades, o atlas solar brasileiro indica potencial energético para integração com a energia eólica, possibilitando o desenvolvimento de sistemas isolados para atendimento a áreas remotas associado a diversificação da matriz energética brasileira e geração de energia limpa. Tais dados são apresentados por estudos realizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), nos quais é possível observar a intersecção dos potenciais eólico e solar no território brasileiro, sobretudo em regiões onde os programas de eletrificação estão mais concentrados, o que estabelece quadro favorável para a exploração de tecnologias que beneficiem tais condições para a geração de energia elétrica.

O PROINFA, criado em 2002 com o objetivo de aumentar a participação de fontes renováveis na matriz energética nacional, impulsionou aumento na geração renovável no país, principalmente a energia eólica, garantindo ao investidor a contratação do montante energético por 20 anos por parte da Eletrobrás. Tal incentivo permitiu que a matriz energética brasileira seja integrada atualmente por mais de 10 GW instalados em parques eólicos, representando 7,1 % da matriz energética brasileira.

Desta forma, este quadro estabelece cenário favorável para a busca de sistemas que favoreçam a geração de energia renovável, especialmente no que diz respeito a unidades de microgeração isoladas. O foco na energia eólica traz benefícios para a sociedade e para a matriz energética brasileira, sobretudo os estudos relacionados ao controle da geração, à associação à energia solar fotovoltaica e à potencialização das máquinas geradoras.

Considerando o avanço das pesquisas relacionadas às fontes renováveis de energia como a energia solar fotovoltaica e a energia eólica, bem como o crescente interesse da comunidade científica sobre a máquina de relutância chaveada operando como gerador, este estudo busca a exploração deste tipo de máquina elétrica, bem como seu acionamento e controle, de forma a associar o GRC à excitação por energia solar fotovoltaica e geração de energia elétrica a partir de energia mecânica proporcionada por turbinas eólicas, possibilitando o desenvolvimento de centrais de microgeração. Este trabalho se justifica na análise dos parâmetros de acionamento e controle do GRC de forma a acionar e controlar o gerador potencializando o rendimento, garantindo a geração de energia elétrica e intensificando o uso das fontes renováveis em

sistemas de microgeração isolados.

Desta forma, para se alcançar os resultados da investigação proposta, propõe-se a hipótese: se há a possibilidade de acionar e controlar o GRC e empregar alguma técnica de rastreamento que possa contribuir positivamente com a elevação do rendimento do gerador. O interesse na potencialização do rendimento surge devido ao fato de que máquinas com melhores rendimentos favorecem tais sistemas de geração distribuída.

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema que permita controlar a tensão de saída do GRC paralelamente a uma técnica de rastreamento que possa elevar o rendimento do gerador. O rastreamento é empregado paralelamente ao controle de tensão uma vez que o controlador PID é um sistema SISO (*Single Input Single Output*). Por esta razão o rastreamento é necessário de forma adicional ao controlador. Ainda como objetivos, destacam-se: i) desenvolvimento de modelo para a representação das indutâncias das bobinas do gerador e suas respectivas taxas de variação, de forma a possibilitar a obtenção do modelo matemático validado com o sistema, ii) projeto e desenvolvimento do sistema de medição indireta do conjugado instantâneo do GRC de forma a possibilitar a obtenção do rendimento do gerador, iii) projeto e desenvolvimento do controlador de tensão do GRC associado à otimização dos parâmetros e iv) elaboração do algoritmo de rastreamento para elevação do rendimento. Para validação destas etapas, os modelos matemático e computacional do GRC são apresentados. Além disto, uma plataforma experimental é apresentada para verificação dos resultados obtidos.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: no Capítulo 2 apresenta-se a máquina de relutância chaveada, destacando o histórico de desenvolvimento, as principais aplicações, seus aspectos construtivos, princípio de funcionamento e a contextualização do GRC no cenário da microgeração de energia associada às fontes eólica e solar fotovoltaica como fontes primárias para geração de energia elétrica. O Capítulo 3 apresenta as técnicas de acionamento, controle e o modelo matemático do GRC, destacando os parâmetros de acionamento que influenciam diretamente na potência gerada. No Capítulo 4 destacam-se as técnicas de otimização e as possíveis variáveis manipuladas que permitem o controle da tensão de saída do gerador. O Capítulo 5 apresenta a metodologia desenvolvida neste estudo destacando as principais etapas e os procedimentos experimentais realizados para obtenção dos resultados. No Capítulo 6 apresentam-se os resultados obtidos, tanto os de simulação quanto os

experimentais. Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões.

CAPÍTULO 2

GERADOR A RELUTÂNCIA CHAVEADO

Este capítulo apresenta de forma qualitativa informações relevantes sobre a máquina de relutância chaveada, tais como seu histórico, principais aplicações, características construtivas, vantagens, princípio de operação e como a máquina de relutância chaveada pode ser empregada na geração de energia elétrica.

2.1 Histórico das Máquinas de Relutância Chaveadas

A máquina de relutância chaveada empregada como motor é o dispositivo conhecido há mais de 150 anos. William Hannis Taylor inventa a máquina de relutância chaveada em 1838 nos Estados Unidos quando criou o dispositivo para produção de conjugado, que viria a ser patenteado por ele mesmo em 1840 na Inglaterra. Como tal dispositivo possibilitou a produção de movimento a partir de eletricidade, até a primeira metade do século *XIX* cientistas de todo o mundo continuaram as pesquisas sobre o motor de relutância chaveado com o propósito de aprimorar o equipamento que proporcionasse tração. Porém, este dispositivo assim como outros derivados do mesmo, proporcionavam conjugado oscilatório, e logo foram substituídos por equipamentos derivados das máquinas CC e CA ([SUSITRA; JEBASEELI, 2010](#); [NASSEREDDINE, 2011](#)). Portanto, somente 150 anos após sua invenção as máquinas de relutância chaveadas passaram a despertar o interesse da comunidade científica, uma vez que o advento da eletrônica de potência e dos microprocessadores tornaram factíveis o acionamento e o controle deste tipo de máquina, especialmente o desenvolvimento dos transistores de potência, que associados aos sinais de Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM) dos microprocessadores permitem, juntamente com algoritmos de controle, melhor desempenho para a máquina de relutância.

2.2 Aplicação das Máquinas de Relutância Chaveadas

A máquina de relutância chaveada possui construção relativamente simples, o que acarreta baixo custo de fabricação e, portanto, tem levado a máquina a aceitação em várias aplicações. Alguns recursos que a máquina de relutância apresenta tais como a habilidade de operar mesmo em condições de falta, robustez em condições operacionais adversas e elevada densidade de potência, têm estendido a aplicação da máquina como motor de aplicações domésticas até aplicações de tração ([FRENCH, 1984](#)) na in-

dústria automobilística, especificamente em veículo elétricos híbridos, como descrito por [Chan \(2002\)](#), [Ehsani et al. \(1997\)](#), [Wang et al. \(2005\)](#), [Takeno et al. \(2012\)](#). Aplicações da máquina de relutância como gerador são substanciais em sistemas de alta velocidade, sobretudo no desenvolvimento de conjuntos formados por motor de arranque e alternador (*starter-generators*) para as indústrias aeroespacial ([FERREIRA et al., 1993](#); [RADUN, 1992](#); [RICHTER](#); [FERREIRA, 1995](#); [MACMINN](#); [JONES, 1989](#); [MACMINN](#); [SEMBER, 1989](#); [SCHOFIELD](#); [LONG, 2009](#)) e automotiva ([FAHIMI, 2001](#); [CAI, 2004](#)).

Na indústria automotiva, o avanço tecnológico presente nos automóveis com o objetivo de proporcionar maior conforto e segurança tais como janelas motorizadas, direção elétrica, suspensões ativas, sistemas elétricos para iluminação e bombeamento fez com que o sistema elétrico convencional dos automóveis se tornasse obsoleto, devido ao aumento na demanda de energia elétrica. Logo, os automóveis atuais necessitam de sistema de geração de energia mais eficiente, compacto e confiável ([EMADI et al., 2006](#)). Tanto o motor de arranque quanto o alternador convencionais foram substituídos por único dispositivo: o gerador/alternador de arranque integrado com o motor de combustão ([WALKER et al., 2004](#); [BOLDEA, 2003](#)). Este produto combinado produz maior potência e eficiência, usado principalmente no desenvolvimento dos veículos elétricos ([FAHIMI et al., 2004](#)) e híbridos ([FAIZ](#); [MOAYED-ZADEH, 2005](#); [ZHU](#); [HOWE, 2007](#)).

Considerando a indústria aeroespacial, os sistemas convencionais eram alimentados por fontes fluidomecânicas (hidráulicas ou pneumáticas) e hoje são praticamente alimentados por fontes de energia elétrica ([SHOUJUN et al., 2009](#)). Da mesma forma que nos automóveis, o aumento da demanda por energia elétrica nas aeronaves fez com que surgisse dificuldade operacional para acomodar tantos sistemas diferentes. Acredita-se que as combinações da energia elétrica com componentes eletrônicos de potência tenham aumentado o desempenho das aeronaves em termos de confiabilidade, tolerância a falhas e também a densidade de potência ([WEIMER, 1993](#); [RADUN et al., 1998](#)).

As aplicações da máquina de relutância chaveada em sistemas de baixa velocidade concentram-se substancialmente em sistemas de geração de energia, principalmente em aerogeradores. Considerando a crescente utilização das energias renováveis no cenário energético mundial, os sistemas de geração de eletricidade a partir de turbinas eólicas podem ser categorizados basicamente em dois grupos: i) turbinas eólicas de

grande porte (*Large Wind Turbine* - LWT) e ii) turbinas eólicas de pequeno porte (*Small Wind Turbine* - SWT).

As turbinas de grande porte são empregadas em parques eólicos, sobretudo em sistemas conectados à rede (FLEURY et al., 2007), enquanto que as turbinas de pequeno porte são empregadas frequentemente em sistemas de fornecimento de energia *off-grid* (CARDENAS et al., 2005), ou seja, em sistemas de microgeração isolados. Tais sistemas isolados contribuem positivamente com o fornecimento de energia elétrica em áreas como iluminação rodoviária, torre de base de comunicação móvel e consumo individual de habitações. Mesmo em países desenvolvidos, como os Estados Unidos, as turbinas de pequeno porte são empregadas para fornecer eletricidade para regiões remotas, assim como prevê o Programa Luz para Todos, do governo federal. No entanto, há potencial para usar aerogeradores menores também em áreas desenvolvidas, onde há espaço limitado para a expansão dos sistemas de fornecimento já existentes. Embora a escala industrial esteja distante em relação aos sistemas com LWT, sua contribuição para a geração de energia é igualmente importante. Os estudos em andamento sobre o uso do gerador a relutância chaveado para aplicações de energia eólica o apresentam como potencial candidato ao lado das máquinas convencionais (NASSEREDDINE, 2011; CARDENAS et al., 2005; CARDENAS et al., 1995; CHEN; SHAO, 2004; MUELLER, 2005). As tecnologias existentes para aplicações em energia eólica incluem os geradores de ímã permanente, o gerador de indução duplamente alimentado, os geradores síncronos e o gerador de indução de gaiola de esquilo (BRATILOVEANU et al., 2012). No entanto, os geradores existentes têm as suas deficiências. O gerador de indução de gaiola de esquilo, por exemplo, funciona a velocidade constante, além da necessidade de possuir capacitores de elevada capacitância para atingir o fator de potência próximo a um. Os problemas com o uso do gerador a ímã permanente são o alto custo e a desmagnetização do material (OGAWA et al., 2006). Além disto, o gerador a ímã permanente opera em torque elevado, o que é uma desvantagem para operações em baixa velocidade (NASSEREDDINE, 2011). A máquina de indução, embora caracterizada por sua robustez e, conseqüentemente, menor manutenção, produz energia elétrica com baixa eficiência. Sobre o gerador de indução duplamente excitado, há preocupações quanto ao sistema de segurança durante as condições de falha (HU; HE, 2006).

Por fim, a aceitação da máquina de relutância chaveada operando como gerador desencadeou a investigação aprofundada em áreas como as estratégias de controle,

métodos de otimização, potencialização de projetos e construção estrutural da máquina e também as topologias dos conversores de potência.

2.3 Características Construtivas

Do ponto de vista construtivo, a máquina de relutância chaveada possui polos salientes no rotor e no estator. Tais polos se sobressaem no entreferro ([MILLER, 2002](#)) do circuito magnético, que possui como núcleo o material magnético do estator e do rotor, os quais são compostos por chapas de aço silício (normalmente de grão não orientado) sobrepostas e isoladas umas das outras com a finalidade de minimizar as correntes parasitas no estator e no rotor. A Fig. 2.1 ilustra os pacotes de lâminas do rotor e do estator da máquina de relutância chaveada com topologia 6×4 , isto é, estator com 6 polos e rotor com 4 polos.

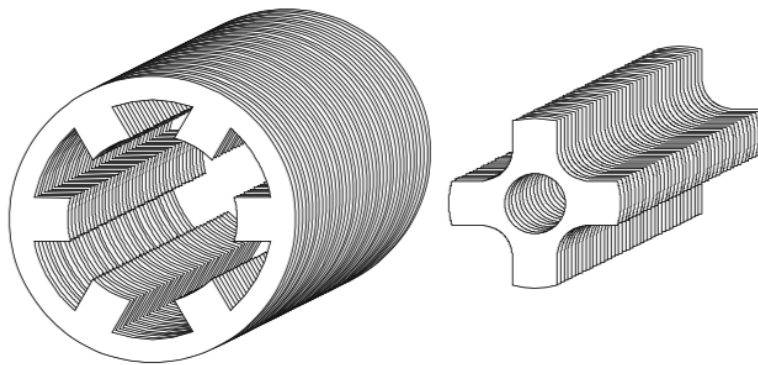


Figura 2.1 - Pacotes de lâminas do estator e do rotor da máquina de relutância chaveada.

Os números dos polos do estator e do rotor são projetados para evitar regiões nas quais exista conjugado nulo. Isto acarreta em projetos com número simétrico e igualmente espaçado de polos do estator e do rotor ([RAMU, 2001](#)).

A máquina é adequada para operar com pulsos retangulares unidirecionais de corrente aplicados às bobinas de suas fases ([BORGES, 2002](#)). A máquina de relutância chaveada é, em essência, a máquina que consome (na operação como motor) ou gera (na operação como gerador) corrente contínua pulsada. O projeto apropriado da máquina de relutância chaveada e do seu respectivo circuito de alimentação pode resultar em conjunto com rendimento superior ao da máquina de indução correspondente, operando em regime de velocidade variável, com vantagem de que a máquina a relutância e seu conversor são mais simples em termos construtivos ([ANDRADE et](#)

al., 2006).

As configurações típicas incluem máquinas de três fases, com 6 polos no estator e 4 polos no rotor, como ilustra a Fig. 2.1, máquinas trifásicas com topologia 12×8 , máquinas de quatro fases 8×6 e máquinas de quatro fases com topologia 16×12 (ARIFIN, 2013).

As bobinas das fases da máquina de relutância chaveada são concentradas apenas no estator (POLLOCK; MICHAELIDES, 1995), o que permite que o rotor fique livre de enrolamentos, ímãs ou escovas. Os enrolamentos dos polos do estator são conectados em série com o polo diametralmente oposto para formar uma fase. A Fig. 2.2(a) ilustra o corte transversal da máquina de relutância chaveada com topologia 6×4 na qual apenas uma das três fases é destacada (ARAÚJO, 2006).

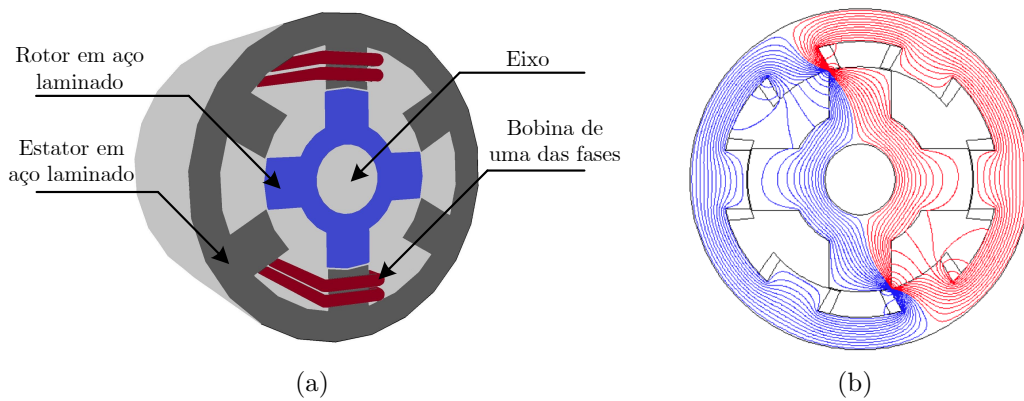


Figura 2.2 - (a) Corte transversal da máquina de relutância chaveada 6×4 . (b) Linhas de fluxo do circuito magnético formado como resultado da energização de uma das fases da máquina de relutância chaveada.

Na Fig. 2.2(a), apenas o enrolamento da fase *A* é destacado, sendo que as outras duas fases (*B* e *C*) também possuem seus respectivos enrolamentos para composição das bobinas da máquina. Logo, este aspecto construtivo faz com que haja independência entre as fases, sendo estas energizadas individualmente por fonte externa via conversor de potência. A energização de uma fase faz com que o circuito magnético seja estabelecido. A Fig. 2.2(b) ilustra as linhas de fluxo do circuito magnético resultante da energização de uma das fases da máquina.

Quando o enrolamento de determinada fase é energizado, o respectivo polo do es-

tator se comporta como eletroímã atraindo o rotor para a fase excitada. Portanto, a produção de conjugado pela máquina é realizada pela tendência que o rotor tem de se alinhar com o polo do estator de forma a conceber o circuito magnético com mínima relutância (ou máxima indutância).

2.4 Princípio de Funcionamento

O acionamento da máquina de relutância chaveada é baseado na energização individual de cada uma das fases. Contudo, este acionamento deve ser referenciado à posição instantânea do rotor θ . Este referenciamento é necessário devido ao comportamento do perfil de indutância de cada fase e do equacionamento para a produção de conjugado T . O aumento da posição angular do rotor θ a partir do eixo de referência faz com que um polo do rotor se aproxime de um polo do estator, reduzindo o entreferro do circuito magnético e, conseqüentemente, aumentando a indutância da bobina do respectivo polo do estator. Este comportamento é ilustrado na Fig. 2.3.

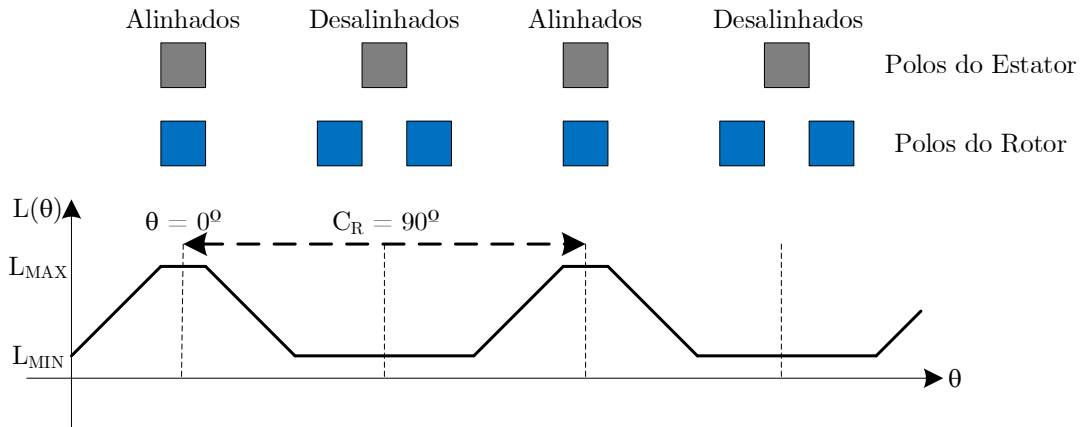


Figura 2.3 - Comportamento da indutância de uma das fases em função da posição angular θ .

Na Fig. 2.3, os parâmetros L_a e L_u correspondem às indutâncias máxima e mínima de uma fase da máquina, respectivamente. L_a representa a indutância da bobina quando o circuito magnético possui o mínimo valor de entreferro, ou seja, quando os polos do rotor e do estator estão completamente alinhados. L_u representa valor baixo de indutância devido ao fato de os polos do rotor e do estator estarem desalinhados, proporcionando elevado valor de entreferro no circuito magnético da respectiva fase. Associado a este comportamento da indutância por fase, o equacionamento

do circuito magnético demonstrado por [Araujo \(2006\)](#) estabelece que o conjugado produzido por este circuito é dado por:

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

Na expressão (2.1) é possível observar que: i) o conjugado T independe do sentido de circulação da corrente na bobina e ii) o sinal do conjugado depende do instante no qual o pulso de corrente elétrica é aplicado.

Isto significa que o conjugado produzido pela máquina é positivo se o pulso de corrente é aplicado durante a taxa de variação positiva da indutância com a posição angular, ou seja, se $\frac{dL}{d\theta} > 0$. Isto significa que a máquina produz conjugado positivo e opera como motor se as bobinas das fases da máquina são energizadas durante o intervalo crescente da indutância, ou seja, entre θ_1 e θ_2 na Fig. 2.3. Por outro lado, se o rotor da máquina é colocado em movimento através da aplicação de energia mecânica externa e a aplicação de corrente nas bobinas das fases ocorre durante a variação negativa da indutância, isto é, entre θ_3 e θ_4 na Fig. 2.3, onde $\frac{dL}{d\theta} < 0$, o conjugado produzido pela máquina é negativo e, então, o conjugado restaurativo é impedido pela energia mecânica externa e então esta energia pode ser desviada para a carga, fazendo com que a máquina opere como gerador. Estes critérios relacionados ao princípio de funcionamento da máquina fazem com que seu acionamento exija alguns requisitos, tais como: i) sensor de posição para que o valor instantâneo de θ seja obtido de forma a possibilitar a energização das bobinas nos instantes corretos e ii) conversor de potência que possibilite a aplicação do pulso de corrente nas bobinas conforme o valor de θ proveniente do sensor.

Estes requisitos também vem sendo explorados pela comunidade científica, proporcionando estudos relacionados ao acionamento *sensorless* da máquina ([BORGES, 2002](#)) e estudos de diferentes topologias de conversores de potência para energização das bobinas ([RAMU, 2001](#)).

2.5 Conversor de Potência

O conversor de potência é necessário para a adequada energização das bobinas da máquina de relutância chaveada, independente do modo de operação: como motor ou como gerador. O conversor mais comumente empregado para acionamento da má-

quina de relutância chaveada é o conversor em meia ponte assimétrico (*Asymmetric Half Bridge* - AHB), ilustrado na Fig. 2.4.

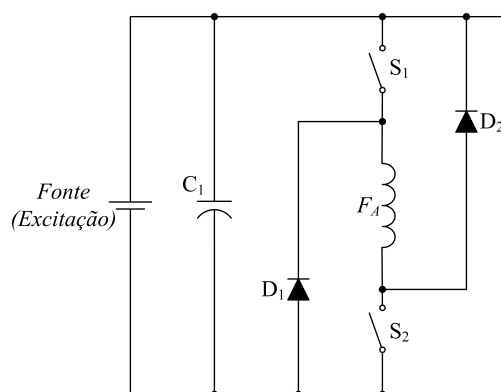


Figura 2.4 - Esquemático do conversor AHB.

O diagrama ilustrado na Fig. 2.4 destaca o acionamento de apenas uma das fases da máquina, neste caso, a fase A (F_A). Para as demais fases da máquina, um par de diodos e um par de chaves são igualmente necessários. O emprego das chaves permite o acionamento individual de cada bobina da máquina. A topologia do AHB ilustrada na Fig. 2.4 é adequada para acionamento como motor, ou seja, o pulso de corrente deve ser aplicado na taxa de variação positiva da indutância da bobina de forma a produzir conjugado positivo. Desta forma, a corrente circula pelas chaves e pela bobina. Com a abertura das chaves, a força contraeletromotriz gerada na bobina proporciona a circulação de corrente ainda pela bobina, no mesmo sentido, e pelos diodos. Por isto a necessidade do capacitor para receber esta energia da bobina. A Fig. 2.5 ilustra ambas as etapas de acionamento de uma das bobinas da máquina.

Desta forma, tem-se duas etapas relacionadas ao acionamento de uma fase da máquina: uma etapa de magnetização da bobina e outra etapa de regeneração.

As formas de onda ilustradas na Fig. 2.6 são idealizadas, não representando o comportamento real destas grandezas. Nos gráficos da Fig. 2.6, o parâmetro C_R representa o ciclo do rotor. Este valor corresponde ao período com o qual as grandezas do estator se repetem em relação ao valor de θ . Para a máquina de relutância chaveada com topologia $N_e \times N_r$, onde N_e representa o número de polos do estator e N_r o número de polos do rotor, o ciclo do rotor vale:

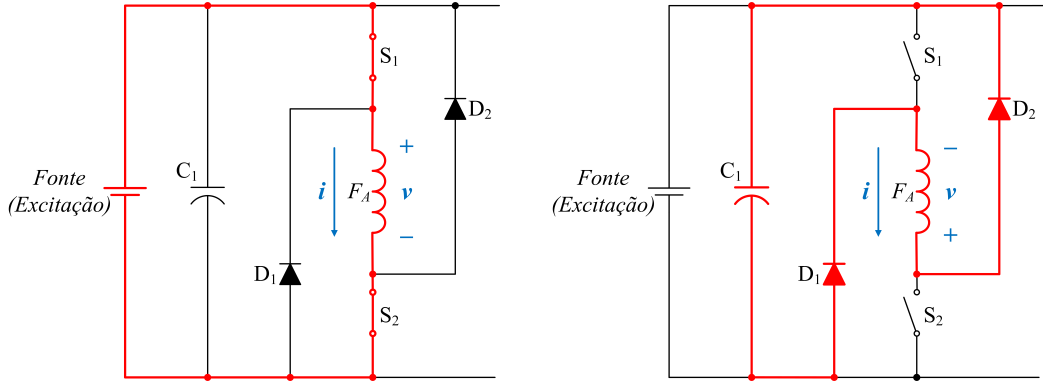


Figura 2.5 - Etapas de acionamento de uma das fases da máquina.

$$C_R = \frac{2 \cdot \pi}{N_r} \quad (2.2)$$

Portanto, para a máquina de relutância chaveada de topologia 6×4 , o ciclo do rotor é de 90 graus. Obviamente que, em situações práticas, as chaves S_1 e S_2 do conversor AHB ilustrado na Fig. 2.4 são chaves semicondutoras de potência, que possibilitam sua abertura e fechamento em pequenos intervalos de tempo e permitem o condicionamento da energia elétrica nas bobinas permitindo elevados valores de tensão e de corrente. O mesmo conversor pode ser empregado para o acionamento como gerador, como ilustra a Fig. 2.7.

No circuito ilustrado na Fig. 2.7, as três fases da máquina 6×4 estão representadas como F_A , F_B e F_C . É possível observar que a diferença deste circuito para o conversor ilustrado na Fig. 2.4 é o fato de que os diodos, ao invés de estarem conectados ao mesmo barramento da excitação, estão conectados ao barramento diferente, no qual está conectada a carga. Desta forma, a etapa de regeneração agora torna-se etapa de geração, pois a força contraeletromotriz das bobinas, referentes ao fechamento das chaves S_1 a S_6 , ao invés de ser direcionada para o capacitor C_1 , é direcionada para carga. O capacitor C_2 faz com que a natureza oscilatória da tensão na carga seja suavizada, proporcionando potência CC na saída do gerador. Isto faz com que os instantes de chaveamento θ_{ON} e θ_{OFF} ilustrados na Fig. 2.6, caracterizados como ângulos de ligamento e desligamento das fases, respectivamente, tenham influência direta na potência de saída da máquina, tanto na potência mecânica, na operação como motor, como na potência elétrica gerada, na operação como gerador.

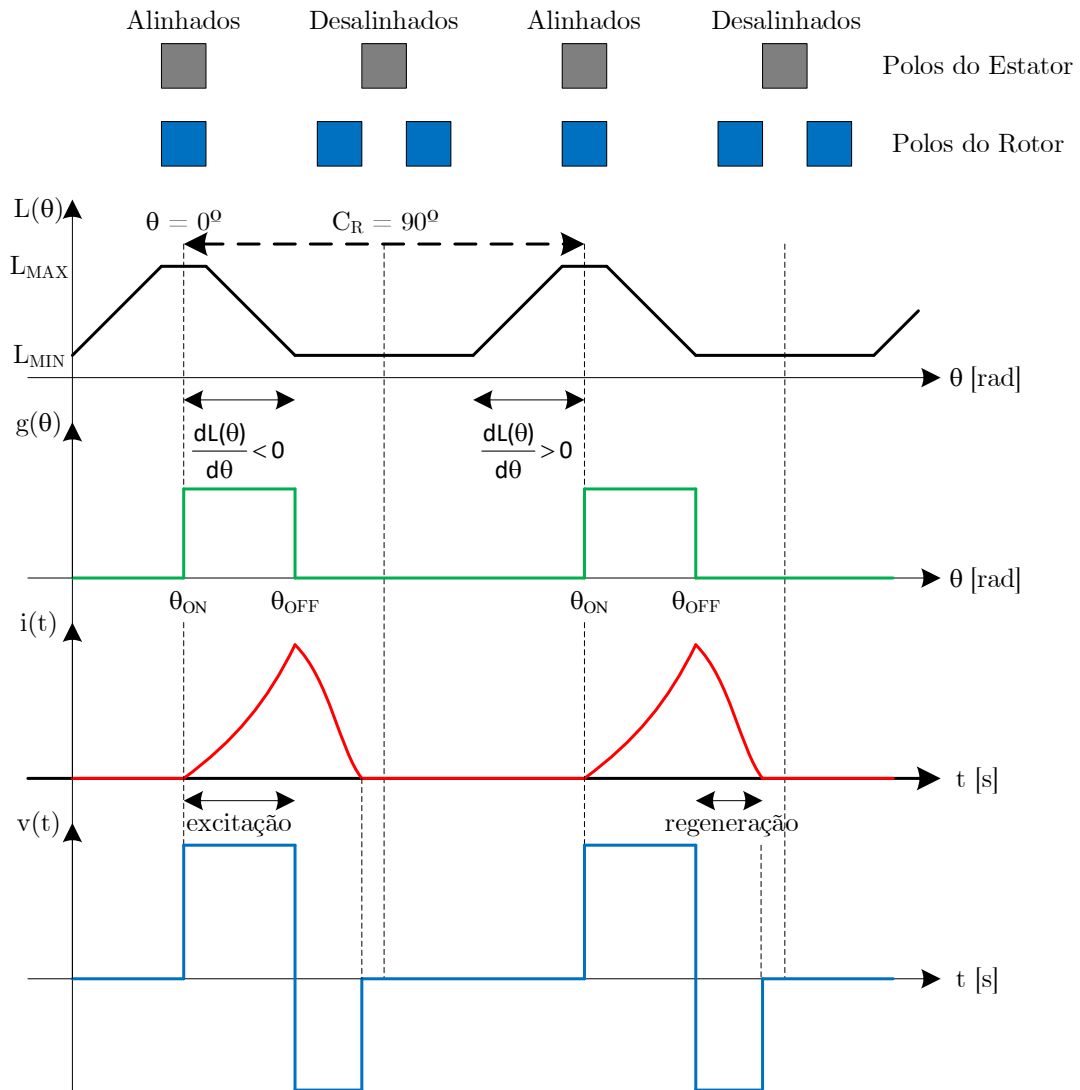


Figura 2.6 - Ilustração do comportamento da corrente e da tensão na bobina para as etapas de acionamento.

2.6 O Gerador a Relutância Chaveado no Contexto da Energia Eólica

O sistema eólico de geração de energia elétrica possui sua operação baseada na capacidade de converter a energia cinética do vento em energia elétrica, empregando a turbina eólica. A máquina ideal para este tipo de aplicação deve ter as seguintes características: i) ter capacidade de operação mesmo com baixas velocidades de vento, ii) operar com perdas minimizadas na própria máquina e iii) ter resposta rápida às variações de velocidade do vento.

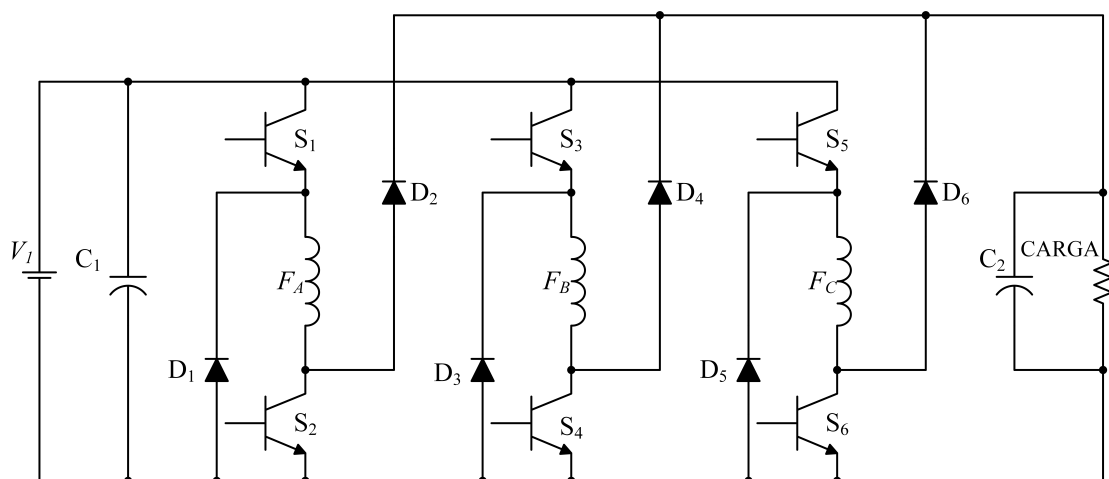


Figura 2.7 - Esquemático do conversor *AHB* para acionamento da máquina como gerador.

As máquinas comumente empregadas para sistemas eólicos com turbinas SWT e LWT são os geradores de imã permanente, o gerador de indução duplamente excitado, os geradores síncronos e também o gerador de indução de gaiola de esquilo. Se a máquina elétrica puder superar as limitações destes dispositivos para aplicações eólicas, esta máquina poderá operar com maior rendimento, tópico que tem sido alvo de pesquisas na comunidade científica ([NASSEREDDINE, 2011](#)).

A máquina de relutância chaveada pode superar quantidade razoável destas limitações, pois: i) possui menores perdas na própria máquina devido à ausência de enrolamentos no rotor, ii) a baixa inércia do rotor exige caixas de transmissão menores e mais leves; iii) a baixa inércia do rotor permite a operação em baixas velocidades de vento, iv) responde rapidamente a condição de falha, devido ao fato das bobinas serem independentes umas das outras, v) possui capacidade de operação em ampla faixa de velocidade; vi) seu acionamento e controle têm se tornado cada vez mais simples e barato devido ao advento dos semicondutores e vii) possui menor custo de fabricação.

Como a velocidade do vento é instável e o gerador de relutância chaveado (GRC) pode operar em ampla faixa de velocidade, as investigações sobre esta máquina elétrica têm se intensificado.

Particularmente a China, com grande população e atual crescimento econômico e urbano, tem sua matriz energética baseada no carvão e escassos sítios com potencial

hidrelétrico. Seu litoral apresenta vários sítios com potencial eólico favorável e, desta forma, é natural que a China esteja se empenhando no aproveitamento da energia eólica. Os aerogeradores são máquinas que operam em baixa velocidade, com conjugado elevado e em regime de velocidade sempre variável. O limite de potência dos aerogeradores amplia-se continuamente desde as primeiras aplicações modernas, na Alemanha e na Dinamarca, e atualmente a General Electric (GE) dispõe de turbinas de 6 MW, para aplicações *offshore*. Máquinas deste porte, colocadas em torres com dezenas de metros de altura, requerem caixa de transmissão avantajada, que exige manutenção frequente e difícil. Isto compromete a estrutura da torre, a eficiência e a confiabilidade do sistema, além de operar em estreita faixa de velocidade. Como o GRC é intrinsecamente a máquina que gera corrente pulsada unidirecional e faz isto em regime de velocidade variável, seu emprego pode eliminar ou aliviar o peso da caixa de transmissão, instalada no alto da torre, como ilustra a Fig. 2.8, adaptada de Simani (2015).

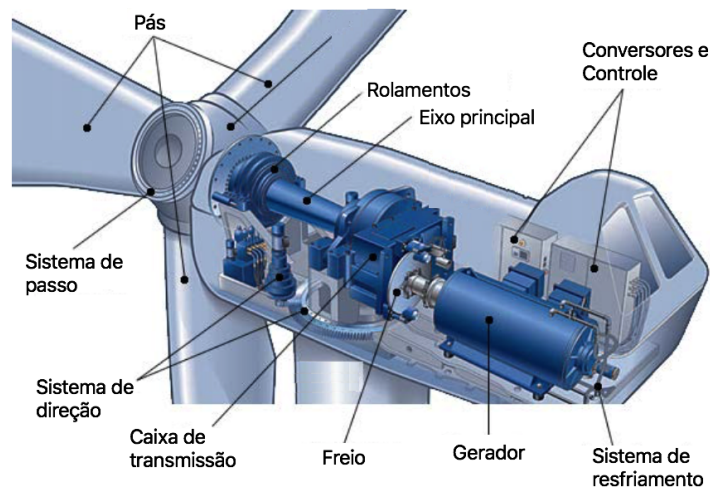


Figura 2.8 - Integração máquina elétrica/caixa de transmissão do sistema eólico.

A integração do GRC com a geração eólica é explorada nos estudos Cardenas et al. (1995), Chen et al. (2001), Hao et al. (2002), Mueller (2005), Mueller (1999), Qixue et al. (2001). Especificamente em Chen et al. (2001) é apresentado o sistema eólico integrado por GRC operando em velocidade variável. Neste estudo foram exploradas duas estratégias de controle da potência de saída: uma empregando os ângulos de chaveamento θ_{ON} e θ_{OFF} fixos porém empregando chaveamento PWM na excitação e outra variando os ângulos de chaveamento, o que proporcionou elevados valores de

rendimento e baixos picos de corrente na máquina. Neste mesmo estudo, o GRC de potência 7,5 kW apresenta custo competitivo em relação ao motor de indução em gaiola, indicando eficiência e confiabilidade superiores e acionamento mais barato. Neste campo, eliminar a transmissão mecânica variável e manter o rendimento em níveis elevados tem sido o foco das pesquisas. Em Mueller (1999), é apresentado estudo sobre a influência do número de polos no rotor e no estator do GRC eólico operando em baixas velocidades, chegando a 100 rpm.

Os estudos para levantamentos dos atlas de potencial eólico e solarimétrico no Brasil, realizados por várias instituições, sobretudo a ANEEL, apontam convergência destes potenciais na região nordeste. As figuras 2.10 e 2.9, retiradas dos atlas de potencial eólico e solar da ANEEL, ilustram o potencial solarimétrico e eólico do território brasileiro.

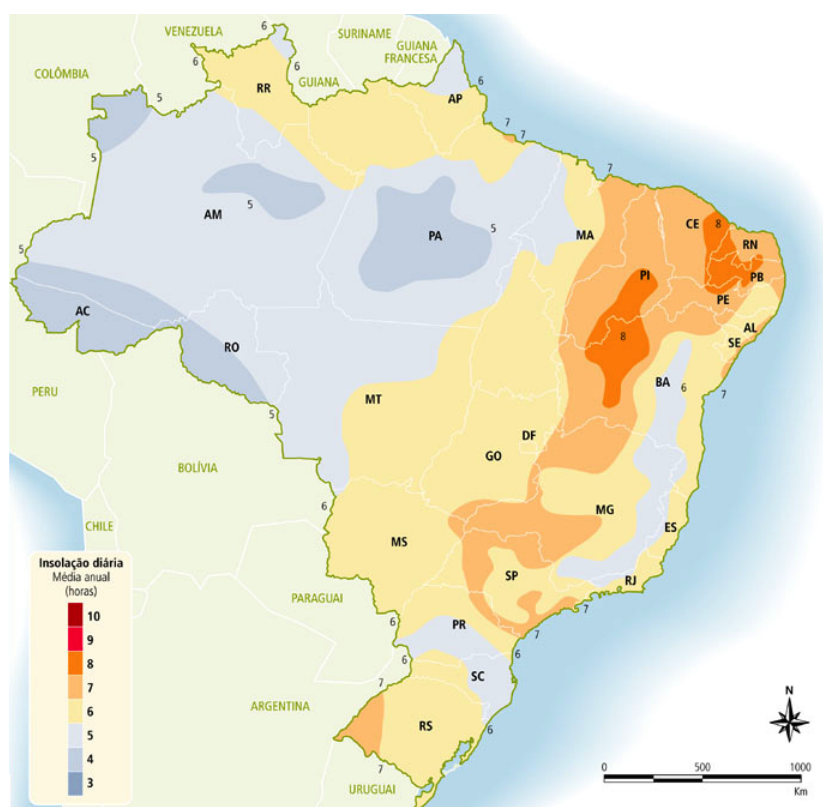


Figura 2.9 - Atlas brasileiro do potencial solar.

Este fator beneficia os programas de incentivo à potencialização de fontes alternativas no país e os programas de acesso à energia elétrica, pois tais programas possuem

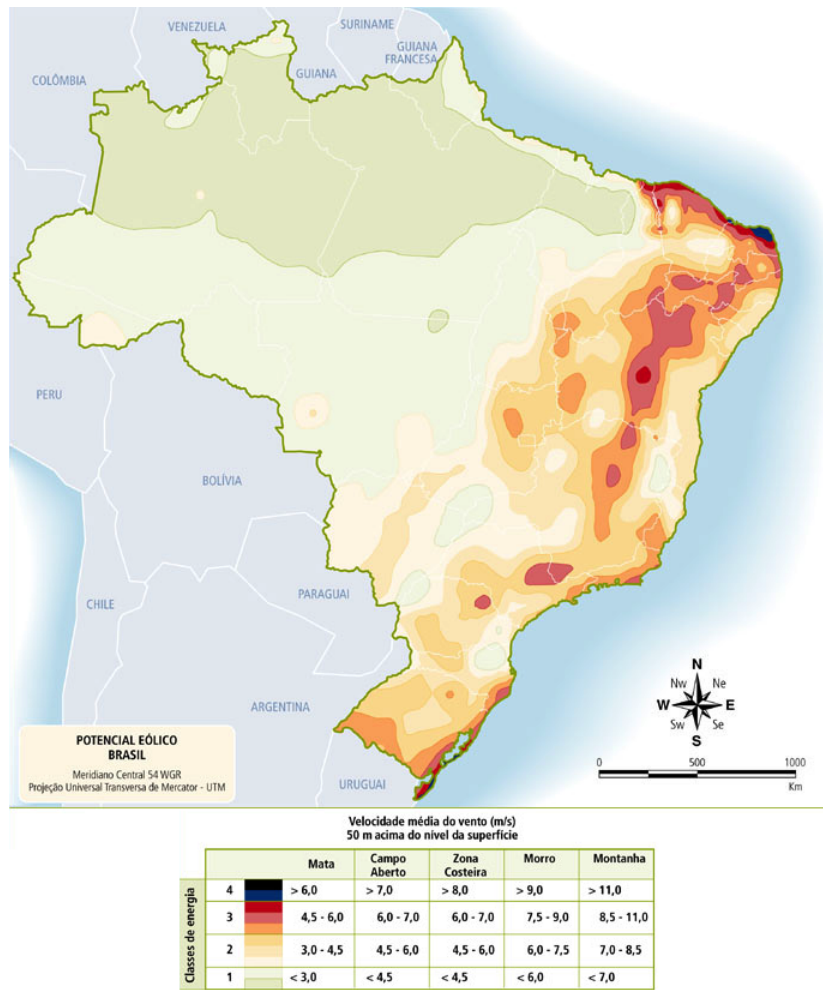


Figura 2.10 - Atlas brasileiro do potencial eólico.

como foco as regiões norte e nordeste. O estudo do GRC operando em velocidade variável pode indicar novas estratégias de acionamento e controle potencializando o rendimento, viabilizando a aplicação do GRC em sistemas onde a energia solar fotovoltaica também possa ser empregada para excitar o gerador. Esta busca é encorajada pelo fato de que a potência capturada a partir do vento no sistema eólico é obtida por (DARIE et al., 2008):

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_S \cdot (V_W)^3 \cdot \eta_G \cdot C_P \quad (2.3)$$

onde ρ é a densidade do ar, A_S é a área da seção transversal do rotor da turbina, V_W é a velocidade do vento, η_G é o rendimento do gerador empregado na turbina e

C_P é o coeficiente de potência, que depende dos parâmetros construtivos da turbina eólica.

Desta forma, é necessário que a máquina usada tenha seu rendimento potencializado. O interesse na melhoria do rendimento reside em manter a potência CC fixa na saída do gerador minimizando a quantidade de energia necessária para excitação da máquina, favorecendo o uso da energia solar fotovoltaica para excitação do gerador. Além disto, com a devida elevação do rendimento do GRC, como observado em 2.3, a turbina eólica torna-se favorecida para geração de potência elétrica, ou seja, η_G é maximizado mantendo a potência elétrica gerada.

2.7 Considerações Finais

Este capítulo apresentou a máquina de relutância chaveada, seus aspectos construtivos, funcionamento e como este dispositivo pode contribuir positivamente com a geração de energia, sobretudo em sistemas eólicos. No próximo capítulo serão apresentados os aspectos relacionados à modelagem matemática do gerador a relutância chaveado, a qual é fundamental para a obtenção do modelo computacional para simulação e previsão.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM DO GERADOR A RELUTÂNCIA CHAVEADO

Este capítulo apresenta a modelagem matemática do gerador a relutância chaveado e como esta modelagem pode ser empregada para obtenção do modelo computacional. Neste ponto a simulação do gerador é apresentada de forma detalhada, pois o modelo computacional possui elevada importância para os estudos relacionados aos processos de otimização, controle, identificação de sistema e, sobretudo, para validação da plataforma experimental.

3.1 Modelo Matemático do Gerador a Relutância Chaveado

O modelo matemático do gerador a relutância chaveado (GRC) normalmente é elaborado com vistas a conceber o sistema computacional para simulação do gerador. A simulação deste tipo de máquina é mais complexa que a simulação das máquinas CA e CC convencionais, pois vários fatores contribuem com esta complexidade, tais como (RAMU, 2001): i) a não linearidade da característica $B \times H$ do material magnético, ii) a dependência que o fluxo concatenado e a indutância possuem da posição angular do rotor θ e da amplitude da corrente, o que ocorre em outras máquinas também, mas nelas a dependência da posição angular é eliminada através de transformações trigonométricas, o que não é possível para o GRC e iii) tem a existência de fonte de alimentação única.

Desta forma, o fluxo concatenado λ depende de dois parâmetros simultaneamente, assim como a indutância:

$$\lambda(\theta, i) = L(\theta, i) \cdot i \quad (3.1)$$

A Fig. 3.1 ilustra a dependência do fluxo concatenado com a corrente e a posição angular. Na Fig. 3.1, as várias curvas apresentam o fluxo concatenado em função da corrente na bobina para diversos valores de posição angular θ , sendo a curva superior o fluxo para maior valor de indutância, com os polos do rotor e do estator alinhados, e a curva inferior representa o fluxo para a posição angular totalmente desalinhada. Desta forma, o modelo matemático deve considerar tais fatores.

Assim, considerando o circuito RL formado pelo enrolamento de única fase, ilustrado

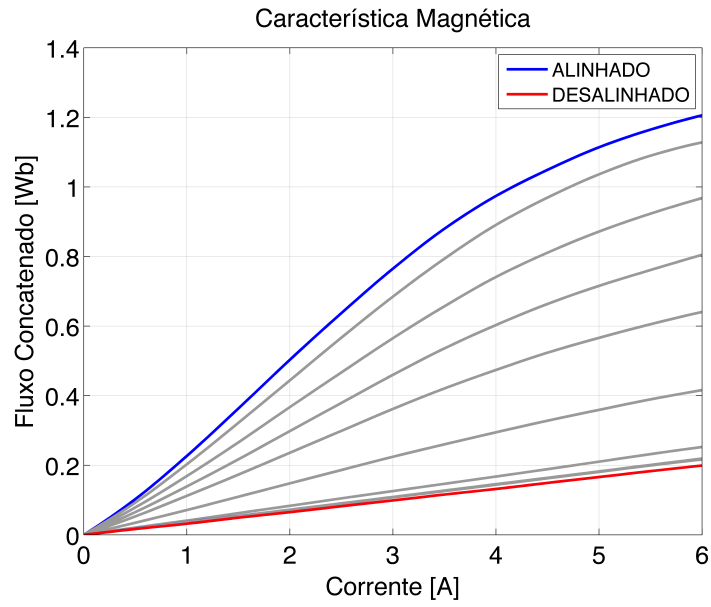


Figura 3.1 - Comportamento do fluxo concatenado em função da corrente e da posição angular do rotor.

na Fig. 3.2:

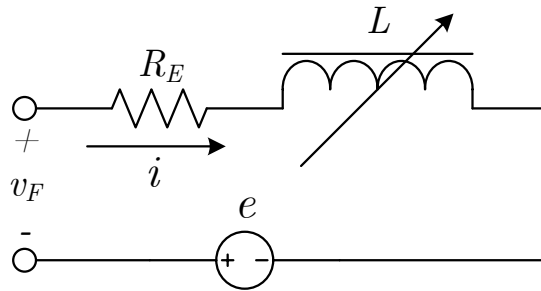


Figura 3.2 - Circuito elétrico equivalente de uma fase do GRC.

Desprezando as indutâncias mútuas entre as bobinas, a expressão do circuito ilustrado na Fig. 3.2 é:

$$v_F = R_E \cdot i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (3.2)$$

onde v_F é a tensão CC aplicada à bobina da fase, R_E é a resistência do enrolamento da fase, L é a indutância da fase e e é a força contraeletromotriz. Desta forma, 3.2 torna-se:

$$v_F = R_E \cdot i + L(\theta, i) \cdot \frac{di}{dt} + e \quad (3.3)$$

A força contraeletromotriz pode ser escrita isoladamente como:

$$e = \omega \cdot i \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (3.4)$$

onde ω é a velocidade angular do rotor, dada por:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (3.5)$$

A expressão mecânica da máquina pode ser obtida através da análise dinâmica de seu funcionamento. Para operação da máquina como gerador, o conjugado mecânico externo T_M deve ser aplicado pela máquina primária. O equilíbrio das forças é representado por:

$$T_M = T_{EM} + D \cdot \omega + J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.6)$$

onde T_{EM} é o conjugado eletromagnético produzido pela máquina, D é coeficiente de atrito viscoso e J é o momento de inércia. Para se obter o valor do conjugado eletromagnético T_{EM} , deve-se considerar a curva de magnetização típica para a posição angular de referência θ_{REF} , ilustrada na Fig. 3.3.

A coenergia W_{CO} de determinada fase, para a posição θ , é dada por:

$$W_{CO}(\theta, i) = \int_0^i \lambda(\theta, i) \cdot di \quad (3.7)$$

onde λ é o fluxo concatenado da bobina da fase.

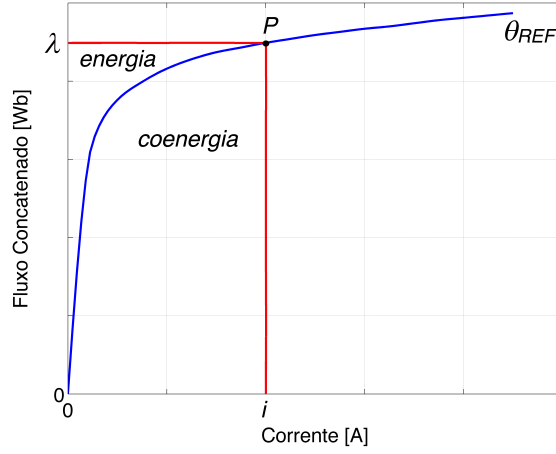


Figura 3.3 - Curva de magnetização típica para uma fase do GRC.

Como esta expressão se aplica a cada uma das três fases do GRC 6×4 , a coenergia total W_{CO_T} é:

$$W_{CO_T}(\theta, i) = W_{CO_1} + W_{CO_2} + W_{CO_3} \quad (3.8)$$

Conforme [Ilic-Spong et al. \(1987\)](#), o conjugado eletromagnético instantâneo é obtido por:

$$T_{EM} = \frac{\partial W_{CO}(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (3.9)$$

Cuja expansão para as três fases resulta em:

$$T_{EM} = \frac{\partial W_{CO_1}(\theta, i)}{\partial \theta} + \frac{\partial W_{CO_2}(\theta, i)}{\partial \theta} + \frac{\partial W_{CO_3}(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (3.10)$$

Substituindo (3.10) em (3.6), tem-se:

$$T_M = \left(\frac{\partial W_{CO_1}(\theta, i)}{\partial \theta} + \frac{\partial W_{CO_2}(\theta, i)}{\partial \theta} + \frac{\partial W_{CO_3}(\theta, i)}{\partial \theta} \right) + D \cdot \omega + J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.11)$$

Agrupando as expressões elétrica 3.3 e mecânica 3.11 e reescrevendo as mesmas na

forma matricial, tem-se:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \\ T_M \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_C & 0 & 0 \\ r_1 & r_2 & r_3 & D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \\
 + \begin{bmatrix} L_A(\theta, i) & 0 & 0 & 0 & i_A \cdot \frac{\partial L_A(\theta, i)}{\partial \theta} \\ 0 & L_B(\theta, i) & 0 & 0 & i_B \cdot \frac{\partial L_B(\theta, i)}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & L_C(\theta, i) & 0 & i_C \cdot \frac{\partial L_C(\theta, i)}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3.12)
 \end{aligned}$$

onde as variáveis r_1 , r_2 e r_3 são definidas como:

$$r_1 = \frac{i_A}{2} \cdot \frac{\partial L_A(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (3.13)$$

$$r_2 = \frac{i_B}{2} \cdot \frac{\partial L_B(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (3.14)$$

$$r_3 = \frac{i_C}{2} \cdot \frac{\partial L_C(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (3.15)$$

Atribuindo os termos $[v_F]$, $[R_E]$, $[I]$, $[L]$ e $[\dot{I}]$ a cada matriz na ordem que aparecem na expressão 3.12, tem-se:

$$[v_F] = [R_E] \cdot [I] + [L] \cdot [\dot{I}] \quad (3.16)$$

De posse da expressão 3.16, é possível escrever a equação de estados da máquina:

$$[\dot{I}] = [L^{-1}] \cdot [v_F] - [L^{-1}] \cdot [R_E] \cdot [I] \quad (3.17)$$

A expressão 3.17 descreve completamente o estado de cada fase da máquina em qualquer instante. Os valores das resistências das bobinas e suas respectivas indutâncias são medidos diretamente nos terminais da máquina ou através dos parâmetros construtivos da mesma, empregando técnicas numéricas, como o método dos elementos finitos. A expressão 3.17 é a equação diferencial do sistema que relaciona a entrada v_F à sua respectiva saída i . Portanto, a solução de 3.17 é obtida empregando métodos numéricos iterativos.

3.2 Simulação do Gerador a Relutância Chaveado

De posse do modelo matemático, é possível elaborar o sistema computacional capaz de fornecer o comportamento das grandezas elétricas e mecânicas do GRC. A análise destes comportamentos permite o estudo de técnicas de otimização, controle e acionamentos para o gerador de forma a se obter melhorias na máquina. A Fig. 3.4 ilustra o diagrama básico empregado para executar a simulação do GRC.

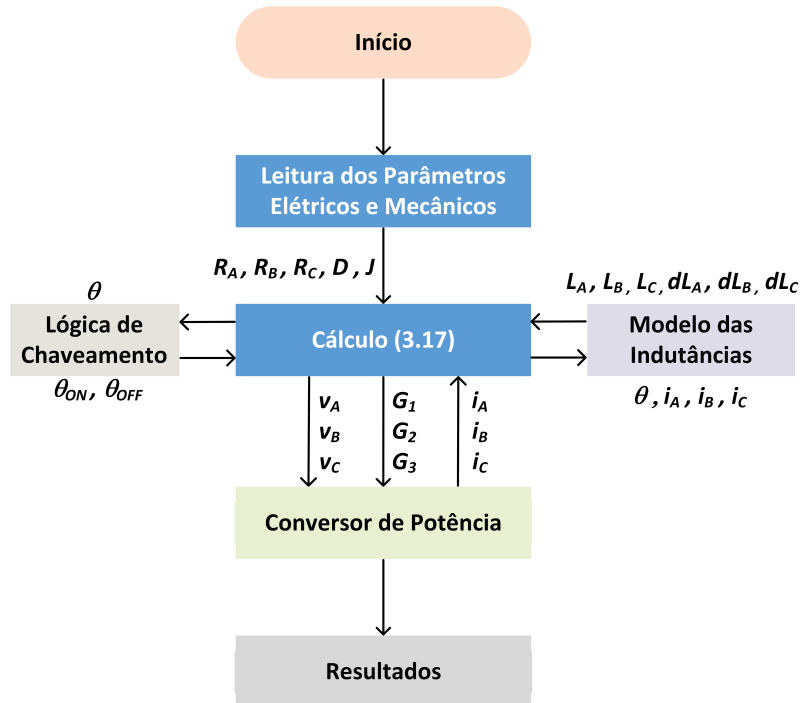


Figura 3.4 - Diagrama básico do sistema de simulação.

Basicamente, a simulação computacional da máquina de relutância chaveada segue os passos ilustrados no diagrama da Fig. 3.4, seja para simulação de motor ou gerador. Inicialmente, são informados para o sistema parâmetros como a resistência das bobinas do estator e os parâmetros mecânicos como o atrito e a inércia. Em seguida, a expressão matemática em 3.17 é encontrada baseando-se nas tensões das bobinas, fornecendo ao circuito do conversor de potência o valor instantâneo das correntes de fase, uma vez que este utiliza fontes de corrente como modelo das bobinas da máquina.

Este conversor é acionado conforme o chaveamento proporcionado pelo bloco *Lógica de Chaveamento* da Fig. 3.4. Por fim, os resultados são atualizados, proporcionando os valores instantâneos das grandezas elétricas e mecânicas do gerador a fim de verificar seu funcionamento.

Contudo, a operação do modelo computacional depende fortemente do bloco descrito como *Modelo das Indutâncias* indicado na Fig. 3.4. Isto é, a forma com a qual as indutâncias das bobinas e suas respectivas taxas de variação são representadas impactam diretamente na simulação e, principalmente, na acurácia dos valores proporcionados pelo modelo quando tais valores são comparados com o modelo experimental.

O modelo mais simples de representação das indutâncias do GRC é o modelo linear. Esta denominação se dá pelo fato de que neste modelo as indutâncias são consideradas como senoides e, desta maneira, a taxa de variação das mesmas se torna mais simples. Além disto, neste modelo de representação não é considerada a saturação magnética do circuito. Desta forma, como os polos do estator estão distribuídos de forma equidistante a cada 60 graus, as indutâncias das bobinas podem ser representadas por:

$$L_A = A + B \cdot \cos(4 \cdot \theta) \quad (3.18)$$

$$L_B = A + B \cdot \cos[4 \cdot (\theta - 60^\circ)] \quad (3.19)$$

$$L_C = A + B \cdot \cos[4 \cdot (\theta + 60^\circ)] \quad (3.20)$$

Onde os parâmetros A e B são duas constantes calculadas a partir dos valores máximo e mínimo da indutância do gerador, ou seja, valores de indutância para situação de alinhamento e desalinhamento dos polos, respectivamente.

$$A = \frac{L_{MAX} + L_{MIN}}{2} \quad (3.21)$$

e

$$B = \frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{2} \quad (3.22)$$

O que permite obter as derivadas:

$$\frac{dL_A(\theta)}{d\theta} = -4 \cdot B \cdot \text{sen}(4 \cdot \theta) \quad (3.23)$$

$$\frac{dL_b(\theta)}{d\theta} = -4 \cdot B \cdot \text{sen}[4 \cdot (\theta - 60^\circ)] \quad (3.24)$$

$$\frac{dL_c(\theta)}{d\theta} = -4 \cdot B \cdot \text{sen}[4 \cdot (\theta + 60^\circ)] \quad (3.25)$$

Assim, o bloco *Cálculo (3.17)* é o responsável por informar os valores de indutância e suas respectivas derivadas, fornece para a expressão 3.17 os dados necessários para as operações das expressões 3.18, 3.19, 3.20, 3.23, 3.24 e 3.25. Portanto, no bloco *Cálculo (3.17)*, encontra-se os valores das correntes e suas derivadas, os valores instantâneos de velocidade e posição angular e recebe as indutâncias, como ilustrado na Fig. 3.5.

Porém, para simulação acurada, deve-se considerar o modelo real das indutâncias, que possuem comportamento distinto do modelo senoidal. Além disto, a saturação do circuito magnético da máquina deve ser considerada. Para obtenção destes valores é possível empregar os seguintes métodos: i) utilizar o método dos elementos finitos de forma a se obter os valores de $\lambda(\theta, i)$, ou seja, obter a matriz com os valores do fluxo concatenado para cada amplitude de corrente e para cada posição angular, ii) levantar os pontos $L(\theta, i)$ experimentalmente, de forma a se obter o comportamento

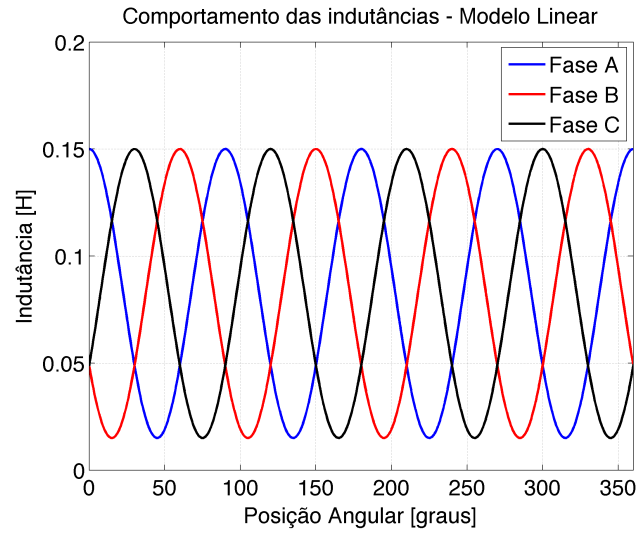


Figura 3.5 - Comportamento senoidal das indutâncias por fase - modelo linear.

da indutância das bobinas para cada valor de corrente de excitação, considerando também a saturação do material magnético. Este método pode ainda utilizar técnicas de interpolação, sobretudo usando a série de Fourier (ANDRADE; KRISHNAN, 2001) para obter melhores resultados ou iii) como hipótese, a partir dos pontos coletados experimentalmente, buscar a obtenção das expressões que representem a superfície de indutância e as respectivas taxas de variação.

O modelo linear, apesar de não oferecer a precisão das demais técnicas, proporciona referência razoável para o funcionamento da máquina.

Para aprimorar os resultados proporcionados pela simulação com o modelo linear, considerando a saturação do núcleo magnético da máquina e representando a indutância de forma fidedigna ao modelo experimental, Andrade e Krishnan (2001) propõem a representação das indutâncias da máquina a partir de vários segmentos de reta interpolados e, uma vez que a indutância de cada bobina é periódica, como ilustra a Fig. ??, as indutâncias das bobinas podem ser representadas pela série trigonométrica de Fourier. A Fig. 3.6, adaptada de Andrade e Krishnan (2001), ilustra como a indutância de uma das bobinas da máquina é representada por quantidade finita de segmentos de reta.

Neste caso, o valor instantâneo da indutância é representado por:

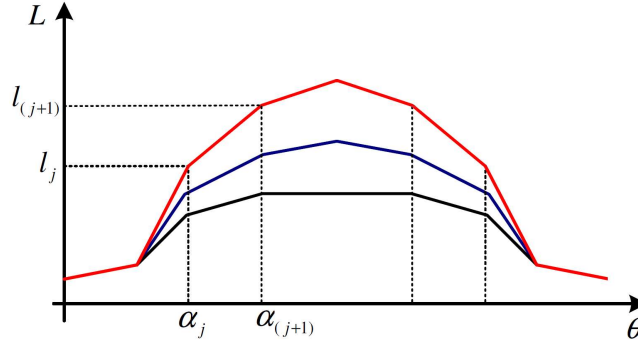


Figura 3.6 - Representação da indutância da bobina de uma das fases do GRC considerando vários segmentos de reta.

$$L(\theta) = L_0 + \sum_{n=1}^{\infty} L_n \cdot \cos(n \cdot N_r \cdot \theta) \quad (3.26)$$

onde L_0 é o termo constante e L_n é o coeficiente associado à ordem harmônica n . N_r é o número de polos do rotor. O termo constante L_0 é obtido por:

$$L_0 = \frac{1}{N_r} \cdot \int_{-C_R/2}^{C_R/2} L(\theta) \cdot d\theta \quad (3.27)$$

onde C_R é o passo polar do rotor dado por 2.2. A componente L_n é obtida por:

$$L_n = \frac{2}{N_r} \cdot \int_{-C_R/2}^{C_R/2} L(\theta) \cdot \cos(n \cdot N_r \cdot \theta) \cdot d\theta \quad (3.28)$$

A Fig. 3.7 ilustra o comportamento da indutância de uma das bobinas da máquina como resultado da simulação empregando o modelo não linear descrito pela série de Fourier.

Analisando a Fig. 3.7, observa-se que o modelo computacional baseado na série de Fourier que descreve a indutância da bobina do GRC por quantidade finita de segmentos de reta, proporciona o comportamento dinâmico da indutância, distinto do modelo senoidal, o que é reforçado pelas medidas experimentais de indutância

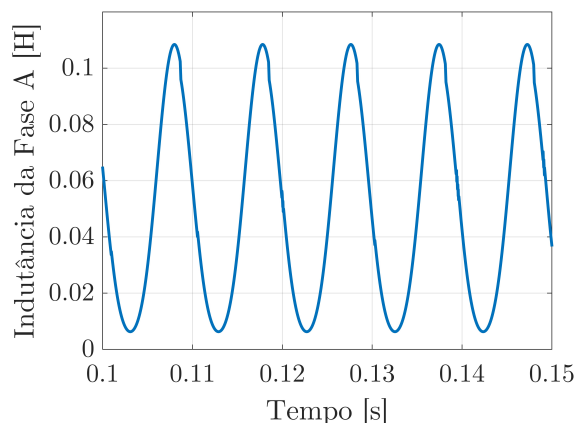


Figura 3.7 - Comportamento dinâmico da indutância das bobinas para o modelo de representação pela série de Fourier com interpolação.

efetuada com analisador de impedância descritas por [Araujo \(2006\)](#), onde são apresentadas indutâncias cujas formas de onda são mais abauladas nos valores mínimos e mais agudas nos valores máximos, resultado das características construtivas do gerador.

Este modelo considera também a saturação magnética do núcleo da máquina, uma vez que, além das indutâncias serem determinadas como ilustrado na Fig. 3.7, são determinadas várias curvas de indutância para cada amplitude de corrente, compondo assim a superfície de indutância, como ilustra a Fig. 3.8.

Desta forma, o modelo computacional recebe, conforme ilustra a Fig. 3.4, além da posição angular do rotor, o valor instantâneo da corrente na bobina para compor a curva de indutância conforme a amplitude da corrente, dada a dependência entre estas duas grandezas como expresso em 3.1.

3.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou o modelo matemático do gerador a relutância chaveado. Esta modelagem é importante pois, corresponde ao item fundamental do sistema de simulação. A simulação do gerador, também detalhada neste capítulo, pode ser utilizada considerando diferentes métodos de representação das indutâncias das bobinas do gerador, sendo que a escolha do método de representação impacta diretamente nos valores de saída da simulação. Métodos mais adequados de se representar as indutâncias proporcionam valores de simulação mais próximos dos valores obtidos

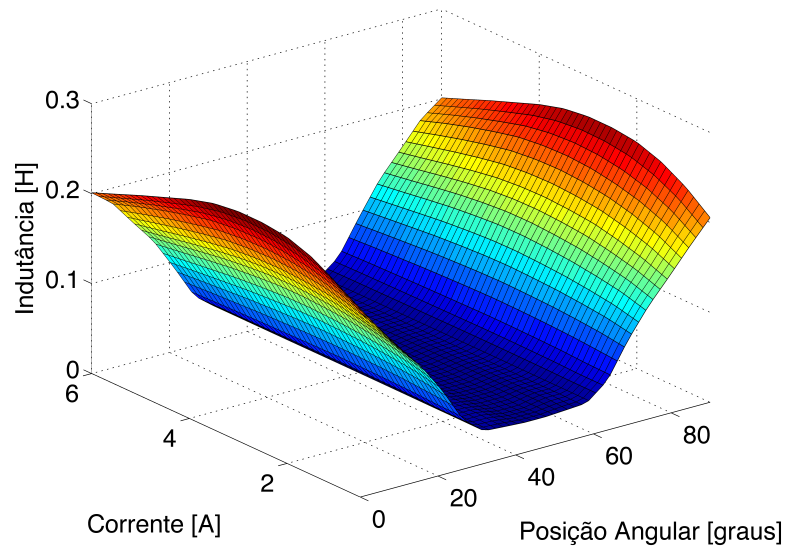


Figura 3.8 - Ilustração da superfície de indutância com conjunto de pontos levantados experimentalmente.

experimentalmente. A modelagem matemática e o modelo computacional são importantes para avaliar os resultados obtidos na plataforma experimental, os quais serão discutidos nos capítulos posteriores.

CAPÍTULO 4

PROCESSOS DE OTIMIZAÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os conceitos relevantes sobre o processo de otimização. O intuito é estabelecer a base para a compreensão da metodologia desta pesquisa. Serão abordados os problemas de otimização, os métodos de otimização determinísticos e heurísticos com ênfase no algoritmo genético.

4.1 Problemas de Otimização

O processo de otimização de sistema é na essência encontrar a melhor solução entre várias soluções possíveis que estão disponíveis. As soluções possíveis são aquelas que satisfazem todas as restrições do problema de otimização. A melhor solução poderia ser minimizar o custo de determinado processo ou maximizar a eficiência de determinado sistema. Os problemas atuais na área de otimização são multidisciplinares e multiobjetivo. As técnicas de otimização empregadas para resolver problemas são, além das baseadas em gradientes, também as baseadas em processos naturais, como algoritmos genéticos, colônias de formigas, nuvens de partículas entre outros (ARORA, 2015).

Nos problemas de otimização, uma função deve ser maximizada ou minimizada. Normalmente, utiliza-se apenas a minimização, pois mesmo o problema de maximização pode ser transformado em problema de minimização. Tendo o problema de maximização de $f(x)$, o maior valor a se obter é ∞ . Desta forma, se $f(x)$ é função definida em $\mathbb{R}$, tem-se:

$$\lim_{f(x) \rightarrow 0} \frac{1}{\min f(x)} = \infty \quad (4.1)$$

onde $\min f(x)$ é o problema de minimização. Assim, leva-se o problema de maximização no problema de minimização.

Para definir o problema de minimização, onde o ponto ótimo será sempre o *zero*, basta calcular o módulo de $|f(x)|$, garantindo que, seja o problema de maximizar ou de minimizar, sempre o *zero* será o ponto ótimo global. Este processo facilita ao desenvolvedor, pois na maioria dos casos não se sabe qual é o valor de $f(x)$ a ser alcançado no processo de otimização. A função $f(x)$ que está sendo otimizada é

chamada de função objetivo ou função de avaliação.

Os valores assumidos por x em $f(x)$, são designados variáveis de projeto ou variáveis de decisão. Considerações práticas fazem com que estas variáveis estejam dentro de determinada faixa de valores, limitada por limite inferior x_L e limite superior x_U . O problema de otimização pode ser expresso matematicamente por:

$$\begin{aligned} & \min f(x) \\ & \text{sujeito à :} \\ & g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \leq n \\ & h_j(x) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, r \leq n \\ & \text{com } x \in \mathbb{R}^n \subset \Omega \end{aligned} \tag{4.2}$$

onde Ω é o conjunto onde as soluções existem e são viáveis, dadas as restrições no espaço de busca, x é o vetor com n variáveis de decisão (parâmetros a serem otimizados), dado por:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

As funções $f(x)$, $g_i(x)$ e $h_j(x)$, para os métodos determinísticos, devem ser diferenciáveis e x deve ser limitado em x_L e x_U . As restrições $g_i(x)$ são de desigualdade e $h_j(x)$ são de igualdade. As restrições do problema de otimização são funções das variáveis de decisão. Além disto, o número de restrições $g_i(x) + h_j(x) \leq n$. Se as variáveis do projeto satisfazem todas as restrições, então elas representam o conjunto viável e, desta forma, qualquer elemento do conjunto é chamado de ponto viável. Se a função de avaliação e as restrições são funções lineares em x , o problema de otimização é denominado problema de otimização linear.

Na grande maioria dos problemas, as funções de avaliação são multimodais, isto é, possuem vários pontos ótimos tanto locais quanto globais. A Fig. 4.1 ilustra alguns pontos de máximo e mínimo global e máximo e mínimo local, onde é possível a identificação no plano dos valores das isolinhas, ou seja, no plano $x_1 \times x_2$, onde o $\times$ vermelho indica o ponto de máximo global e o $\times$ azul indica o ponto de mínimo

global.

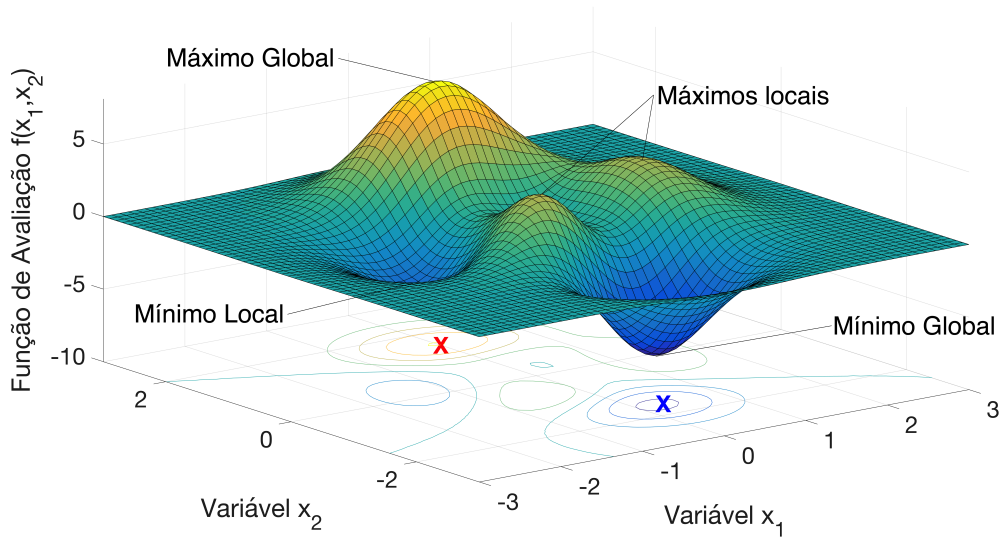


Figura 4.1 - Pontos ótimos locais e globais para função de duas dimensões.

4.2 Métodos Determinísticos de Otimização

Os métodos determinísticos de otimização empregam técnicas analíticas para a minimização da função de avaliação. Estes métodos possuem dependência do conhecimento das derivadas da função de avaliação e da estimativa inicial (valores iniciais de x). Tais técnicas baseiam-se no gradiente da função de avaliação, ou seja, baseiam-se na matriz Jacobiana ou na matriz Hessiana. Assim, é fornecida a direção de busca necessária para localizar o máximo ou o mínimo da função. Como a maioria das aplicações práticas são não lineares, a busca por $f'(x)$ é realizada através de técnicas numéricas para encontrar a derivada da função em certo ponto. Se $f(x)$ é conhecida em um ponto x , então o valor da função na vizinhança $x + \Delta x$ deste ponto pode ser calculada usando a série de Taylor, dada por:

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x \cdot f'(x) + \frac{\Delta x^2}{2!} \cdot f''(x) + \frac{\Delta x^3}{3!} \cdot f'''(x) + \dots \quad (4.4)$$

Isto vale para função com apenas uma variável. Se mais variáveis são envolvidas, o gradiente de $f(x)$ pode ser obtido através das derivadas parciais em relação a cada

uma das variáveis:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f}{\partial x_2} \\ \dots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Para problemas de otimização restrita, é possível que a mudança na direção do gradiente resulte na migração para região inviável. Em tal caso, deseja-se mover em alguma outra direção de busca e também conhecer a taxa de mudança de função nesta direção. A derivação direcional fornece informações sobre a taxa instantânea de mudança de determinada função na direção particular.

Estes métodos, embora possam ser empregados para encontrar a solução ótima de determinado problema, possuem inconvenientes, tais como: i) apresentam dificuldades de encontrar soluções ótimas globais, ii) apresentam dificuldades de análise do problema quando o mesmo envolve variáveis discretas, iii) necessitam que as funções sejam diferenciáveis, iv) quanto maior o número de variáveis do problema, torna-se difícil obter o ponto ótimo numericamente e v) são pouco eficazes em tratar de problemas de otimização multiobjetivo.

4.3 Métodos Heurísticos de Otimização

Os métodos de otimização heurísticos são métodos de busca randômica onde a cada iteração buscam se aproximar da resposta ótima ou otimizada. Assim como os métodos determinísticos, fazem uso da função de avaliação. Porém, com algumas vantagens, tais como: i) não necessitam que a função de avaliação seja contínua ou diferenciável, ii) trabalham com parâmetros contínuos, discretos ou com a associação de ambos, iii) não existe restrição quanto ao ponto de partida dentro do espaço de busca da solução, iv) otimizam elevado número de variáveis com relativa facilidade de implementação computacional e v) são flexíveis para se trabalhar com restrições arbitrárias e otimizam múltiplas funções.

Os métodos heurísticos possuem maior robustez quando comparados aos métodos determinísticos, pois permitem encontrar soluções otimizadas mesmo em problemas

cujas superfícies de otimalidade contenham vários ótimos locais. No entanto, necessitam de maior desempenho computacional, exigindo maior tempo de processamento. Dentre as técnicas de otimização que empregam métodos de busca randômica, destacam-se o algoritmo genético (AG).

4.3.1 Algoritmo Genético

O algoritmo genético é otimizador de busca baseado no mecanismo de seleção natural. Eles dependem do princípio mais importante de Darwin, a sobrevivência do mais apto. A população inicial de indivíduos é gerada de modo aleatório e submetida a várias transformações. Depois de algumas gerações, deseja-se que a população evolua e o melhor indivíduo da população seja o representante da solução ótima ou otimizada. O algoritmo genético (AG) imita o processo genético em que as características hereditárias são transmitidas dos progenitores para a prole. A unidade básica de herança é o gene, que neste caso são os valores $x_1, x_2, \dots, x_n$ dentro do vetor x .

Nos métodos determinísticos, a solução se move de um ponto para outro usando o gradiente, como indicado em (4.5). O AG trabalha com população de pontos em vez de único ponto. Assim, é calculada a função de avaliação para cada indivíduo da população, que é uma possível solução do problema. O melhor indivíduo de cada população é copiado para que possa ser inserido na nova população, após as operações, o que se dá o nome de elitismo. O elitismo garante que no pior caso, o melhor indivíduo da próxima geração $g+1$ seja igual ao melhor indivíduo da geração anterior g (CALIXTO et al., 2015).

Após o elitismo, os indivíduos são selecionados para a escolha dos progenitores. A seleção normalmente é realizada utilizando o valor da função de avaliação de cada indivíduo. De posse dos progenitores, realiza a primeira operação, o cruzamento, onde os genes são recombinados entre os progenitores para gerar o novo indivíduo, na esperança que seja produzido melhor descendência. A melhor descendência indica que os novos indivíduos têm função de avaliação melhor que dos pais.

Após a aplicação do operador de cruzamento, a nova população está formada. Desta forma, aplica-se o operador de mutação nesta nova população. A mutação é a perturbação no valor do gene, alterando seu valor para mais ou para menos, dependendo da variável aleatória binária de decisão. Na sequência, o melhor indivíduo é inserido na nova população, começando novo ciclo de avaliação dos indivíduos. A Fig. 4.2

apresenta o fluxograma de funcionamento do AG.

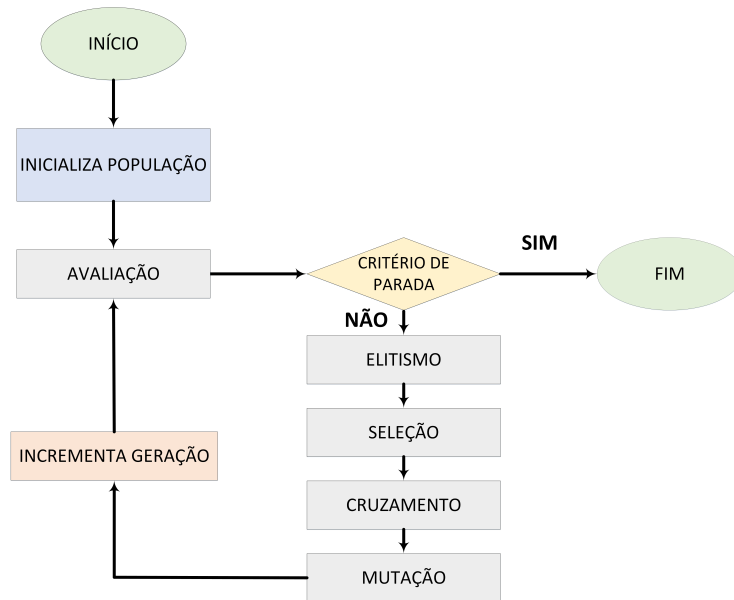


Figura 4.2 - Fluxograma do funcionamento do algoritmo genético.

A eficiência do algoritmo genético depende da exploração de novas regiões no espaço de busca e da exploração de regiões já visitadas. O algoritmo genético inicia sua busca após serem definidos os parâmetros internos: i) tamanho da população representado por matriz $m \times n$ onde a matriz populacional contém m indivíduos com n genes, ii) taxa de cruzamento que é definida como o valor da probabilidade de cruzamento de dados progenitores e quanto maior a taxa, maior a inclusão de novos indivíduos na população, iii) taxa de mutação que é definida como a taxa de ocorrência da operação de mutação sobre dado cromossomo, iv) critério de parada que é o que indica quando o processo de busca deve cessar e v) o número máximo de gerações g .

O operador de cruzamento é aplicado sobre a população com o objetivo de explorar globalmente o espaço de busca (*exploration*). O operador de mutação é aplicado sobre a população com o objetivo de explorar localmente o espaço de busca (*exploitation*). Estes processos cessam ao encontrar as melhores soluções para o problema ou quando $g = g_{max}$.

4.4 Regressão Paramétrica

As técnicas de identificação de sistemas normalmente são integradas por processos de otimização que envolvem algumas medidas para adequação de modelos matemáticos candidatos a representar o processo real, sendo que a seleção de modelos e o ajuste dos parâmetros são influenciados por diversos fatores, tais como: i) conhecimento prévio do sistema (linearidade, grau de não linearidade, atrasos); ii) propriedades do modelo (complexidade); iii) seleção da medida de erro a ser minimizada; (iv) presença de ruídos (JOHANSSON, 1993). A Fig. 4.3 ilustra o diagrama para o procedimento básico de identificação de determinado sistema.

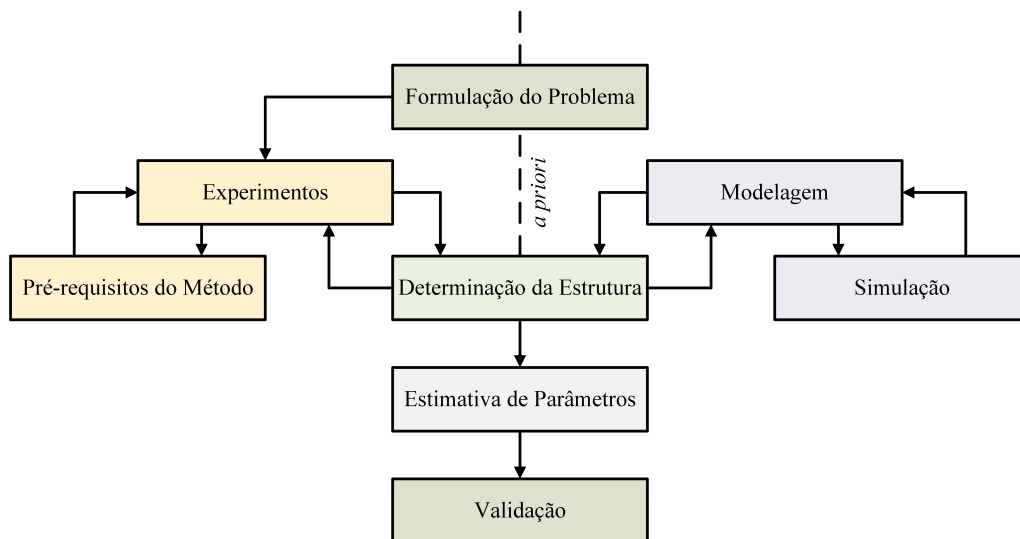


Figura 4.3 - Fluxograma do procedimento para identificação de sistema.

Na Fig. 4.3 é possível observar que independente da presença do conhecimento prévio sobre o sistema, a estimativa de parâmetros está presente no processo de identificação para posterior validação. Nesta etapa, é comum o emprego de técnicas de otimização de forma a se obter expressões que representem o modelo real. Como exposto por Gomes et al. (2016), além das aproximações polinomiais comumente empregadas para representar o comportamento de determinada função ou sistema, outros tipos de aproximações podem ser empregadas como séries exponenciais e séries trigonométricas. As séries escolhidas para representar determinado sistema a partir de dados experimentais devem ser escolhidas de acordo com o comportamento do sistema e considerando a necessidade de extrapolação da identificação além dos

limites dos valores de entrada empregados no ensaio. A Fig. 4.4 ilustra o processo de obtenção da expressão de determinado sistema a partir de dados experimentais.

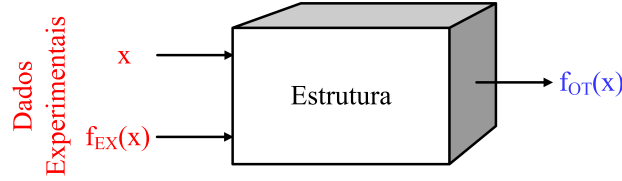


Figura 4.4 - Diagrama do processo de otimização da regressão paramétrica.

Na Fig. 4.4, os valores experimentais x são referentes às variáveis de entrada do sistema e $f_{EX}(x)$ representa a curva determinada pelos pontos obtidos experimentalmente. A expressão $f_{OT}(x)$ é a expressão otimizada de $f_{EX}(x)$, onde os parâmetros da estrutura são gerados com técnicas de otimização, de forma a se obter valores que aproximem a curva experimental da otimizada, ou seja, $f_{EX}(x) \approx f_{OT}(x)$. Esta aproximação é realizada com base na função de avaliação empregada na otimização, onde normalmente se emprega a minimização da diferença entre as curvas $f_{EX}(x)$ e $f_{OT}(x)$ (GOMES et al., 2016). Na estrutura da Fig. 4.4, a função $f_{OT}(x)$ pode ser composta por elementos matemáticos que descrevam adequadamente o sistema, como polinômios, expressões exponenciais e séries trigonométricas, tais como:

$$f_{OT} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot x^{b_i} \cdot \cos(c_i \cdot x + d_i) \cdot e^{e_i \cdot x} \quad (4.6)$$

onde a_0 , a_i , b_i , c_i , d_i e $e_i \in \mathbb{R}$.

4.5 Análise de Sensibilidade

No estudo de sistemas, os diferentes cenários e circunstâncias trazem a necessidade de simplificar os modelos, identificar erros e, principalmente, estabelecer a relação entre as variáveis de entrada e de saída do sistema (SARAIVA et al., 2017). Além das técnicas de identificação de sistemas, que permitem a obtenção de expressões que representam o comportamento dinâmico de determinado sistema, é necessário conhecer quantitativamente qual a influência das variáveis de entrada sobre as variáveis de saída do sistema. Desta forma, a análise de sensibilidade pode ser empregada, sob diferentes técnicas, para se obter os valores desta influência.

De acordo com Hamby (1994), as técnicas de análise de sensibilidade podem ser categorizadas em três grupos: i) aquelas que manipulam apenas uma variável por vez, ii) as que dependem da geração da matriz de entrada associada ao vetor de saída e iii) aquelas que requerem a partição particular do vetor de entrada baseada no vetor de saída.

Dentre os métodos destacados, o método que consiste em variar apenas uma variável por vez, também conhecido como *one-at-a-time*, para o sistema de k variáveis de entrada, promove a variação em uma das variáveis de entrada enquanto $k - 1$ variáveis permanecem constantes em seus valores chamados valores de base. A saída do sistema para os valores base de entrada é representado por β . O cruzamento do eixo das ordenadas com o eixo base β , indica a solução base como $\beta(x_1, x_2, \dots, x_n)$. O eixo das abscissas apresenta a variação nos valores dos parâmetros x_i em porcentagem, originando a ilustração da Fig. 4.5 para duas variáveis.

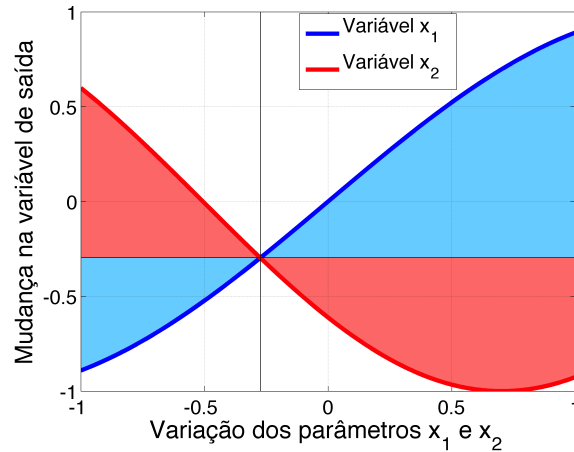


Figura 4.5 - Áreas para análise de sensibilidade de parâmetros.

Desta forma, as variações nas entradas x_1 e x_2 estabelecem as curvas cujas áreas entre a influência da variável de entrada e o valor de β representa a sensibilidade das variáveis de entrada, ou seja:

$$S_a(x_i) = \frac{A(x_i)}{\sum_{i=1}^k A(x_i)} \quad (4.7)$$

onde $S_a(x_i)$ é o índice de sensibilidade, em termo percentual, que representa a contribuição da área $A(x_i)$ do referido parâmetro de entrada, em relação à área total (SARAIVA et al., 2017).

4.6 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os conceitos básicos relacionados à otimização determinística e heurística, destacando a obtenção das soluções ótimas ou otimizadas para determinado problema. Descreveu de forma sucinta o algoritmo genético que será utilizado para a sintonia do controlador de potência e elevação do rendimento do gerador a relutância chaveada. A junção de todo conhecimento descrito neste capítulo e nos capítulos anteriores será disposto no capítulo de metodologia.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia desenvolvida para obtenção dos resultados e confirmação das hipóteses deste trabalho. A fundamentação teórica apresentada nos capítulos anteriores forma a base para a construção da metodologia e para a análise dos resultados a serem apresentados no próximo capítulo. A metodologia apresentada envolve o projeto e a construção da plataforma experimental para o gerador a relutância chaveado, o procedimento para obtenção de novo modelo de representação das indutâncias das bobinas, projeto e construção de sistema para detecção indireta de conjugado, a análise de sensibilidade dos parâmetros do gerador, o controle da tensão de saída e a técnica de rastreamento para elevação do rendimento.

5.1 Projeto e Desenvolvimento da Plataforma Experimental

A confirmação das hipóteses apresentadas requer a construção de plataforma experimental para validação da simulação com o sistema real. A máquina de relutância chaveada (GRC) utilizada neste estudo foi projetada e construída no trabalho de [Araujo \(2006\)](#), no qual a máquina foi acionada e controlada como motor, visando a minimização das oscilações de conjugado. A operação da máquina de relutância chaveada como gerador requer a aplicação de potência mecânica externa por máquina primária, a qual aplica ao eixo do GRC o conjugado mecânico externo T_M . A Fig. 5.1 ilustra o diagrama em blocos da plataforma experimental construída.

O conjunto ilustrado na Fig. 5.1 é integrado por um motor de indução trifásico (MIT) que fornece conjugado externo ao eixo do GRC. Esta máquina primária é alimentada por conversor de frequência de forma a proporcionar o acionamento em várias velocidades, possibilitando observar o comportamento do GRC perante a variações de velocidade, ou seja, o conjunto MIT e conversor de frequência representa o comportamento de uma turbina eólica para fornecimento de potência mecânica para o GRC.

O acoplamento mecânico entre as máquinas necessita do emprego de sensor de posição. Isto é realizado integrando o encoder absoluto, uma vez que o acionamento do GRC possui dependência com a posição angular instantânea do rotor θ , como expresso em (2.1) e na Fig. 2.3. O acoplamento do GRC, MIT e encoder é igualmente ilustrado na Fig. 5.1.

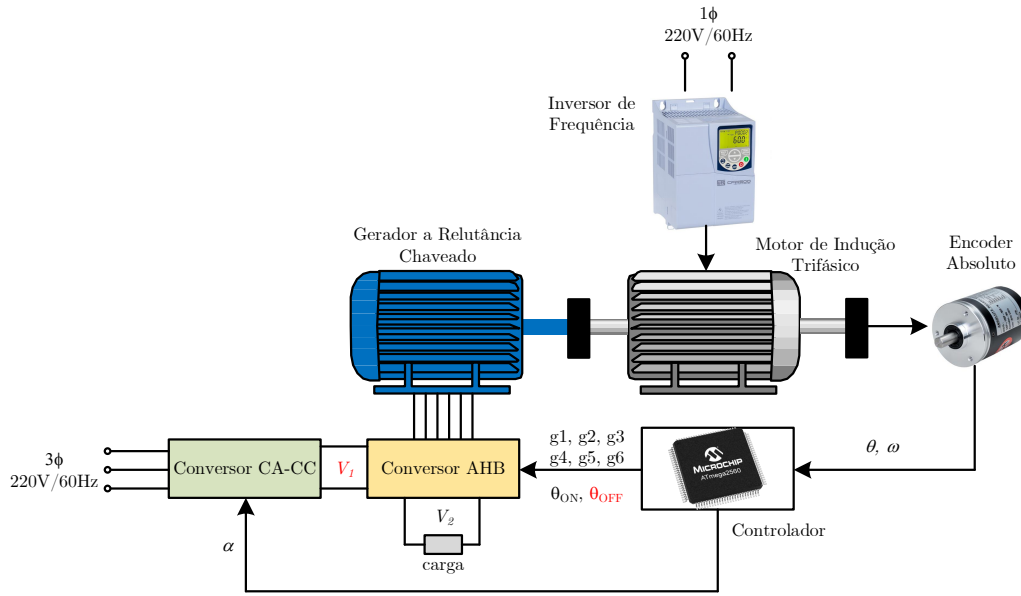


Figura 5.1 - Diagrama em blocos da plataforma experimental a ser desenvolvida.

Na Fig. 5.1, os seis terminais do GRC ilustrados correspondem aos terminais das três bobinas do gerador, por se tratar de máquina de topologia 6×4 . Estas bobinas devem ser energizadas nos instantes adequados de forma a permitir a magnetização das mesmas e, em seguida, energizar a carga conectada aos terminais do gerador durante a etapa de desmagnetização. Este processo é permitido com o emprego do conversor de potência, ilustrado nas Fig. 2.4, Fig. 2.5 e Fig. 2.7. Na Fig. 5.1, V_1 e V_2 são a tensão de excitação e a tensão de saída sobre a carga, respectivamente.

O conversor de potência a ser desenvolvido é o conversor AHB. Porém, deseja-se construir o conversor que permita a manipulação da plataforma experimental minimizando a necessidade de alterações de hardware para diferentes tipos de ensaio. Para se alcançar este objetivo, será desenvolvido o conversor ilustrado na Fig. 5.2.

O conversor AHB da Fig. 5.2 está integrado com três relés. Estas chaves eletromecânicas são inseridas no circuito do conversor de forma a permitir que o mesmo seja reconfigurado para acionamento da máquina de relutância como motor ou como gerador, sem necessidade de alteração na plataforma experimental, pois o próprio controlador do sistema efetua o fechamento dos relés para configuração do conversor, visando o acionamento desejado. Na Fig. 5.2, os medidores indicados como S1 e S2 são conjuntos compostos por sensores de tensão e de corrente, ambos de efeito

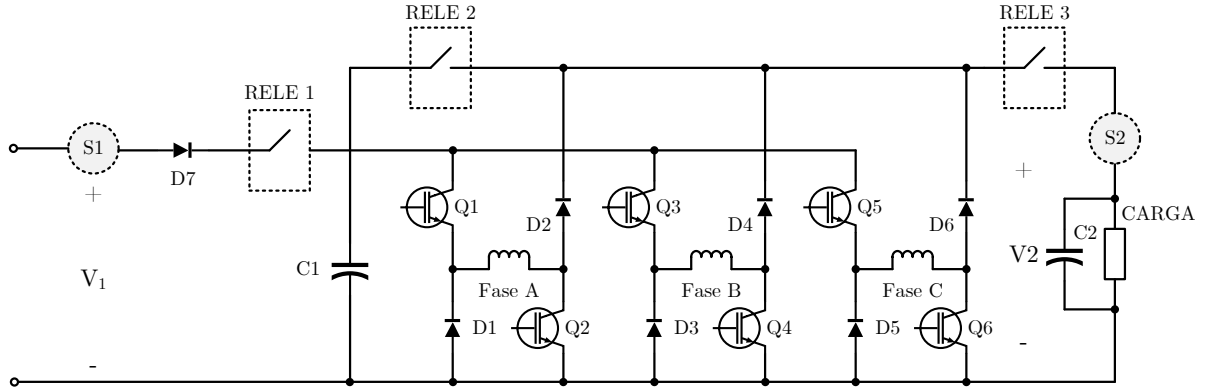


Figura 5.2 - Conversor de potência para excitação do GRC.

Hall. Estes sensores têm como função mensurar a tensão e a corrente de entrada (excitação) do gerador, bem como a tensão e a corrente de saída, sobre a carga, pois tais medições são necessárias para obtenção do rendimento do GRC.

A metodologia é construída com o desejo de implementar o controle da tensão de saída do GRC paralelamente a técnica de rastreamento para a elevação do rendimento. A variável manipulada do controle pode ser a tensão de excitação V_1 ou os ângulos de chaveamento θ_{ON} e θ_{OFF} , pois como apresentado na Fig. 2.6, estes parâmetros interferem tanto na etapa de excitação quanto na etapa de desmagnetização do gerador, contribuindo com a tensão proporcionada na saída. Desta forma, há a necessidade de desenvolvimento do conversor que permita a aplicação de tensão CC variável ao barramento de excitação do conversor AHB. Este segundo circuito é o conversor $CA - CC$ controlado.

O conversor $CA-CC$ é conectado à rede trifásica por meio de transformadores, de forma a ser alimentado por uma tensão de linha de 220 V. Além disto, o conversor poderá aplicar aos terminais do GRC valores de tensão que possa levar o gerador à saturação do núcleo, proporcionando avaliar o comportamento do rendimento do GRC para esta situação. O conversor $CA-CC$ é ilustrado na Fig. 5.3.

O conjunto experimental também será integrado por controlador para acionamento e controle do GRC. Este controlador será empregado para o correto chaveamento do conversor AHB e do conversor $CA-CC$ para excitação controlada do GRC. Este conjunto permitirá avaliar o comportamento da excitação do GRC de forma a permitir estudos de integração do gerador com painéis solares fotovoltaicos para excitação.

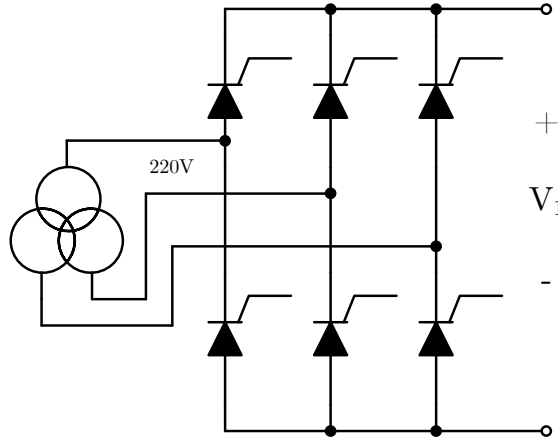


Figura 5.3 - Conversor $CA - CC$ controlado para excitação do gerador.

Na Fig. 5.1, as variáveis indicadas em vermelho (V_1 e θ_{OFF}) são as variáveis potencialmente favoráveis para serem empregadas como variáveis manipuladas no controle da tensão de saída.

No capítulo posterior serão apresentados com maiores detalhes os elementos ilustrados na Fig. 5.1.

5.2 Elaboração e Validação do Modelo Computacional

Os modelos matemático e computacional do GRC apresentados na literatura destacam a relevância do modelo de representação das indutâncias. Como este trabalho visa implementar técnicas de otimização do controle do GRC, é desejável que o modelo computacional seja próximo da plataforma experimental (sistema real). Sendo assim, é necessário o emprego de metodologia para obtenção de modelo que represente as indutâncias das três bobinas do GRC e que seja o mais fidedigno possível.

Para obtenção deste modelo, inicialmente são coletados valores de indutância pela posição angular do rotor θ e pelo valor da corrente i na bobina, isto para uma das bobinas do GRC. A Fig. 5.4 ilustra o circuito para levantamento dos valores $L(\theta, i)$.

A tensão senoidal será aplicada aos terminais de uma das bobinas do GRC e, a partir dos valores de tensão eficaz V_{EF} e corrente eficaz I_{EF} medidos nos instrumentos, a indutância é obtida empregando a expressão:

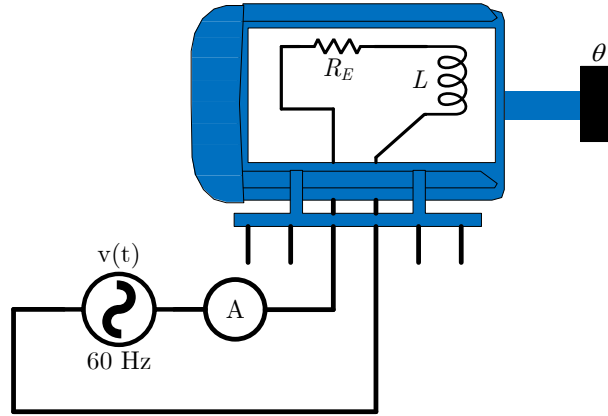


Figura 5.4 - Circuito para levantamento dos pontos de indutância.

$$L = \sqrt{\left[\left(\frac{V_{EF}}{I_{EF}}\right)^2 - (R_E)^2\right]} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^{-1} \quad (5.1)$$

onde V_{EF} e I_{EF} são valores eficazes de tensão e corrente lidos e f é a frequência da tensão aplicada aos terminais da bobina. Este procedimento de coleta dos valores v e i é repetido para vários valores de θ , de forma a compor a superfície de indutância, como ilustrado na Fig. 3.8. O procedimento será realizado para apenas uma das três bobinas do GRC, como ilustra a Fig. 5.4, uma vez que as demais possuem as mesmas características construtivas, possuindo como diferença apenas o deslocamento de 60 graus mecânicos uma com relação às outras, como ilustra a Fig. 3.5.

De posse da superfície experimental de indutância, composta por número finito de pontos, o próximo procedimento é o desenvolvimento do algoritmo de regressão paramétrica para obtenção da expressão $L(\theta, i)$ que forneça a superfície de simulação que possua valores os mais próximos possível dos valores da superfície experimental.

Será levantado um conjunto de pontos $L(\theta, i)$ de forma a se obter a superfície de indutância do GRC. Serão levantados 108 pontos de indutância. Essa quantidade de pontos é referente às indutâncias levantadas para as posições angulares de 0° , 6° , 11° , 16° , 22° , 27° , 33° , 39° e 45° , ou seja, 9 pontos entre a posição alinhada (0°) até a posição de total desalinhamento (45°). Para cada posição angular, a corrente aplicada à bobina foi variada de 0 A até 6 A, em intervalos de 0,5 A.

Muitos trabalhos na comunidade científica apresentam modelos computacionais da máquina de relutância nos quais os valores de $L(\theta, i)$ são buscados em alguma tabela de referência, denominada *look-up table*. Contudo, um dos objetivos deste trabalho é a obtenção de uma equação que proporcione uma superfície contínua de indutância, ou seja, que possua infinitos pontos $L(\theta, i)$, de forma que esta superfície contínua possa contribuir positivamente com o modelo computacional tanto em relação à acurácia dos resultados em comparação com a plataforma experimental quanto ao tempo de simulação.

Dessa forma, foi criada uma equação $L(\theta, i)$ com três componentes: i) distribuição exponencial (f_1), ii) série de Taylor (f_2) e iii) série de Fourier (f_3), conforme indicado na equação 5.2.

$$L_{CONT}(\theta, i) = p_1 + (f_1 \cdot f_2 \cdot f_3) \quad (5.2)$$

Os termos f_1 , f_2 e f_3 foram descritos como:

$$f_1(\theta, i) = p_2 \cdot e^{p_3} \cdot e^{p_4} \quad (5.3)$$

$$f_2(\theta, i) = p_5 \cdot i^{p_6} + p_7 \cdot \theta^{p_8} + p_9 \cdot i^{p_{10}} + p_{11} \cdot \theta^{p_{12}} + p_{13} \cdot i^{p_{14}} + p_{15} \cdot \theta^{p_{16}} \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned} f_3(\theta, i) = & p_{17} \cdot \text{sen}(p_{18} \cdot i + p_{19}) + p_{20} \cdot \text{sen}(p_{21} \cdot \theta + p_{22}) \\ & + p_{23} \cdot \text{sen}(p_{24} \cdot i + p_{25}) + p_{26} \cdot \text{sen}(p_{27} \cdot \theta + p_{28}) \\ & + p_{29} \cdot \text{sen}(p_{30} \cdot i + p_{31}) + p_{32} \cdot \text{sen}(p_{33} \cdot \theta + p_{34}) \end{aligned} \quad (5.5)$$

Ou seja, a equação 5.2 possui 34 parâmetros a serem encontrados de forma a se obter uma superfície contínua de indutância que seja a mais próxima possível da superfície experimental.

Para se obter os parâmetros das equações 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 será empregada uma

técnica denominada regressão paramétrica, na qual os parâmetros de uma função são obtidos empregando algum processo de otimização. Neste caso, foi aplicado o algoritmo genético híbrido, que tem como objetivo aproximar a superfície contínua da superfície experimental. Dessa forma, a função de avaliação deste algoritmo corresponde à diferença entre a superfície experimental L_{EXP} e a superfície contínua L_{CONT} . Logo, o algoritmo possui como função, a minimização dessa diferença entre as superfícies, conforme indicado na equação 5.6.

$$f_a(p) = \frac{\sum |L_{EXP}(\theta, i) - L_{CONT}(\theta, i)|}{\sum L_{EXP}(\theta, i)} \quad (5.6)$$

O algoritmo do otimizador empregado é o algoritmo genético híbrido, pois associa as técnicas determinísticas e heurísticas para minimizar a função objetivo. O algoritmo genético foi ajustado para populações contendo 20 indivíduos, com no máximo 100 gerações. Além disto, foi empregado o método de mutação uniforme, seleção por torneio e cruzamento heurístico. Os valores iniciais são definidos pelo algoritmo genético aleatoriamente e quando ocorre a estagnação do processo de minimização, os melhores valores são transferidos para o método determinístico (Método de Quase-Newton). Os valores otimizados pelo Método de Quase-Newton são devolvidos ao algoritmo genético que continua o processo de minimização até o critério de parada estabelecido.

5.3 Projeto e Construção do Sistema de Detecção Indireta de Conjugado

Na modelagem matemática descrita em (3.9) e em (3.10), o conjugado eletromagnético da máquina de relutância chaveada é dado como a taxa de variação da coenergia. Desta forma, a expressão (3.10) pode ser reescrita para as três fases do GRC como:

$$T_{EM} = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{\partial L_A}{\partial \theta} + \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{\partial L_B}{\partial \theta} + \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{\partial L_C}{\partial \theta} \quad (5.7)$$

A expressão (5.7) indica o conjugado eletromagnético como sendo a contribuição individual de cada uma das fases do GRC. Considerando o modelo de indutância como senoidal, a taxa de variação da indutância pode ser obtida, como indicado em (3.18), (3.19) e (3.20). Logo, o conjugado eletromagnético T_{EM} pode ser reescrito como:

$$T_{EM} = -2 \cdot B \cdot i_A^2 \cdot \text{sen}(4 \cdot \theta) - 2 \cdot B \cdot i_B^2 \cdot \text{sen}[4 \cdot (\theta - 60^\circ)] - 2 \cdot B \cdot i_C^2 \cdot \text{sen}[4 \cdot (\theta + 60^\circ)] \quad (5.8)$$

O valor de B em (5.8) foi determinado através de interpolação polinomial para vários valores de corrente, considerando então a saturação do material magnético.

Sendo assim, outro procedimento a ser realizado é o projeto e o desenvolvimento do hardware que, a partir das medições das correntes instantâneas nas bobinas i_A , i_B e i_C e da posição angular instantânea θ , possa efetuar o cálculo do valor instantâneo do conjugado eletromagnético, uma vez que os valores destas grandezas permitem calcular o valor da potência mecânica exigida no eixo do GRC para geração de energia, possibilitando o cálculo do rendimento do gerador. A Fig. 5.5 ilustra o diagrama em blocos do sistema de medição indireta de conjugado a ser desenvolvido.

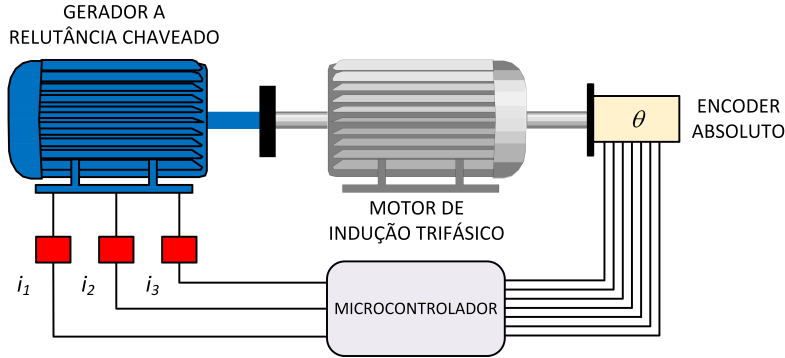


Figura 5.5 - Diagrama do sistema para detecção indireta de conjugado.

O microcontrolador da Fig. 5.5 é utilizado para efetuar a leitura das correntes das três bobinas do GRC, obtidas a partir de três sensores de corrente de efeito *Hall*, destacados em vermelho em cada fase do GRC. Os sinais proveniente dos sensores, já devidamente condicionados, são digitalizados pelo conversor analógico-digital do microcontrolador que, a partir da medição da posição instantânea θ do rotor, efetua o cálculo do conjugado eletromagnético. Observa-se que (5.8) permite a obtenção do conjugado eletromagnético empregando o modelo senoidal de indutância. Contudo, o valor da constante B em (3.22) é definido considerando os resultados obtidos para os valores de indutância experimentais, isto é, espera-se que os valores de L_{MAX}

possam ser definidos pela expressão que mapeia a superfície de simulação, de forma que o conjugado não dependa exclusivamente do modelo linear. O microcontrolador da Fig. 5.5 proporcionará na saída um sinal PWM que, após filtragem, poderá ser lido pelo controlador principal do sistema, indicado na Fig. 5.1.

O valor instantâneo do conjugado eletromagnético permite obter o valor do conjugado total no eixo do GRC, que é aplicado pelo motor de indução e pode ser obtido empregando (3.6). Este valor de conjugado permite obter a potência mecânica necessária para a referida geração de potência elétrica do GRC, dado por:

$$P_{mec} = T_M \cdot \omega \quad (5.9)$$

As potências elétricas de entrada e de saída do gerador podem ser obtidas, respectivamente, por:

$$P_1 = V_1 \cdot I_1 \quad (5.10)$$

e

$$P_2 = V_2 \cdot I_2 \quad (5.11)$$

possibilitando a obtenção do rendimento do gerador através de:

$$\eta = \frac{P_{SAIDA}}{P_{ENTRADA}} = \frac{P_2}{P_1 + P_{mec}} \quad (5.12)$$

Desta forma, os procedimentos realizados permitem avaliar outras grandezas do GRC que possibilitam a otimização dos parâmetros de acionamento do gerador de forma a produzir energia potencializando o rendimento.

5.4 Avaliação da Janela de Condução do Conversor de Potência

Conforme exposto na Fig. 2.6, o funcionamento do GRC envolve duas etapas: i) a etapa de excitação do gerador e ii) a etapa de regeneração (ou desmagnetização). A etapa de excitação é determinada pela duração da janela de condução θ_D , definida

como:

$$\theta_D = \theta_{OFF} - \theta_{ON} \quad (5.13)$$

Logo, é possível verificar que a etapa de magnetização possui influência na etapa de regeneração, responsável por transferir a energia do gerador para a carga. Esta influência está relacionada não só à duração da janela de condução quando os instantes θ_{ON} e θ_{OFF} que a definem são modificados. A literatura estabelece que a janela de condução θ_D normalmente é de 30° para máquinas de relutância de topologia 6×4 (ANDRADE; KRISHNAN, 2001) (ROBERT, 2002), preferencialmente com os valores $\theta_{ON} = 0^\circ$ e $\theta_{OFF} = 30^\circ$. Porém, neste trabalho, mesmo com $\theta_D = 30^\circ$, busca-se os instantes θ_{ON} e θ_{OFF} que favoreçam a operação do gerador, como por exemplo, maior geração de potência, maior rendimento e menor oscilação de conjugado. Devido à natureza chaveada da máquina de relutância, o conjugado possui oscilação substancial. Logo, a minimização dos níveis de oscilação do conjugado é interessante uma vez que permite menor vibração mecânica da máquina, fator atrativo para a operação em geração eólica.

A oscilação do conjugado T_R é avaliada de acordo com a expressão:

$$T_R = \sqrt{\left(\frac{T_{e_{rms}}}{T_{e_{avg}}}\right)^2 - 1} \quad (5.14)$$

onde $T_{e_{rms}}$ e $T_{e_{avg}}$ são os valores eficaz e médio do conjugado eletromagnético, respectivamente.

Então, como exposto anteriormente, nesta etapa da metodologia busca-se antecipar o valor do ângulo de acionamento das bobinas do GRC de forma que $\theta_{ON} < 0^\circ$, porém mantendo $\theta_D = 30^\circ$. O valor de θ_{ON} então é decrementado em uma unidade e, a cada iteração, são empregados como métrica de desempenho os valores da potência gerada P_2 , do rendimento η e da oscilação do conjugado T_R . O critério de parada das iterações é quando as métricas apresentam valores desfavoráveis para a iteração n em relação aos valores da iteração $n - 1$. Para os valores mais adequados das métricas, o valor encontrado para θ_{ON} é definido como θ_{ON}^* .

5.5 Análise de Sensibilidade das Variáveis de Controle e Acionamento do GRC

Como as técnicas de análise de sensibilidade permitem obter a influência dos parâmetros de entrada do sistema sobre a variável de saída, esta ferramenta será aplicada para direcionar o acionamento e o controle do gerador a relutância chaveado.

Reis et al. (2015) demonstram que no sistema de controle em malha fechada para o controle de velocidade da máquina operando como motor, apresenta melhores resultados empregando a tensão de excitação como variável manipulada. Para avaliar esta hipótese considerando a máquina de relutância operando como gerador, a análise de sensibilidade *one-at-a-time* será empregada para avaliar a influência de parâmetros como: i) a tensão de excitação V_1 , ii) o ângulo de desligamento das fases θ_{OFF} e velocidade rotórica ω . Conforme exposto anteriormente, as métricas a serem empregadas para avaliação da sensibilidade destas variáveis são os valores da potência gerada P_2 , do rendimento η e da oscilação de conjugado T_R .

Para esta análise, várias simulações serão realizadas com o gerador operando em malha aberta, considerando os valores apresentados na Tab. 5.1.

Tabela 5.1 - Valores utilizados na Análise de Sensibilidade.

	Variável	Faixa de Valores	Valor base
Tensão de Excitação	V_1	0 V a 300 V	150 V
Ângulo de Desligamento	θ_{OFF}	-10° a 40°	15°
Velocidade Rotórica	ω	500 rpm a 1500 rpm	1000 rpm

Conforme exposto no capítulo anterior, na análise de sensibilidade *one-at-a-time* todas as variáveis são mantidas em seu valor base, com exceção de uma delas, que é variada de -100% a 100% de seu valor base. Estas variações serão de 1° para o ângulo de desligamento θ_{OFF} , 6 V para a tensão de excitação V_1 e 20 rpm para a velocidade rotórica ω .

Para cada iteração, as variáveis utilizadas como métrica são armazenadas de forma a integrar, ao final das iterações, um gráfico semelhante ao apresentado na Fig. 4.5. Desta forma, será possível verificar a influência destas grandezas no desempenho do GRC, especialmente considerando os índices de sensibilidade de cada uma delas.

Nesta etapa da metodologia, o ângulo de acionamento θ_{ON} das fases do GRC será mantido fixo no valor encontrado na etapa anterior.

5.6 Otimização do Controlador de Tensão do GRC

Conforme exposto no capítulo anterior, os processos de otimização possibilitam maximizar ou minimizar uma função de forma a encontrar valores mais adequados para parâmetros de um sistema. Neste estudo, como há o interesse em controlar a tensão de saída do GRC, um controlador PID será empregado para esta finalidade. Vários estudos estão disponíveis na comunidade científica acerca dos processos de sintonia de controladores PID, como em [Somasundaram e Benjanarasuth \(2018\)](#), [Tajjudin et al. \(2012\)](#) e [Abedini e Zarabadipour \(2011\)](#).

Porém, o uso dos processos de otimização permitem que o controlador atue com melhor desempenho, potencializando a ação de controle mais adequada ao sistema a ser controlado: proporcional, integral ou derivativa. Além disto, a otimização do controlador pode ser realizada considerando variações na referência (*setpoint*) e perturbações na carga.

Neste estudo, a função de avaliação $f(x)$ a ser minimizada é composta por fatores que relacionam: i) o erro de regime permanente, o sobressinal em relação à referência e a integral absoluta do erro (IAE). Desta forma, o processo de otimização a ser empregado utiliza como função de avaliação a expressão:

$$f_{v_2}(k_p, k_i, k_d) = \frac{1}{3} \cdot \left(\int_0^\infty \left| \frac{e_{v_2}(t)}{v_{2ref}(t)} \right| dt + \left| \frac{v_2(t_M) - v_2(\infty) + e_{v_2}(\infty)}{v_{2ref}(\infty)} \right| \right) \quad (5.15)$$

A função de avaliação v_{v_2} apresentada em 5.15 verifica o desempenho do controlador PID de tensão para o conjunto de parâmetros k_p , k_i e k_d , representando os ganhos proporcional, integral e derivativo do controlador, respectivamente.

Em 5.15, $e_{v_2}(t)$ é o erro instantâneo de tensão em relação à referência $v_{2ref}(t)$. A integral em 5.15 representa a IAE. Na expressão, $v_2(t_M)$ é o valor máximo da tensão de saída do GRC, enquanto que $v_2(\infty)$ e $e_{v_2}(\infty)$ são os valores em regime permanente da tensão gerada e do erro, respectivamente. Desta forma, a IAE, o sobressinal e o erro em regime permanente são normalizados e a média entre estes

três fatores é utilizada como avaliação do conjunto de parâmetros k_p , k_i e k_d , os quais são submetidos a variações e avaliados repetidamente até que o critério de parada do processo de otimização seja atingido.

Para a otimização do controlador PID de tensão aplicado ao GRC, será empregado um processo híbrido, integrado pelo Método de Quase-Newton e pelo Algoritmo Genético, semelhante ao algoritmo para otimização da função $f_a(p)$ para encontrar a superfície contínua de indutância. As características do algoritmo de otimização empregado são: i) Algoritmo Genético com população de 20 indivíduos, ii) valor máximo de 100 gerações, iii) mutação uniforme, iv) seleção por torneio e v) cruzamento heurístico (GOMES et al., 2017).

5.7 Avaliação das Variáveis Manipuladas no Controle de Tensão do GRC

Em um sistema de controle em malha fechada, a variável controlada possui seu valor modificado indiretamente através de outra variável, denominada variável manipulada. Neste estudo, a variável controlada é a tensão de saída do GRC, de forma a proporcionar na saída do gerador valores de tensão que possam ser adequados a sistemas de conversor $CA - CC$ ou a controladores de carga.

Contudo, a tensão de saída do GRC pode ser alterada manipulando variáveis como: i) a tensão de excitação V_1 ilustrada na Fig. 2.7 e ii) o ângulo de desligamento das fases θ_{OFF} ilustrado na Fig. 2.6.

Como exposto em etapas anteriores da metodologia, os ângulos de chaveamento do conversor de potência energizam as bobinas do gerador nos instantes θ_{ON} e θ_{OFF} . Porém, em etapas anteriores do estudo o interesse foi encontrar um valor de θ_{ON} tal que $\theta_{OFF} - \theta_{ON} = 30^\circ$ que contribua positivamente com a potência gerada, o rendimento e a oscilação de conjugado do GRC.

Desta forma, o controle da tensão de saída pode ser realizado manipulando a tensão de excitação V_1 do gerador ou o ângulo de desligamento θ_{OFF} das fases, uma vez que θ_{ON} é mantido fixo no valor mais adequado encontrado na metodologia anterior.

O processo de otimização descrito na etapa anterior da metodologia será empregado para ambas as variáveis, isto é, a otimização será realizada para controlar a tensão de saída do gerador tanto pela tensão de excitação quanto pelo ângulo de desligamento das fases.

Neste caso, o GRC será submetido ao controle de tensão em malha fechada com os ganhos encontrados na metodologia anterior. Tanto para o controle pela excitação V_1 quanto o controle pelo ângulo de desligamento θ_{OFF} , o sistema será submetido a variações na referência que vão de 50 V a 180 V. Da mesma forma, para cada valor de tensão de referência, a velocidade será variada de 500 rpm a 1500 rpm. Para ambos os ensaios a carga do gerador será mantida fixa em 33 Ω .

Este procedimento experimental, embora realizado em nível de simulação, possibilitará a obtenção de superfícies que apresentam de forma qualitativa o comportamento de grandezas importantes do GRC como a tensão gerada, a excitação, o rendimento e a oscilação de conjugado. Tais superfícies serão levantadas tanto para o controle pela excitação quanto para o controle pelo ângulo de desligamento.

Esta etapa da metodologia possui importância substancial para o trabalho, pois seu resultado determinará qual variável manipulada pelo controlador de tensão será utilizada em paralelo com o algoritmo de rastreamento, descrito na seção posterior.

5.8 Desenvolvimento da Técnica de Rastreamento para Potencialização do Rendimento do GRC

Conforme exposto no primeiro capítulo, o objetivo deste estudo é desenvolver o controle da tensão de saída do gerador a relutância chaveado que, além de otimizado, possa operar em paralelo com alguma técnica de rastreamento que proporcione a potencialização do rendimento.

O controlador empregado é o PID, sintonizado via processo de otimização de seus ganhos. Contudo, este é um controlador linear que possui apenas uma saída. Para que a atuação ocorra em mais de uma variável, o controlador PID mantém a tensão de saída do gerador dentro de valores pré-estabelecidos na referência e a técnica de rastreamento atua no ângulo de desligamento das fases, de forma que este rastreamento, a ser elaborado com um algoritmo de perturba e observa, faz com que seja possível encontrar valores para a janela de condução que potencialize o rendimento do GRC.

O algoritmo desenvolvido, denominado MEPT (*Maximum Efficiency Point Tracking* - Rastreamento do Ponto de Máximo Rendimento), em sua primeira etapa aguarda o controlador PID fazer com que a tensão de saída entre em regime permanente, permitindo uma variação de no máximo 10% em torno da referência. Em seguida,

a janela de condução, inicializada com os valores estabelecidos na literatura, isto é, $\theta_{ON} = 0^\circ$ e $\theta_{ON} = 30^\circ$, começa a ser antecipada de forma que θ_{ON} seja, no mínimo, θ_{ON}^* , encontrado na metodologia sobre a avaliação da janela de condução.

O algoritmo apresentado a seguir apresenta todas as etapas do MEPT.

Algorithm 1: Algoritmo para o rastreamento de máximo rendimento.

inicialização;

if $((v_2 \geq 0.95 \cdot sp) \text{ and } (v_2 \leq 1.05 \cdot sp))$ **then**

while $(\theta_{ON} \neq \theta_{ON}^*)$ **do**

$\theta_{ON} = \theta_{ON} - 1$;

$\theta_{OFF} = \theta_{ON} + 30$;

end

if $(\theta_{ON} = \theta_{ON}^*)$ **then**

while $(\eta_k > \eta_{k-1})$ **do**

$\eta_k = \eta_{k-1}$;

$\theta_{OFF} = \theta_{OFF} - 1$;

end

end

end

Conforme pode ser observado, após a tensão de saída do GRC entrar em regime permanente com tolerância de $\pm 10\%$, a janela de condução é atrasada, porém mantendo $\theta_D = 30^\circ$. Em seguida, o valor de θ_{OFF} é decrementado enquanto o valor do rendimento estiver sendo aumentado a cada decremento. Isso faz com que, independente da referência, carga ou velocidade rotórica proporcionados ao gerador, o rendimento será potencializado independente do cenário estabelecido.

5.9 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os procedimentos metodológicos a serem realizados para avaliar a hipótese da possibilidade de controlar a tensão de saída do GRC em paralelo com técnica de rastreamento para elevar o rendimento do gerador. Para esta validação, uma plataforma experimental será projetada e desenvolvida conforme ilustrado na Fig. 5.1. Por outro lado, para aprimorar o modelo computacional, dados experimentais serão coletados na plataforma construída e serão inseridos como dados de entrada em um processo de identificação de sistemas que, via processo de otimização, permitirá a obtenção de uma superfície contínua de indutância $L(\theta, i)$.

Para a medição de valores experimentais de rendimento, é necessário medir o valor do conjugado do gerador, conforme 5.9 e 5.12. Logo, será projetado e desenvolvido um sistema de detecção indireta de conjugado. Percebe-se na Fig. 2.6 que a máquina de relutância possui dependência dos instantes de chaveamento θ_{ON} e θ_{OFF} . Logo, será feita uma análise do comportamento do GRC, em malha aberta, para: i) verificar um valor mais apropriado para θ_{ON} e ii) aplicar a análise de sensibilidade em mais parâmetros de entrada como a tensão de excitação e a velocidade rotórica para definir as variáveis manipuladas pelo controlador PID de tensão. Este controlador, por sua vez, será submetido a processo de otimização para sua sintonia, de forma a se obter ganhos k_p , k_i e k_d favoráveis a seu desempenho. Por fim, a técnica de rastreamento será aplicada em paralelo com o controlador PID otimizado de forma a adequar a janela de condução e, por fim, potencializar o rendimento do GRC.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

Este capítulo destaca os elementos empregados para desenvolvimento da metodologia descrita no capítulo anterior bem como os resultados obtidos pela execução da mesma.

6.1 Apresentação da Plataforma Experimental Desenvolvida

A bancada para realização de ensaios experimentais foi descrita no capítulo anterior, ilustrando seus principais elementos na Fig. 5.1. A Fig. 6.1 apresenta uma fotografia da plataforma experimental construída.

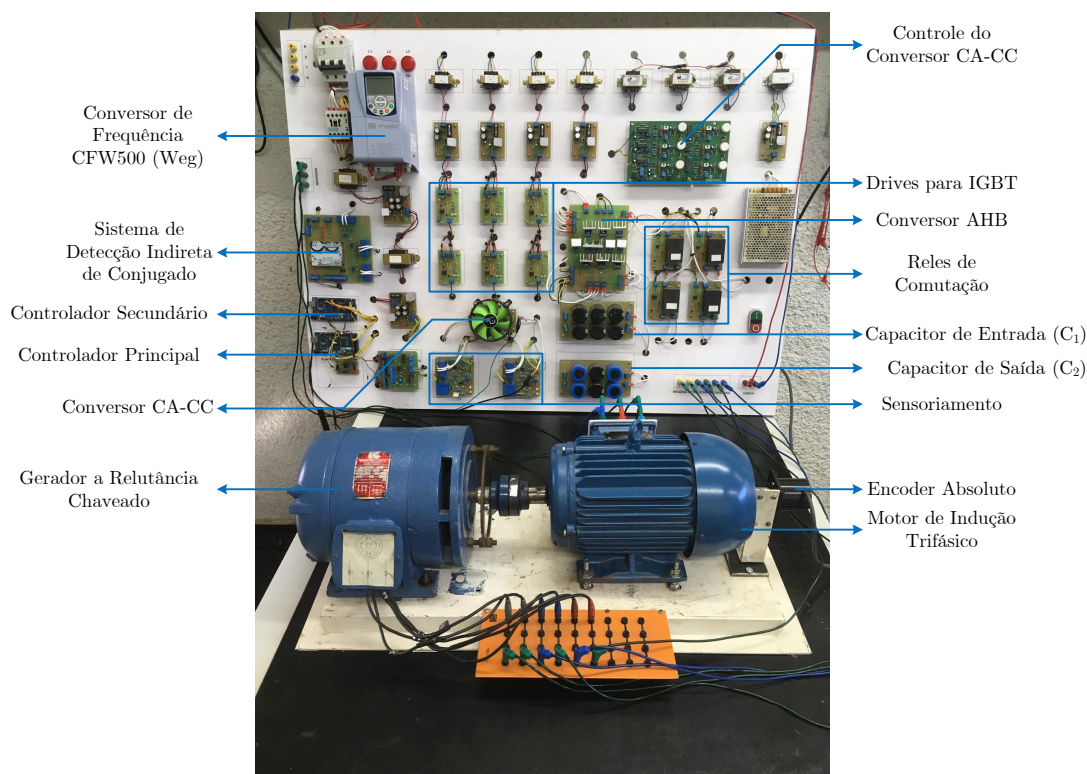


Figura 6.1 - Fotografia da bancada conjunto experimental desenvolvido.

O conversor de potência empregado para acionamento do motor de indução, que fornece energia mecânica para o GRC, é o modelo CFW500, do fabricante WEG. O motor de indução possui potência de 5 cv e o modelo utilizado é o W22 Plus,

Uma vez obtida a tensão do barramento CC do conversor AHB, o mesmo foi construído empregando transistores do tipo IGBT. O dispositivo empregado para o conversor foi o modelo IRG4PC50W, do fabricante International Rectifier. Diodos de modelo MUR1560 são empregados para a etapa de geração.

A integração do controlador com os IGBT do conversor de potência é realizada através de *drivers* para o devido condicionamento dos sinais de comando dessas chaves semicondutoras. O circuito utilizado para os seis IGBT do conversor AHB faz uso do opto acoplador HCPL4503 e é ilustrado na Fig. 6.2.

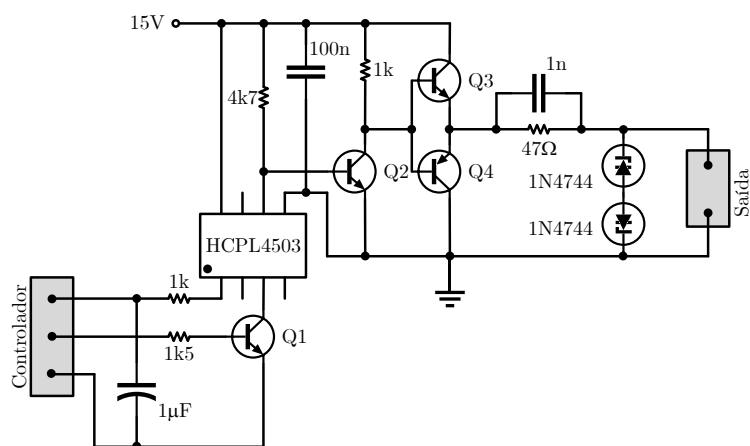


Figura 6.2 - Esquemático do circuito driver para integração do controlador com os IGBT do conversor AHB.

Na fotografia da bancada, apresentada na Fig. 6.1, é possível observar a presença

de dois conjuntos de capacitores, os quais correspondem aos capacitores C_1 e C_2 da Fig. 5.2. A capacitância C_1 corresponde a uma associação de seis capacitores $560 \mu F/400 V$ enquanto que a capacitância C_2 corresponde à associação de seis capacitores $470 \mu F/400 V$. Estes capacitores também são apresentados na Fig. 2.7.

Os reles de comutação, responsáveis por reconfigurar o conversor AHB para acionamento da máquina de relutância como motor ou como gerador, são reles modelo T92S7D12-24, do fabricante TE Connectivity.

Os sensores empregados tanto para monitoramento das tensões e correntes do GRC quanto para a composição do circuito para detecção de conjugado são sensores de efeito Hall. Para medição de tensão foram empregados os sensores LV25P e para medição de corrente foram empregados os sensores LA55P, ambos do fabricante LEM Semiconductors.

Por fim, a detecção da posição instantânea do rotor θ é realizada por um encoder absoluto, modelo E6CP-AG5C do fabricante Omron. Este encoder possui resolução de 10 bits, permitindo ao controlador obter ângulos com valores de aproximadamente 0,35 graus.

6.2 Resultados de Simulação para Validação do Modelo Computacional

Conforme exposto no capítulo anterior, foi necessário o levantamento do conjunto de pontos $L(\theta, i)$ de forma a se obter a superfície de indutância do GRC. O diagrama ilustrado na Fig. 5.4 proporcionou o levantamento de 108 pontos de indutância. Essa quantidade de pontos é referente às indutâncias levantadas para as posições angulares de 0° , 6° , 11° , 16° , 22° , 27° , 33° , 39° e 45° , ou seja, 9 pontos entre a posição alinhada (0°) até a posição de total desalinhamento (45°). Para cada posição angular, a corrente aplicada à bobina foi variada de $0A$ até $6A$, em intervalos de $0,5A$. Este conjunto de pontos proporcionou a obtenção da superfície experimental de indutância, ilustrada na Fig. 6.3.

De acordo com a metodologia apresentada no capítulo anterior, este trabalho busca a obtenção de uma equação que proporcione uma superfície contínua de indutância, ou seja, que possua infinitos pontos $L(\theta, i)$, de forma que esta superfície contínua possa contribuir positivamente com o modelo computacional tanto em relação à acurácia dos resultados em comparação com a plataforma experimental quanto ao tempo de simulação.

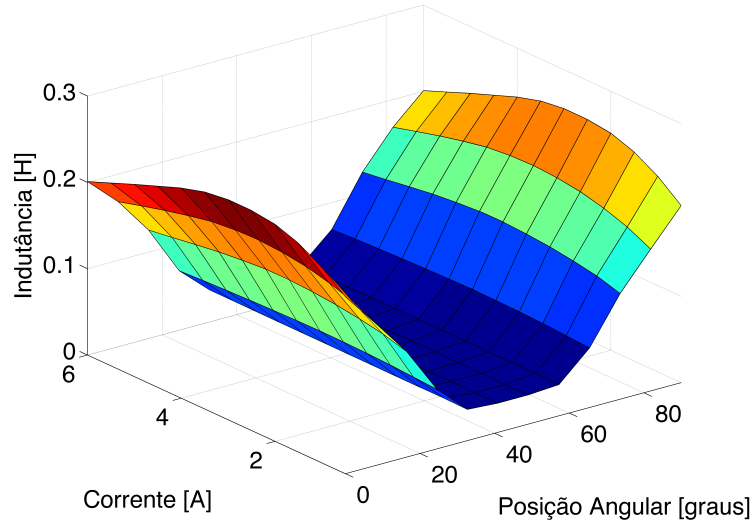


Figura 6.3 - Superfície experimental de indutância do GRC.

Ou seja, a equação 5.2 possui 34 parâmetros a serem encontrados de forma a se obter uma superfície contínua de indutância que seja a mais próxima possível da superfície experimental da Fig. 6.3.

O otimizador proporcionou os valores dos 34 parâmetros da superfície contínua atingindo uma divergência de 0,114% em relação à superfície experimental. Desta forma, (5.2) até (5.5) tornam-se:

$$L_{CONT}(\theta, i) = 1,10 + (f_1 \cdot f_2 \cdot f_3) \quad (6.1)$$

$$f_1(\theta, i) = 3,41 \cdot 10^{-2} \cdot e^{(-0,27 \cdot i)} \cdot e^{(-2,76 \cdot 10^{-4} \cdot \theta)} \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned} f_2(\theta, i) = & 6,29 \cdot i^{0,92} + 1,52 \cdot 10^{-5} \cdot \theta^{(8,39 \cdot 10^{-4})} \\ & - 0,39 \cdot i^{0,48} + 0,20/\theta^{(5,97 \cdot 10^{-6})} + 1,88 \cdot 10^{-2} \cdot \theta^{8,97} \\ & - 0,84 \cdot i^{0,53} \end{aligned} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned}
f_3(\theta, i) = & 0,30 \cdot \text{sen}(0,14 \cdot i + 0,55) + 0,79 \cdot \text{sen}(4,37 \cdot 10^{-2} \cdot \theta + 2,48) \\
& + 0,14 \cdot \text{sen}(0,49 \cdot i + 4,95 \cdot 10^{-8}) - 0,18 \cdot \text{sen}(4,23 \cdot 10^{-2} \cdot \theta + 1,53) \\
& - 4,70 \cdot 10^{-2} \cdot \text{sen}(0,48 \cdot i - 0,15) + 4,32 \cdot 10^{-2} \cdot \text{sen}(0,17 \cdot \theta + 5,96)
\end{aligned} \tag{6.4}$$

Assim como o valor de $L(\theta, i)$, o modelo computacional depende da taxa de variação da indutância, $\frac{dL(\theta, i)}{d\theta}$. Essa taxa de variação foi obtida derivando a equação principal da indutância, proporcionando a expressão (6.5).

$$\begin{aligned}
\frac{dL(\theta, i)}{d\theta} = & f_1 \cdot \{ [0,034 \cdot \cos(0,043 \cdot \theta + 2,48) - 7,95 \cdot 10^{-3} \\
& \cdot \cos(0,042 \cdot \theta + 1,53) + 7,68 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(0,17 \cdot \theta + 5,96)] \\
& \cdot f_2 - f_1 \cdot [0,16/\theta^{9,97} - 1,27 \cdot 10^{-8}/\theta^{0,99} + 1,23 \cdot 10^{-6}/\theta] \\
& \cdot f_3 - 9,43 \cdot 10^{-6} \cdot e^{(-0,27 \cdot i)} \cdot e^{(-0,27 \cdot \theta)} \cdot f_2 \cdot f_3 \}
\end{aligned} \tag{6.5}$$

Estas equações proporcionam a superfície ilustrada na Fig. 6.4, em contraste com a superfície experimental.

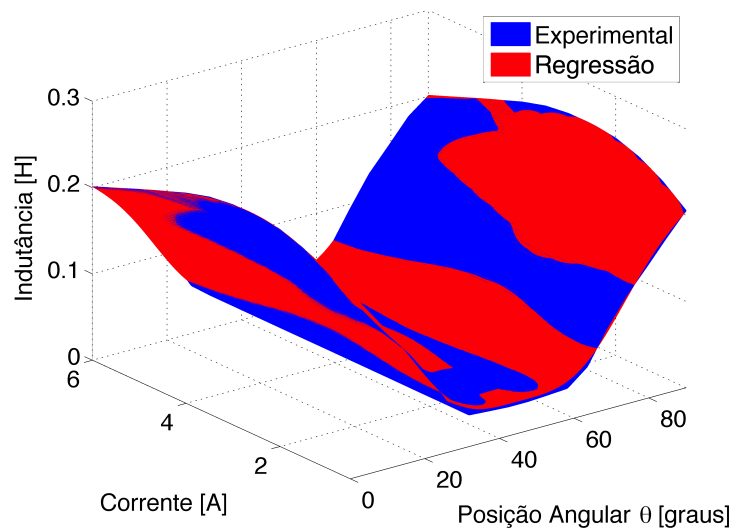


Figura 6.4 - Superfície contínua de indutância em comparação com a superfície experimental.

De posse da superfície contínua de indutância do GRC, o modelo computacional pode ser avaliado empregando como indicador a acurácia com os resultados obtidos experimentalmente, tanto para as grandezas elétricas do GRC quando para as grandezas mecânicas. O tópico seguinte apresenta os resultados de simulação empregando a superfície contínua de indutância.

O modelo computacional recebe valores iniciais referentes às características da máquina a ser simulada, conforme ilustra a Fig. 3.4. Esses parâmetros foram atribuídos à simulação conforme as características do gerador presente na plataforma experimental, ilustrado na fotografia da Fig. 6.1. A Tab. 6.1 apresenta as características do GRC utilizado neste estudo.

Tabela 6.1 - Características da máquina simulada.

PARÂMETRO	VALOR
<i>Polos no Estator</i>	6
<i>Polos no Rotor</i>	4
L_{MIN}	31,95 mH
L_{MAX}	255,05 mH
R_E	3.25Ω
D	$1 \cdot 10^{-4} kg \cdot m^2 / s$
J	$8 \cdot 10^{-3} kg \cdot m^2$

Conforme descrito nos capítulos da fundamentação teórica, embora a Tab. 6.1 apresente apenas um valor para L_{MAX} e L_{MIN} , especificamente no Capítulo 03 foi mostrado que a indutância das bobinas do GRC possuem dependência não só da posição angular, mas também da corrente. Portanto, a Tab. 6.1 apresenta apenas o maior e o menor valor de indutância obtido experimentalmente com o sistema da Fig. 5.4.

A primeira verificação dos resultados do modelo computacional foi realizada aplicando ao GRC uma tensão de excitação V_1 de aproximadamente 280 V com velocidade rotórica constante de 1000 rpm. A carga conectada à saída do gerador possui natureza resistiva, com valor de 33 Ω. O chaveamento das bobinas foi mantido fixo, sendo que o ângulo de acionamento θ_{ON} foi fixado em 0°, isto é, no ponto onde a indutância é máxima (posição de alinhamento) e o ângulo de desligamento θ_{OFF} foi fixado em 30°.

A Fig. 6.5 ilustra a indutância em uma das bobinas do GRC, os pulsos de comando

para os IGBTs, a tensão e a corrente da respectiva fase do GRC em análise.

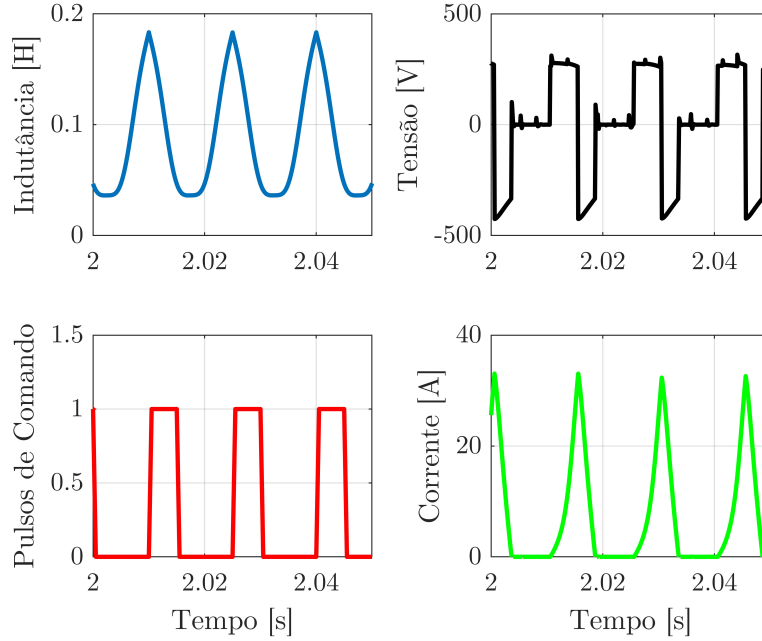


Figura 6.5 - Resultado de simulação: indutância, comando lógico de chaveamento, tensão e corrente em uma das bobinas do GRC.

Na Fig. 6.5, os pulsos de comando dos IGBTs que acionam a fase em análise foram aplicados ao conversor de potência durante a taxa de variação negativa da indutância, permitindo a operação da máquina como gerador. A tensão da bobina possui valor de aproximadamente 280 V durante a etapa de excitação (magnetização do núcleo) e, após o desligamentos dos IGBTs, a tensão da bobina se inverte atingindo valores superiores a 400 V durante a etapa de desmagnetização. Os diodos do conversor AHB permitem que esta tensão seja direcionada para a carga, mantendo o sentido de circulação de corrente, como ilustra também a Fig. 6.5.

Os gráficos ilustrados na Fig. 6.5 são resultados de simulação utilizados para validar o modelo computacional empregando a representação das indutâncias do GRC pela superfície contínua apresentada na Fig. 6.4. Conforme apresentado por [da Cunha Reis et al. \(2019\)](#) e [Reis \(2020\)](#), este tipo de representação não só aproxima o modelo computacional da plataforma experimental adequadamente como também exige menor esforço computacional quando comparado com outros métodos.

Para estender a análise e validação do modelo computacional deste estudo, alguns ensaios foram realizados na plataforma experimental da Fig. 5.1 e os resultados obtidos foram comparados com os resultados de simulação para as mesmas condições de entrada. Tais condições envolvem o acionamento do GRC em malha aberta com velocidade fixa de 1000 *rpm* e ângulos de chaveamento fixos, como sendo $\theta_{ON} = 0^\circ$ e $\theta_{OFF} = 30^\circ$. A carga alimentada pelo gerador possui natureza resistiva de valor 33 Ω .

Inicialmente, o conversor CA-CC da Fig. 5.3 recebeu um ângulo de disparo $\alpha = 100^\circ$ proveniente do controlador da plataforma experimental. Isto faz com que o GRC seja excitado com uma tensão de aproximadamente 143 V. Os resultados obtidos na plataforma experimental em comparação com o modelo computacional são apresentados na Fig. 6.6.

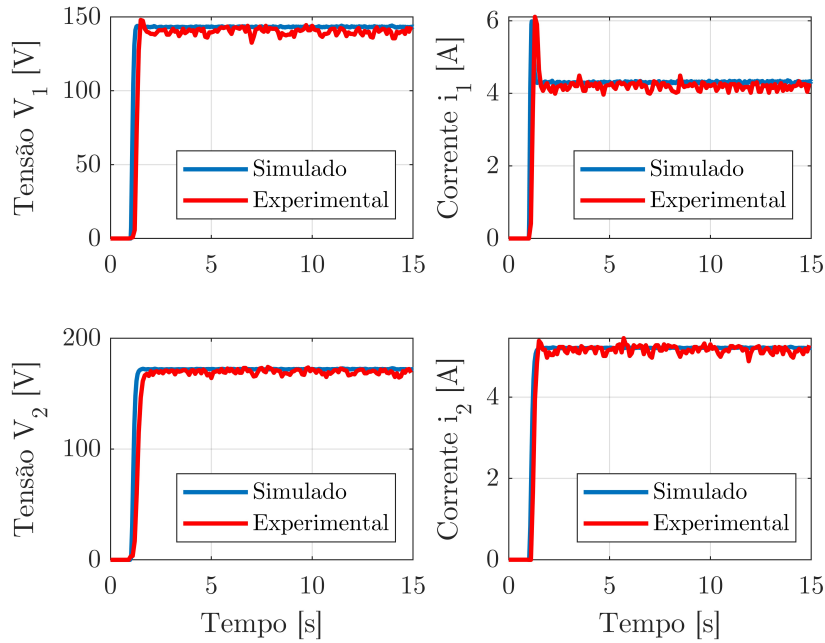


Figura 6.6 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados do modelo computacional em malha aberta para $\alpha = 100^\circ$ e $V_1 \approx 143$ V.

Na Fig. 6.6 é possível constatar que a excitação de 143 V exige uma corrente de excitação de 4,3 A. Na geração, a tensão de saída do GRC é de 172 V e a corrente é de 5,2 A, resultando em uma potência de 894,4 W. Nesta etapa, o interesse foi o de avaliar as grandezas elétricas do GRC, tanto de entrada quanto de saída,

comparando os resultados experimentais com os resultados de simulação.

Em seguida, o ângulo de disparo do conversor CA-CC que alimenta o barramento de excitação do gerador foi elevado para 110° , fazendo com que a excitação fosse aumentada para $202,1\text{ V}$. Os resultados para este ensaio são apresentados na Fig. 6.7.

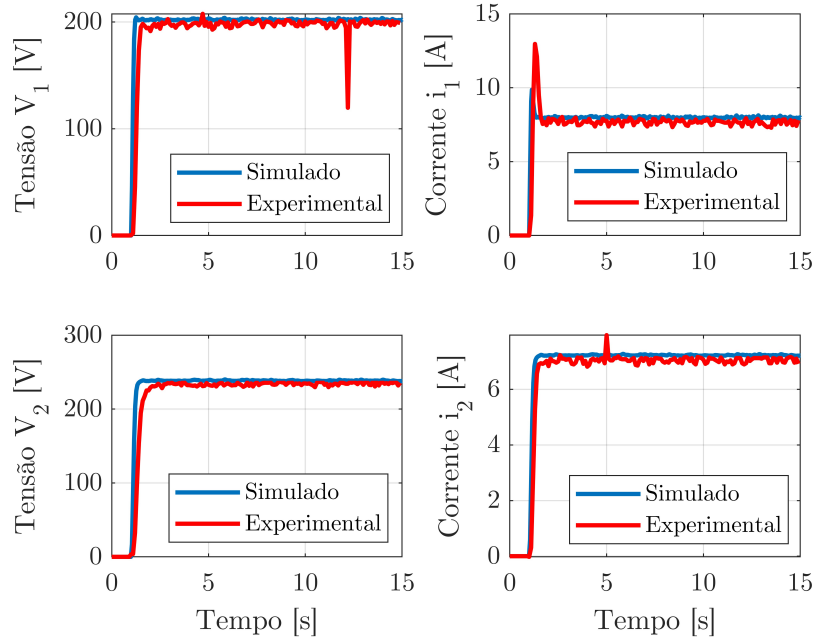


Figura 6.7 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados do modelo computacional em malha aberta para $\alpha = 110^\circ$ e $V_1 \approx 202\text{ V}$.

Na Fig. 6.7, a corrente de excitação do GRC foi de 8 A , tanto para o modelo computacional quanto para o experimental. A tensão gerada neste ensaio foi de $238,5\text{ V}$ e a corrente na carga foi de $7,2\text{ A}$, resultando em uma potência gerada de $1717,2\text{ W}$. Os resultados de simulação e experimentais da Fig. 6.7 são compatíveis, com exceção do transitório de corrente, especialmente a corrente de excitação, dada a dificuldade de estabelecer na simulação o valor correto da resistência série do banco de capacitores C_1 .

Como último teste desta etapa, o ângulo de disparo do conversor CA-CC foi elevado para 120° , proporcionando uma tensão de excitação $V_1 = 267,4\text{ V}$ ao GRC. Os resultados para este teste são apresentados na Fig. 6.8.

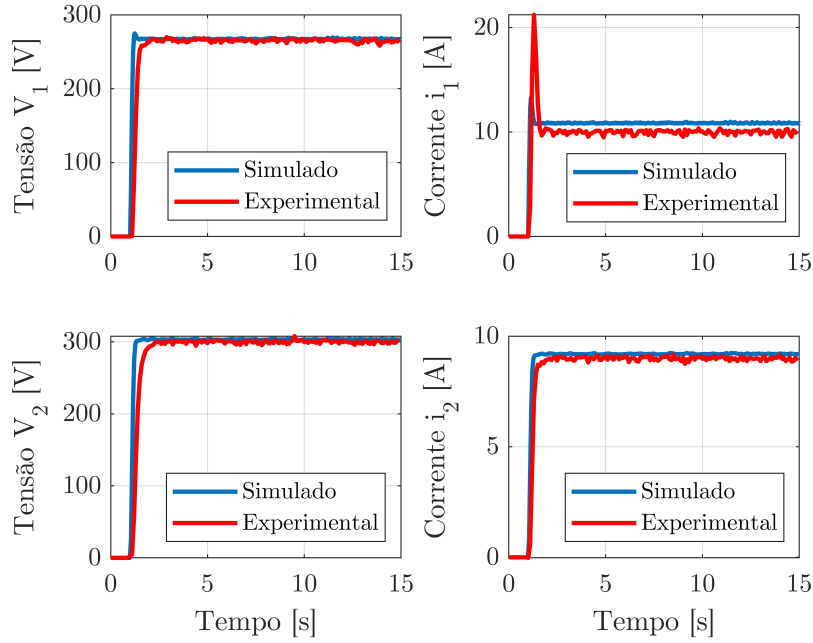


Figura 6.8 - Comparação dos resultados experimentais com os resultados do modelo computacional em malha aberta para $\alpha = 120^\circ$ e $V_1 \approx 267 \text{ V}$.

Na Fig. 6.8, a corrente de excitação foi de $10,8 \text{ A}$. A tensão gerada observada na plataforma experimental e na simulação foi de $303,5 \text{ V}$, com uma corrente na carga $I_2 = 9,2 \text{ A}$. Neste caso, a potência gerada foi de $2792,2 \text{ W}$.

Conforme exposto anteriormente, os testes realizados e os resultados apresentados nas figuras 6.6, 6.7 e 6.8 possuem como objetivo validar o modelo computacional com a plataforma experimental desenvolvida. Contudo, as variáveis mecânicas, especialmente o conjugado, devem ser analisadas igualmente a fim de verificar se o sistema desenvolvido permite avaliar o rendimento do GRC.

6.3 Resultados Experimentais e de Simulação para Validação do Sistema de Detecção Indireta de Conjugado

Como a seção anterior apresentou a validação do modelo computacional empregando a regressão paramétrica para representação das indutâncias do GRC, considerando algumas grandezas elétricas, este tópico apresenta os valores do conjugado eletromagnético proporcionado pelo sistema proposto na Fig. 5.5.

Nesta etapa da metodologia, buscou-se investigar se as grandezas mecânicas obtidas

experimentalmente eram compatíveis com os valores obtidos no modelo computacional. Como o foco deste estudo é a potencialização do rendimento do GRC, e o rendimento depende de grandezas mecânicas como o conjugado e a velocidade, conforme 5.9 e 5.12, há a necessidade de medição do conjugado experimentalmente. Dado o alto custo de torquímetros dinâmicos disponíveis comercialmente, foi desenvolvido então o sistema de detecção indireta de conjugado da Fig. 5.5.

Os testes desta etapa foram realizados com as mesmas configurações da metodologia anterior, ou seja, o GCR foi acionado em malha aberta com velocidade e carga constantes. Inicialmente o GCR foi excitado com tensão de 100 V. Os resultados para este teste são apresentados na Fig. 6.9.

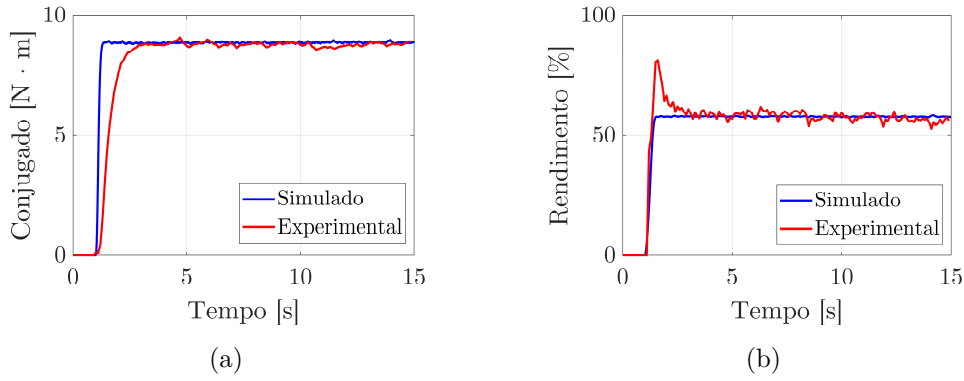


Figura 6.9 - Avaliação das grandezas mecânicas do modelo computacional em comparação com resultados experimentais (excitação de 100 V) (a) Conjugado (b) Rendimento.

Conforme pode ser observado na Fig. 6.9, os valores experimentais e de simulação para o conjugado do GRC são compatíveis em regime permanente, indicando a eficiência do sistema de detecção indireta da Fig. 5.5, cujo valor do conjugado é medido e calculado por 5.8. Em relação ao transitório das curvas apresentadas na Fig. 6.9(a), há uma divergência em relação ao comportamento dinâmico do conjugado do gerador considerando o resultado do modelo computacional e o resultado experimental. Esta divergência ocorre devido ao fato de que o sistema de detecção indireta implementado experimentalmente calcula o conjugado total indicado em 5.8. Contudo, o modelo computacional leva em consideração apenas o atrito D e suprime a contribuição da inércia J do gerador. Conforme 3.6, o conjugado total deve considerar também a parcela $J \cdot \frac{d\omega}{dt}$. Contudo, esta parcela não é considerada

no modelo computacional, o que provoca a diferença no transitório dos conjugados obtidos na simulação e experimentalmente. Esta supressão da inércia foi mantida devido ao fato de o GRC em estudo não ter sido construído de forma industrial. Logo, há dificuldade operacional em determinar o momento de inércia da máquina. Além disto, o foco deste estudo sobre a potencialização do rendimento necessita apenas da convergência dos valores experimentais e de simulação em regime permanente, o que, conforme ilustra a Fig. 6.9, são suficientes tanto para o conjugado quanto para o rendimento da máquina, conforme ilustra a Fig. 6.9(b).

Na sequência, o mesmo teste foi repetido porém alterando a excitação do gerador em malha aberta para 150 V. Os resultados para este teste são apresentados na Fig. 6.10.

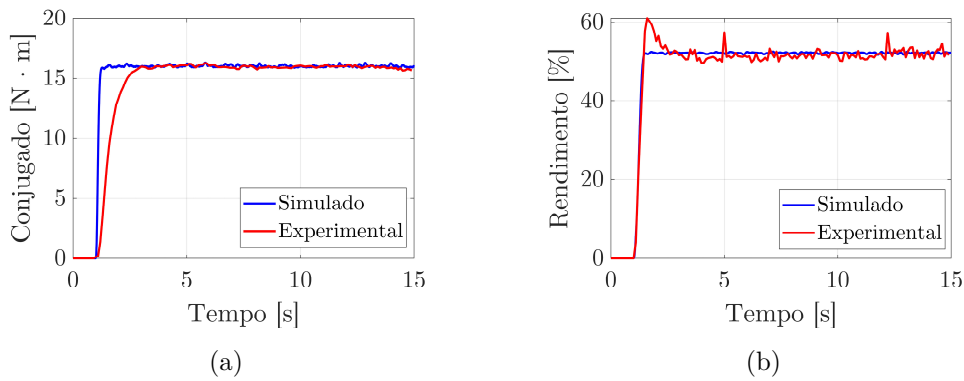


Figura 6.10 - Avaliação das grandezas mecânicas do modelo computacional em comparação com resultados experimentais (excitação de 150 V) (a) Conjugado (b) Rendimento.

Com o aumento da excitação do gerador, a potência gerada também é aumentada, conforme apresentado na seção 6.2. Isto faz com que o conjugado também seja aumentado. Nas figuras 6.9(a) e 6.9(b), o conjugado é de aproximadamente 8,9 $N \cdot m$ e o rendimento é de aproximadamente 58%. Com a elevação da excitação para 150 V, o conjugado e o rendimento são de 16 $N \cdot m$ e 52,4%, respectivamente, conforme indicado nas figuras 6.10(a) e 6.10(b).

Os resultados obtidos pelos procedimentos cujos resultados são dispostos nas figuras 6.9 e 6.10 indicam que o sistema de detecção indireta de conjugado da Fig. 5.5 proporciona valores condizentes com o modelo computacional, sobretudo para regime permanente. Porém, os procedimentos experimentais e os resultados apresentados

até este ponto foram realizados para uma janela de condução θ_D fixa, com $\theta_{ON} = 0^\circ$ e $\theta_{OFF} = 30^\circ$.

6.4 Resultados de Simulação para Avaliação da Janela de Condução do Conversor de Potência

Conforme indicado na Fig. 5.1, as grandezas do sistema que potencialmente podem ser empregadas como variáveis manipuladas para o controle de tensão de saída do GRC são a tensão de excitação V_1 e o ângulo de desligamento das fases θ_{OFF} . Contudo, os procedimentos experimentais desenvolvidos até este ponto consideram uma janela de condução fixa, conforme sugerido pela literatura para máquinas de relutância 6×4 .

Sendo assim, conforme exposto na seção 5.4, foi realizada a investigação se a antecipação da janela de condução poderia melhorar o desempenho da máquina, considerando, sobretudo, métricas como o rendimento e a oscilação de conjugado.

A Fig. 6.11 apresenta os resultados de simulação com a varredura de θ_{ON} conforme apresentado na seção 5.4.

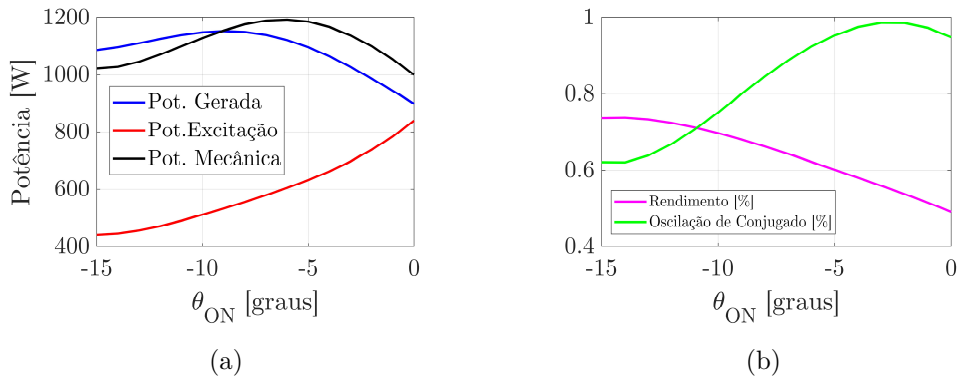


Figura 6.11 - Resultado de simulação para a varredura do ângulo θ_{ON} (a) Potências do GRC (b) Rendimento e oscilação de conjugado.

Na Fig. 6.11(a) são apresentadas as curvas das potências do GRC para a antecipação de θ_{ON} de 0° até -15° , mantendo a janela de condução $\theta_D = \theta_{ON} + 30^\circ$. A potência gerada é a potência elétrica de saída do GRC, determinada por 5.11. A potência de excitação é a potência elétrica de entrada do gerador, determinada por 5.10 e a

potência mecânica de entrada é determinada por 5.9.

As curvas ilustradas na Fig. 6.11(a) permitem verificar que para $\theta_{ON} = -10^\circ$ a potência gerada é superior às duas potências de entrada, o que garante um rendimento favorável para este ponto. Analisando a Fig. 6.11(b), percebe-se que para ângulos inferiores a $\theta_{ON} = -10^\circ$ o rendimento pode aumentar, porém a potência de saída diminui. Para valores superiores a $\theta_{ON} = -10^\circ$, o rendimento diminui e a oscilação de conjugado aumenta, estabelecendo um cenário desfavorável para a geração de energia com o GRC.

Desta forma, para as metodologias posteriores a esta etapa, o ângulo de acionamento θ_{ON} das fases será considerado sempre em -10° devido aos valores ilustrados na Fig. 6.11.

6.5 Resultados Referentes aos Índices de Sensibilidade dos Parâmetros do GRC

Conforme exposto na seção 5.1, a geração de energia por parte do GRC pode ser manipulada por diferentes variáveis. Em relação aos ângulos de chaveamento, a metodologia anterior indica $\theta_{ON} = -10^\circ$ como um ponto favorável para a geração, o rendimento e a oscilação de conjugado. Porém, para verificar o comportamento do gerador frente às variações de grandezas elétricas e mecânicas, foi empregada a análise de sensibilidade apresentada na seção 4.5. Os valores bases para as variáveis e suas respectivas variações são apresentada na Tab. 5.1 da seção 5.5.

A primeira variável analisada foi a potência gerada pelo GRC perante às variações da excitação V_1 , do ângulo de desligamento θ_{OFF} e da velocidade do rotor ω . A Fig. 6.12 ilustra o comportamento da potência gerada indicando sua sensibilidade às variáveis.

Na Fig. 6.12, o eixo horizontal é o valor base da potência, de valor 638 W. Pela taxa de variação das curvas, percebe-se que a tensão de excitação V_1 possui influência maior na geração de energia se comparada às demais variáveis, especialmente se V_1 é superior a seu valor base, de 150 V.

A Fig. 6.13 apresenta a sensibilidade do rendimento do GRC para as variações de V_1 , θ_{OFF} e ω .

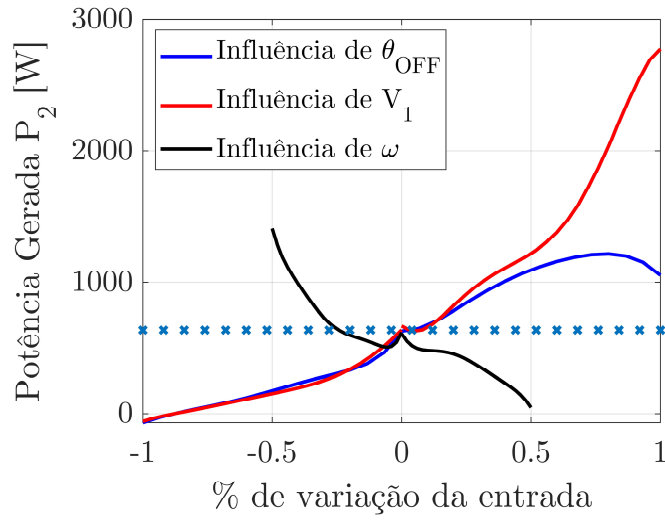


Figura 6.12 - Sensibilidade da potência gerada perante às variações de V_1 , θ_{OFF} e ω .

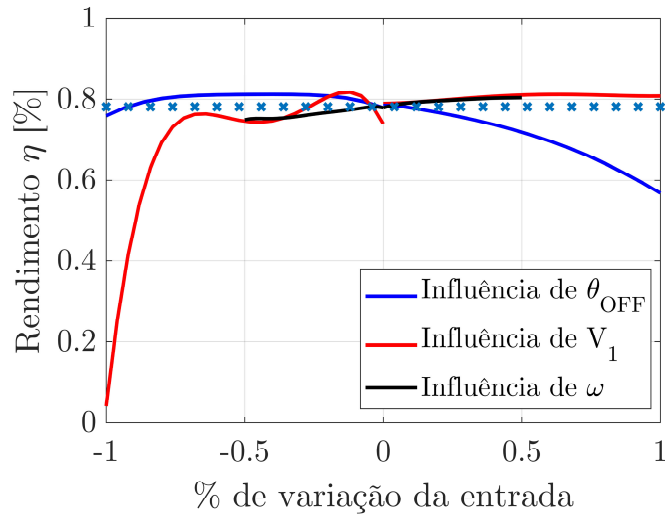


Figura 6.13 - Sensibilidade do rendimento gerado perante às variações de V_1 , θ_{OFF} e ω .

Na Fig. 6.13, o eixo horizontal que representa o valor base do rendimento é de 0,78. Percebe-se neste caso que um aumento excessivo no valor do ângulo de desligamento, especialmente a partir do valor base ($\theta_{OFF} = 15^\circ$), faz com que o rendimento do GRC diminua. Por outro lado, variações na excitação não interferem tanto no rendimento, apenas quando a variação é inferior a -50% .

A Fig. 6.14 apresenta a sensibilidade da oscilação de conjugado para as variações de

V_1 , θ_{OFF} e ω .

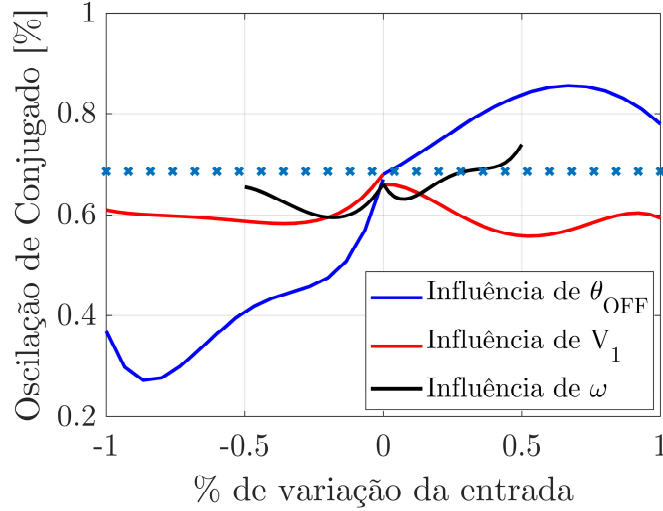


Figura 6.14 - Sensibilidade da oscilação de conjugado gerada perante às variações de V_1 , θ_{OFF} e ω .

N Fig. 6.14, o eixo horizontal que representa o valor base de T_R possui o valor 0,69. É possível verificar neste caso que o ângulo de desligamento possui interferência elevada na oscilação de conjugado, especialmente para valores superiores a 50%. Isto ocorre pois uma janela de condução maior, proporcionada por altos valores de θ_{OFF} , pode sobrepor a região na qual a indutância da bobina possui taxa crescente, região na qual a máquina opera como motor. Logo, isto provoca maiores oscilações no gerador.

Além das curvas apresentadas nas figuras 6.12, 6.13 e 6.14, foram calculados os índices de sensibilidade das variáveis em análise. Os índices foram calculados conforme 4.7 e são apresentados na Tab. 6.2.

Tabela 6.2 - Índices de sensibilidade das variáveis do GRC.

Variável Analisada	Sensibilidade a θ_{OFF}	Sensibilidade a V_1	Sensibilidade a ω
Potência Gerada P_2	31,29%	56,51%	12,2%
Rendimento η	31,53%	45,31%	23,16%
Oscilação de Conjugado T_R	44,97%	36,94%	18,09%

A Tab. 6.2 apresenta de forma quantitativa a sensibilidade da potência, do rendi-

mento e da oscilação de conjugado para as variáveis V_1 , θ_{OFF} e ω . Percebe-se na tabela que a tensão de excitação possui maior influência que as demais variáveis. Isto dá um indicativo de que a tensão pode ser mais favorável para ser empregada como variável manipulada no controle de tensão do GRC que o ângulo de desligamento θ_{OFF} . Porém, novos procedimentos experimentais foram realizados para reafirmar esta condição.

6.6 Resultados Experimentais e de Simulação para Avaliação da Otimização do Controlador PID de Tensão do GRC

Considerando as metodologias anteriores, nas quais há indicação de que o ângulo de acionamento das fases θ_{ON} contribui positivamente com o gerador se seu valor é de -10° e que a tensão de excitação V_1 é potencialmente mais favorável para controlar a tensão de saída do gerador, o processo de otimização apresentado na seção 5.6 foi empregado para a sintonia do controlador PID.

Neste caso, os valores obtidos para os ganhos do controlador PID de tensão empregando como variável manipulada a tensão de excitação são os valores apresentados na Tab. 6.3.

Tabela 6.3 - Parâmetros do controlador PID de tensão que emprega V_1 como variável manipulada.

Ganho Proporcional	Ganho Integral	Ganho Derivativo
$kp = 84,04 \cdot 10^{-3} \text{ } \circ / V$	$ki = 512,77 \cdot 10^{-3} \text{ } \circ / V$	$kd = 2,146 \cdot 10^{-3} \text{ } \circ / V$

Pela indefinição de controlar a tensão do GRC empregando como variável manipulada a excitação ou o ângulo de desligamento, o processo de otimização foi empregado para ambos os casos. Os valores obtidos para θ_{OFF} como variável manipulada são apresentados na Tab. 6.4.

Tabela 6.4 - Parâmetros do controlador PID de tensão que emprega θ_{OFF} como variável manipulada.

Ganho Proporcional	Ganho Integral	Ganho Derivativo
$kp = 42,86 \cdot 10^{-3} \text{ } \circ / V$	$ki = 297,94 \cdot 10^{-3} \text{ } \circ / V$	$kd = 0,76 \cdot 10^{-3} \text{ } \circ / V$

De posse dos ganhos para sintonia do controlador, foram realizadas simulações, porém agora em malha fechada e com carga resistiva de $50,6 \text{ } \Omega$. A velocidade foi

mantida fixa em 1000 *rpm* e simulações foram realizadas para verificar o desempenho do controlador PID de tensão para diferentes valores de referência e para perturbações aplicadas à carga resistiva.

A Fig. 6.15 apresenta os resultados de simulação e experimentais para este cenário empregando como variável manipulada a tensão de excitação do GRC.

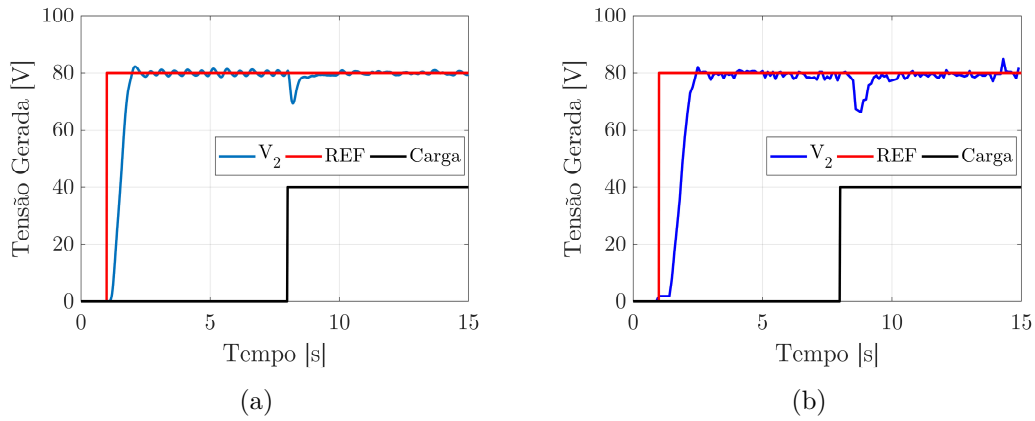


Figura 6.15 - Reposta do controlador PID de tensão empregando V_1 como variável manipulada (referência de 80 V). (a) Resultado de Simulação (b) Resultado Experimental.

Na Fig. 6.15 foi utilizado como referência para o controlador PID uma tensão de 80 V. No instante $t = 8$ s é aplicada uma perturbação na carga, inserindo uma resistência de 94 Ω em paralelo com a resistência de 50,6 Ω empregada originalmente, resultando em uma resistência total de 32,9 Ω . Os gráficos da Fig. 6.15 indicam que os ganhos otimizados para o controlador PID, apresentados na Tab. 6.3 fazem com que o sistema tenha bom desempenho, mantendo a tensão de saída em torno da referência (80 V) mesmo com perturbações aplicadas à carga. Estes gráficos também reafirmam a superfície experimental de indutância da Fig. 6.4, uma vez que as curvas apresentadas nas figuras 6.15(a) e 6.15(b) são semelhantes, ou seja, há boa equivalência entre os dados experimentais e do modelo computacional.

Com a finalidade de verificar o desempenho do controlador PID, o teste anterior foi repetido para outro valor de referência. Neste caso, a entrada do controlador foi alterada de 80 V para 100 V. Os resultados para este ensaio são apresentados na Fig. 6.16.

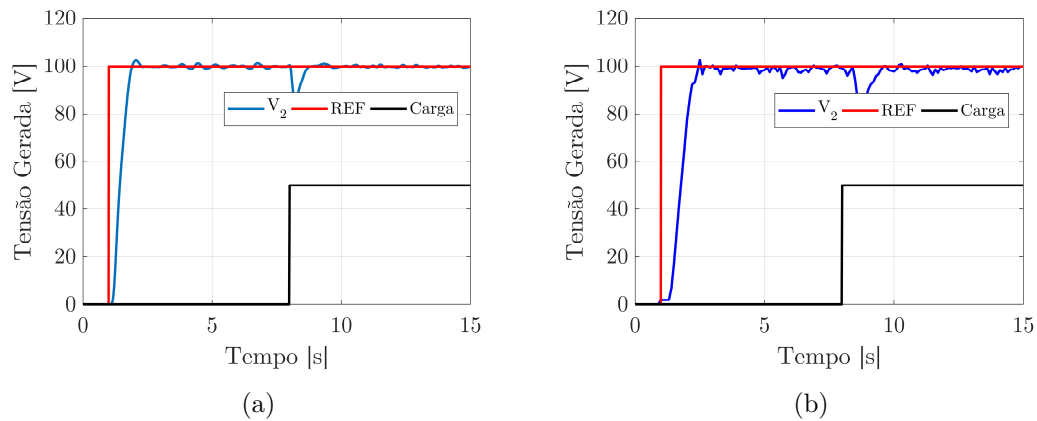


Figura 6.16 - Reposta do controlador PID de tensão empregando V_1 como variável manipulada (referência de 100 V). (a) Resultado de Simulação (b) Resultado Experimental.

Assim como para o ensaio anterior, para uma referência de 100 V o controlador PID de tensão se mostrou adequado para os ganhos sintonizados via processo de otimização, possibilitando regular a tensão de saída do gerador de acordo com a referência e também resistindo satisfatoriamente à perturbação de carga. Esta perturbação é a mesma do ensaio anterior, aplicada também em $t = 8$ s.

Por fim, um último ensaio foi realizado em malha fechada empregando V_1 como variável manipulada, porém elevando a referência para 120 V. Os resultados para este ensaio são ilustrados na Fig. 6.17.

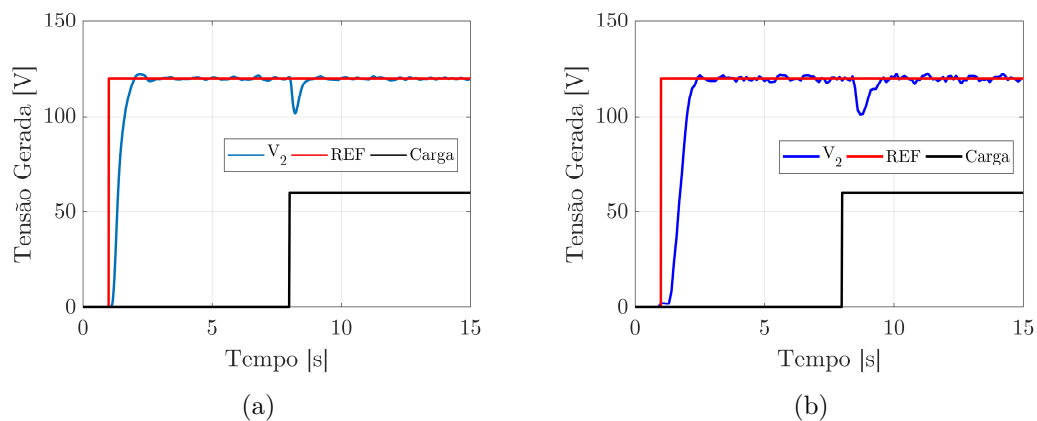


Figura 6.17 - Reposta do controlador PID de tensão empregando V_1 como variável manipulada (referência de 120 V). (a) Resultado de Simulação (b) Resultado Experimental.

Para a referência de 120 V, percebe-se nos gráficos da Fig. 6.17 que o controlador também apresentou desempenho satisfatório, tanto em simulação quanto em ensaio experimental.

Com os resultados obtidos nas figuras 6.15, 6.16 e 6.17, optou-se por empregar o controle da tensão de saída através da tensão de excitação. Embora a otimização do controlador que utiliza θ_{OFF} como variável manipulada também já tenha sido realizado, um último estudo foi feito em relação a estas duas possíveis variáveis manipuladas para ter uma escolha conclusiva.

6.7 Levantamento de Superfícies para Indicação da Variável Manipulada mais Favorável ao Controle

Conforme exposto na seção 5.7, procedimentos de simulação foram realizados com o GRC submetido ao controle de tensão, utilizando como variável manipulada tanto a tensão de excitação quanto o ângulo de desligamento. Em ambos os casos, o controlador PID foi sintonizado com os ganhos apresentados nas tabelas 6.3 e 6.4.

A Fig. 6.18 apresenta a tensão de saída do GRC bem como a tensão de excitação aplicada ao gerador pelos controladores PID por V_1 e por θ_{OFF} .

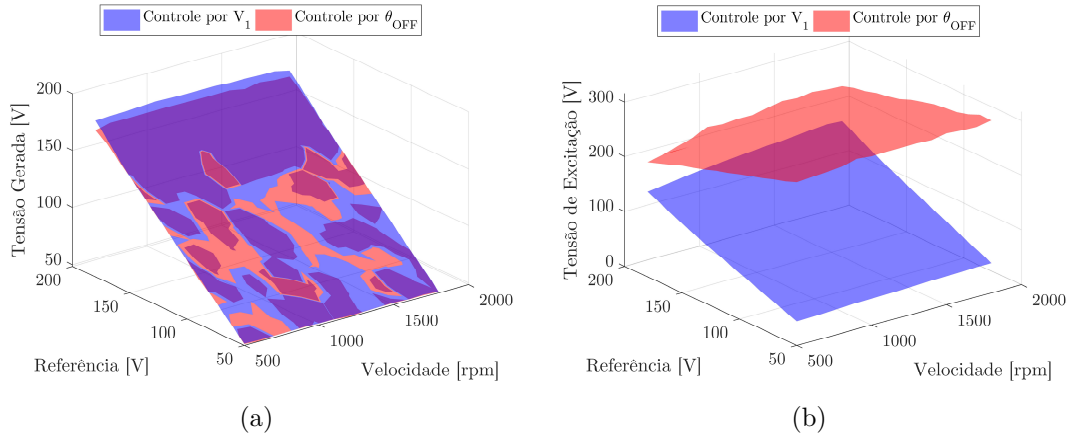


Figura 6.18 - Superfícies obtidas via simulação para o controlador PID atuando em V_1 e em θ_{OFF} . (a) Tensão gerada V_2 . (b) Tensão de excitação V_1 .

É possível verificar na Fig. 6.18(a) que a inclinação dos planos de aproximadamente 45° indicam que ambos os controladores tiveram desempenho satisfatório em manter

a tensão de saída do gerador em valores pré-definidos na referência. Porém, analisando a Fig. 6.18(b) é possível verificar que o controlador PID que atua em θ_{OFF} aplica tensões mais elevadas no barramento CC do conversor de potência. Isto pode ser prejudicial ao GRC uma vez que a tensão aplicada pode exceder a tensão nominal da máquina. Este fator ocorre devido ao fato de que, para janelas de condução menores, para se alcançar determinada tensão na saída, a tensão de excitação deve ser maior.

A Fig. 6.19 apresenta o rendimento do GRC e a oscilação de conjugado quando o gerador é submetido aos dois controladores PID de tensão (com atuação na excitação e no ângulo de desligamento).

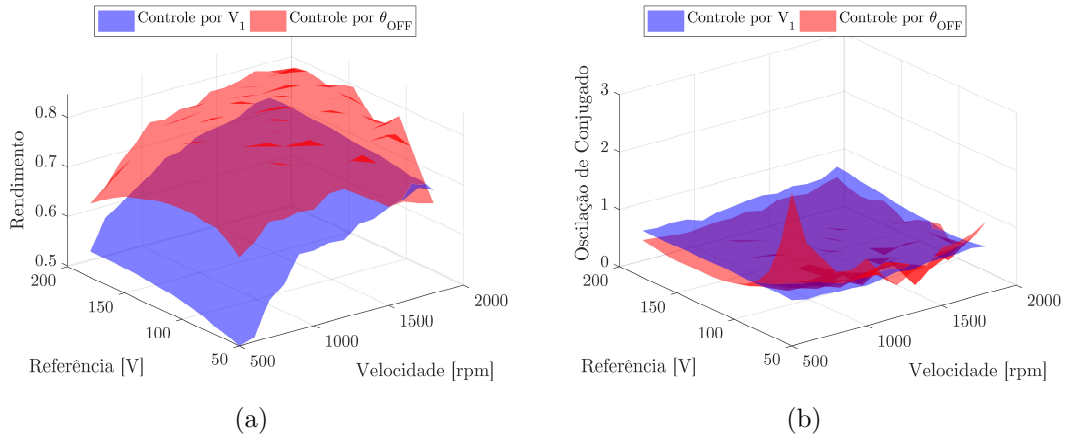


Figura 6.19 - Superfícies obtidas via simulação para o controlador PID atuando em V_1 e em θ_{OFF} . (a) Rendimento η . (b) Oscilação de conjugado T_R .

Na Fig. 6.19(a) é possível observar que o controle de tensão realizado pelo ângulo de desligamento proporciona maiores valores de rendimento para o GRC, assim como a Fig. 6.19(b) mostra que o controle pela excitação proporciona maiores valores de oscilação do conjugado. Contudo, o custo operacional deste controle apresentado pela Fig. 6.18(b) foi o suficiente para que o controle pelo ângulo de desligamento fosse abandonado, mesmo proporcionando melhores valores de rendimento e de oscilação de conjugado.

Desta forma, o controle pela excitação fica mais adequado considerando sua segurança, sua sensibilidade e, em paralelo com o rastreador, o rendimento pode ser igualmente potencializado, como será apresentado na seção seguinte.

6.8 Resultados Experimentais e de Simulação para Avaliação de Desempenho da Técnica de Rastreamento para Potencialização do Rendimento do GRC

O objetivo principal deste trabalho, conforme exposto no primeiro capítulo, é a investigação da possibilidade de elevar o rendimento do GRC paralelamente ao controle da tensão de saída. Desta forma, para que o sistema apresentado na Fig. 5.1 não necessitasse de nenhuma alteração de hardware, foi desenvolvido apenas o algoritmo do rastreador, apresentado no algoritmo 1 da seção 5.8.

Considerando os resultados obtidos anteriormente sobre o ângulo de acionamento θ_{ON} , a sensibilidade da tensão de excitação V_1 e os elevados valores de excitação aplicados ao GRC pelo controle que atua sobre θ_{OFF} , nesta etapa da metodologia foram realizados procedimentos experimentais, tanto em nível de simulação quanto na plataforma experimental da Fig. 6.1.

A Fig. 6.20 apresenta resultados de simulação referentes à evolução dos ângulos de chaveamento do GRC quando submetido ao algoritmo MEPT, bem como o desempenho do controlador quando opera em paralelo com o algoritmo MEPT.

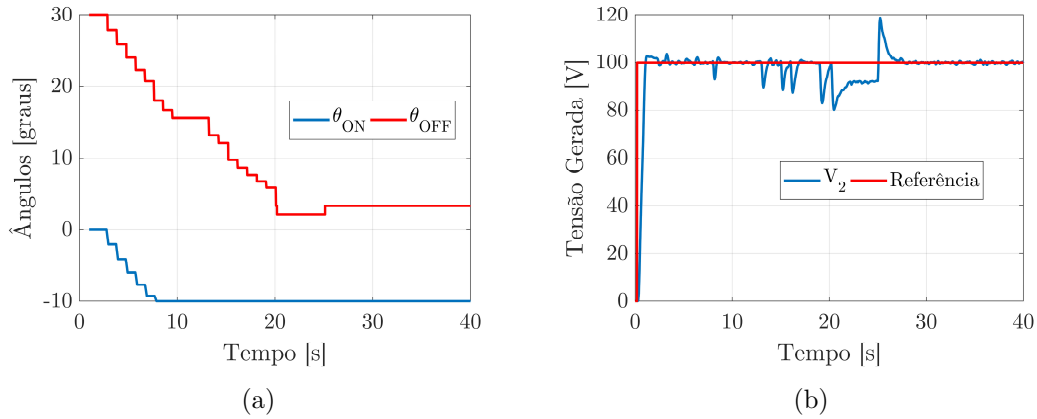


Figura 6.20 - Resultado de simulação para referência de 100 V: (a) Evolução dos ângulos θ_{ON} e θ_{OFF} com o algoritmo MEPT (b) Desempenho do controlador de tensão em paralelo com o algoritmo MEPT.

Na Fig. 6.20(a) é possível verificar que os ângulos de chaveamento permanecem com a janela convencional $\theta_{ON} = 0^\circ$ e $\theta_{OFF} = 30^\circ$ por um instante de tempo. Este

instante, conforme indica o algoritmo 1, é o tempo necessário para que a tensão de saída entre em regime permanente pela atuação do controlador PID. Em seguida, a janela de condução é atrasada de 1° em 1° até atingir seu limite em $\theta_{ON} = -10^\circ$, valor satisfatório para o GRC conforme apresentado anteriormente.

Em seguida, o ângulo θ_{OFF} começa a ser decrementado por um algoritmo de perturba e observa, de forma que a cada grau que θ_{OFF} é reduzido, o valor do rendimento é comparado com o valor anterior, até que o rendimento não possa mais aumentar. Na Fig. 6.20, os ângulos estabilizaram em $\theta_{ON} = -10^\circ$ e $\theta_{OFF} = 3^\circ$. Isto proporciona uma janela de condução de 13° , minimizando a potência de excitação do GRC e, consequentemente, elevando o rendimento do gerador.

A Fig. 6.20(b) mostra o desempenho do controlador PID de tensão atuando em paralelo com o algoritmo de rastreamento MEPT. Conforme os resultados obtidos na seção 6.6, o desempenho do controlador se apresentou satisfatório mesmo com as perturbações nos ângulos de chaveamento do conversor. Neste teste, a referência empregada foi de 100 V.

A Fig. 6.21 apresenta os resultados para a referência de 100 V, ilustrando a evolução do rendimento do GRC conforme a atuação do algoritmo MEPT e também o resultado experimental com os ângulos obtidos.

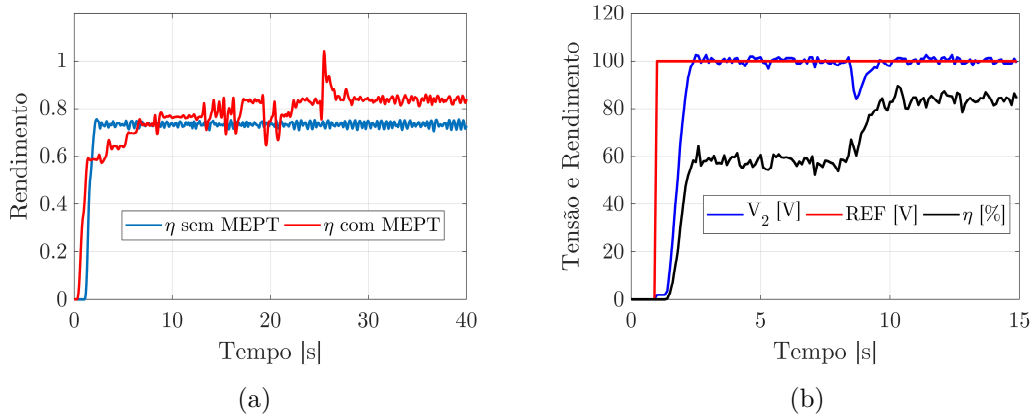


Figura 6.21 - Resultados de simulação e experimental para referência de 100 V (a) Resultado de simulação: elevação do rendimento com o algoritmo MEPT (b) Resultado experimental: desempenho do controlador e rendimento do GRC.

Na Fig. 6.21(a), o rendimento do GRC é elevado de 76% para 83,7%. Este é um resultado obtido pelo modelo computacional. Com o objetivo de verificar experimentalmente o desempenho do algoritmo MEPT, os ângulos fornecidos pelo algoritmo, ilustrados na Fig. 6.20(a), foram inseridos na plataforma experimental e o resultado é apresentado na Fig. 6.21(b). Percebe-se na Fig. 6.21(b) que, além do controlador ter garantido a regulação de tensão no valor pré-estabelecido pela referência (100 V), o rendimento foi elevado para aproximadamente 83,7%, como indicado na Fig. 6.21(a).

As figuras 6.22 e 6.23 apresentam os resultados para o mesmo procedimento anterior, porém com tensão de referência de 120 V para o controlador.

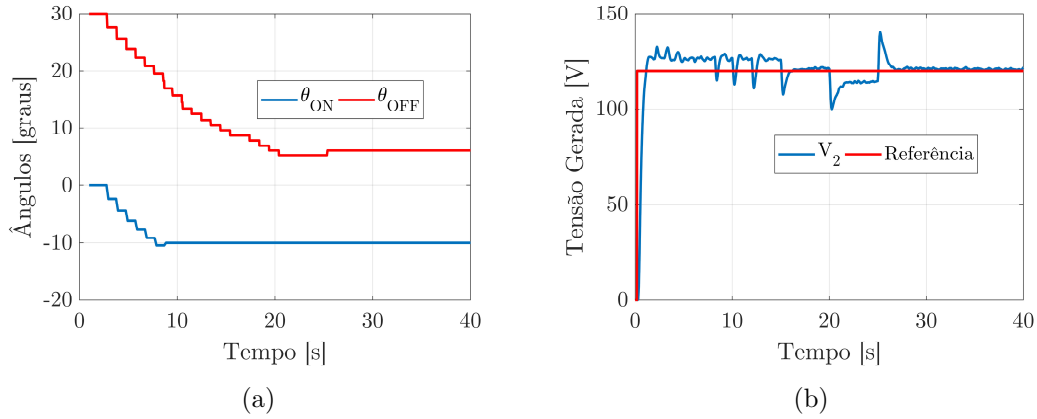


Figura 6.22 - Resultado de simulação para referência de 120 V: (a) Evolução dos ângulos θ_{ON} e θ_{OFF} com o algoritmo MEPT (b) Desempenho do controlador de tensão em paralelo com o algoritmo MEPT.

Na Fig. 6.22(a), os ângulos de chaveamento estabilizaram em $\theta_{ON} = -10^\circ$ e $\theta_{OFF} = 6^\circ$. Na Fig. 6.23(a), o controlador PID manteve a saída do gerador em 120 V, apesar da instabilidade transitória.

A Fig. 6.23(a) ilustra a evolução do rendimento do GRC com o algoritmo MEPT, onde o rendimento aumentou de 78,82% para 83,17%. Da mesma forma que no procedimento anterior, os valores obtidos para os ângulos de chaveamento, isto é, $\theta_{ON} = -10^\circ$ e $\theta_{OFF} = 6^\circ$ foram empregados na plataforma experimental e o resultado do ensaio para 120 V de referência é apresentado na Fig. 6.23(b).

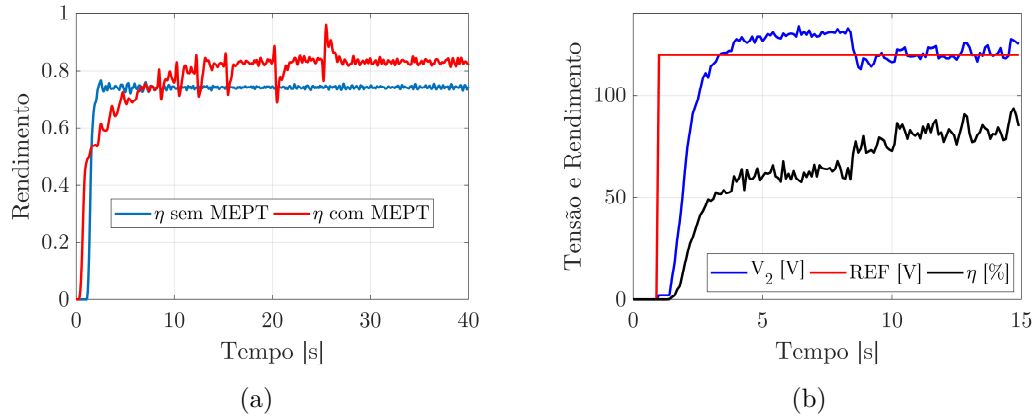


Figura 6.23 - Resultados de simulação e experimental para referência de 120 V (a) Resultado de simulação: elevação do rendimento com o algoritmo MEPT (b) Resultado experimental: desempenho do controlador e rendimento do GRC.

Como último procedimento experimental para validar o algoritmo MEPT em paralelo com o controlador PID de tensão, a referência foi elevada para 140 V. Os resultados para este teste são apresentados nas figuras 6.24 e 6.25.

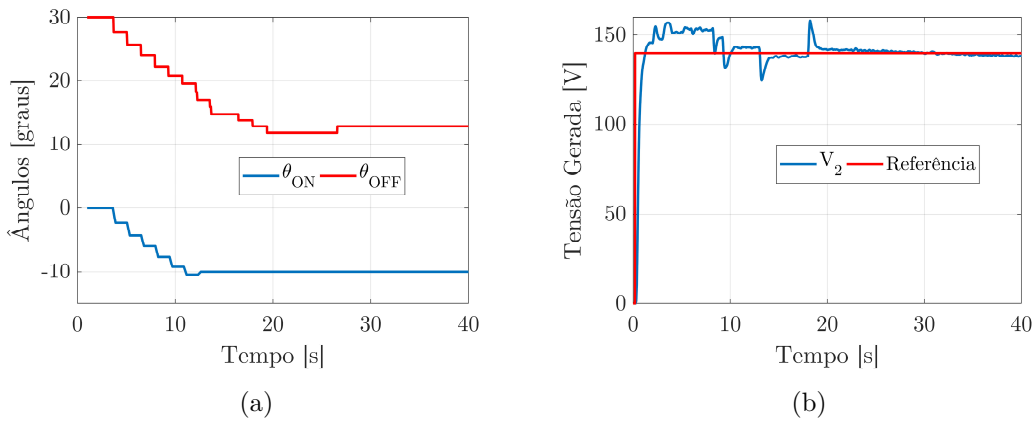


Figura 6.24 - Resultado de simulação para referência de 140 V: (a) Evolução dos ângulos θ_{ON} e θ_{OFF} com o algoritmo MEPT (b) Desempenho do controlador de tensão em paralelo com o algoritmo MEPT.

A evolução dos ângulos de chaveamento ilustrados na Fig. 6.24(a) devido à ação do algoritmo MEPT resulta nos valores $\theta_{ON} = -10^\circ$ e $\theta_{OFF} = 13^\circ$. O desempenho do controlador PID de tensão, apresentado na Fig. 6.24(b) indica que o controlador

possui ação satisfatória para operação em paralelo com o algoritmo MEPT, considerando seu ajuste feito pelo processo de otimização. A saída do gerador foi mantida em valores próximos à referência de 140 V.

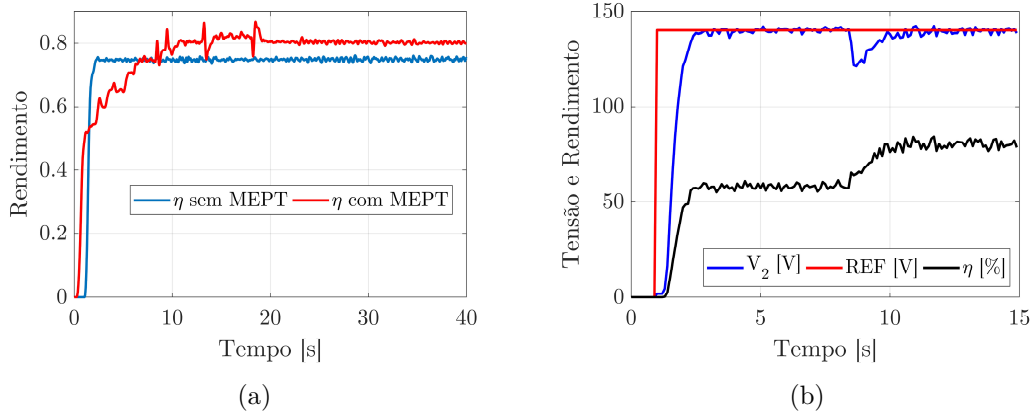


Figura 6.25 - Resultados de simulação e experimental para referência de 140 V (a) Resultado de simulação: elevação do rendimento com o algoritmo MEPT (b) Resultado experimental: desempenho do controlador e rendimento do GRC.

Na Fig. 6.25(a) o rendimento do GRC evoluiu de 77% para 80,3%, como resultado de simulação. Por fim, os ângulos $\theta_{ON} = -10^\circ$ e $\theta_{OFF} = 13^\circ$ obtidos pelo algoritmo de rastreamento foram aplicados à plataforma experimental e o resultado obtido é apresentado na Fig. 6.25(b), onde verifica-se igualmente o aumento do rendimento do gerador.

6.9 Discussão

O desenvolvimento deste trabalho é amparado pela pesquisa anterior desenvolvida por Araujo (2006), na qual a máquina de relutância foi projetada e construída, porém para operação como motor com controle de corrente na tentativa de minimizar as oscilações do conjugado produzido. Desta forma, o início do desenvolvimento deste trabalho se deu com a construção da plataforma experimental para o acionamento e controle da máquina como gerador.

Em seguida surgiram as primeiras dificuldades, pois o controle de tensão do gerador exige implementação de mais elementos, o que torna o sistema mais exigente no que diz respeito aos ajustes e, conseqüentemente, mais difícil de apresentar resultados

coerentes com o modelo computacional.

Por outro lado, a obtenção da superfície de indutância empregando regressão paramétrica contribuiu positivamente com esta dificuldade, pois proporcionou resultados de simulação mais próximos da plataforma experimental do que os modelos já conhecidos, além de exigir menor esforço computacional.

Outro ponto que merece destaque nos problemas enfrentados neste trabalho é a obtenção do valor instantâneo do conjugado dinamicamente, ou seja, obter os valores do conjugado enquanto a máquina está em movimento. Este valor é importante para a pesquisa uma vez que a variável de interesse é o rendimento do gerador que, por sua vez, depende do conjugado fornecido pela máquina primária, conforme 5.9. Os equipamentos de medição de conjugado disponíveis comercialmente onerariam de forma considerável o desenvolvimento da plataforma experimental. Este fato estimulou o desenvolvimento do sistema de detecção indireta de conjugado, proporcionado por 5.8.

Logo, estas dificuldades operacionais referentes ao acionamento e controle da máquina como gerador e a necessidade de medição instantânea de conjugado contribuíram para o desenvolvimento de: i) uma nova estratégia para representação das indutâncias do gerador e suas respectivas taxas de variação e ii) um sistema de medição de conjugado instantâneo relativamente menos oneroso e que proporciona resultados satisfatórios.

Além destes dois pontos, a análise de sensibilidade *one-at-a-time* foi empregada para auxiliar na definição de qual variável poderia ser empregada como variável manipulada pelo controlador PID de tensão. Este controlador, para poder operar com variação de referência, perturbações na carga e variações nos ângulos de chaveamento, necessitou de sintonia não convencional, realizada por processo de otimização.

Por fim, o controlador PID pode operar em paralelo com a técnica de rastreamento de rendimento, denominada MEPT, possibilitando o controle da tensão de saída do gerador associado à potencialização do rendimento.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

Durante todo o percurso para o término deste trabalho, foi realizado um estudo acerca do Gerador a Relutância Chaveado de forma que, a partir das características de um dispositivo já existente, foi projetada e construída uma plataforma experimental para acionamento, controle e otimização do gerador.

O modelo matemático do gerador foi utilizado para a elaboração de um modelo computacional, porém empregando uma forma alternativa para representação das indutâncias das bobinas e suas respectivas taxas de variação, fatores determinantes para a qualidade do modelo computacional, especialmente quando comparado com a plataforma experimental que proveu dados para a regressão paramétrica da superfície contínua de indutância.

A partir de um ensaio experimental para o levantamento de alguns pontos de indutância das bobinas do gerador, uma técnica de identificação de sistemas conhecida como regressão paramétrica, empregando otimização, foi usada de forma a se obter uma equação que pudesse representar um conjunto infinito de pontos de indutância em função da corrente aplicada à bobina e em função da posição angular do rotor: $L(\theta, i)$.

Este modelo foi devidamente validado com a plataforma experimental desenvolvida, apresentando precisão satisfatória e, além disso, tempo de simulação inferior aos modelos já existentes.

Como o objetivo do trabalho é o controle de potência do gerador associado à elevação do rendimento, tal variável faz com que seja necessária a medição do conjugado aplicado ao eixo do gerador, a fim de se obter a potência mecânica aplicada. Durante o projeto e a construção da plataforma experimental, foi projetado e desenvolvido um sistema para medição indireta do conjugado no eixo, a partir das correntes instantâneas e da posição angular. Este sistema também apresentou medidas relativamente satisfatórias, possibilitando então a medição do conjugado e, posteriormente, a otimização do gerador, uma vez que as técnicas de otimização possuem dependência do modelo do sistema.

A tensão de saída do gerador a relutância chaveado por ser controlada empregando

diferentes variáveis manipuladas, especialmente a tensão de excitação e o ângulo de desligamento das bobinas. Um estudo foi desenvolvido neste trabalho empregando análise de sensibilidade e simulações computacionais que permitiram a comparação entre estas duas estratégias de controle, indicando a tensão de excitação como uma variável manipulada mais segura, sensível e que permite a elevação do rendimento do gerador se o controlador é associado a técnica de rastreamento em paralelo.

A técnica de rastreamento apresentada neste trabalho mostrou que o controlador PID otimizado mantém seu desempenho mesmo quando os ângulos de chaveamento são variados pelo algoritmo perturba e observa, da técnica de rastreamento.

Assim como esperado, os resultados mostraram que o rendimento de um modelo específico de GRC pode ser elevado em até mais de 10% quando o rastreador é aplicado em paralelo com o controlador PID. O sistema proposto neste trabalho resulta em robustez perante perturbações de carga e elevação do rendimento do gerador, favorecendo este dispositivo para aplicações com excitação solar e acionamento eólico, contribuindo positivamente para sistemas de geração distribuída integrados por fontes renováveis de energia.

7.1 Contribuições do Trabalho

As contribuições podem assim ser descritas:

Artigo em periódicos:

[1] Marcio Rodrigues da Cunha Reis, Wanderson Rainer Hilario de Araujo, Viviane Margarida Gomes, Felipe dos Santos e Silva, Cleber Asmar Ganzaroli, Flavio Adalberto Gomes, Gabriel Andres Wainer, Wesley Pacheco Calixto, **Optimized techniques for driving and control of the switched reluctance motor to improve efficiency**, Control Engineering Practice, Volume 90, 2019, Pages 1-18, ISSN 0967-0661, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.06.007>.

[2] GOMES, Flávio Adalberto et al. **Proposal of heuristic regression method applied in descriptive data analysis: case studies**. Transactions on Environment and Electrical Engineering, [S.l.], v. 2, n. 2, p. 51-57, july 2017. ISSN 2450-5730. doi:<http://dx.doi.org/10.22149/teee.v2i2.105>.

[3] Magalhaes, AS, Bulhoes, JS, Reis, MRC, et al. **Experimental study of induc-**

tion generator as a repowering solution. Int Trans Electr Energ Syst. 2020; 30:e12365. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12365>

Artigos em congressos:

[1] J. L. Botelho et al., "**Parametric regression methodology and optimized control for DC motor**,"2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/EPE.2017.7967296.

[2] M. R. C. Reis, W. P. Calixto, W. R. H. Araújo and C. A. Matias, "**Increasing efficiency of the switched reluctance generator using parametric regression and optimization methods**,"2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPE.2017.7967297.

[3] W. R. H. Araujo, M. R. C. Reis, W. P. Calixto, G. A. Wainer, A. S. Magalhes and F. A. Gomes, "**Nonlinear simulation methodology for switched reluctance machine using induction profile found by parametric regression**,"2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), Pucon, 2017, pp. 1-8, doi: 10.1109/CHILECON.2017.8229732.

[4] J. P. Saraiva et al., "**Calculation of sensitivity index using one-at-a-time measures based on graphical analysis**,"2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPE.2017.7967329.

[5] M. R. C. Reis et al., "**Speed control for direct current motor using optimization tuning for PID controller**,"2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555596.

[6] M. R. C. Reis, W. P. Calixto, W. R. H. Araújo, A. J. Alves and J. L. Domingos, "**Switched reluctance generator efficiency improvement for wind energy applications**,"2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555663.

[7] W. R. H. Araújo, W. P. Calixto, M. R. C. Reis, L. F. Rodrigues and D. W. P. Martins, "**Comparative analysis between PI and fuzzy controllers applied to a workbench with an induction motor**," 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555664.

7.2 Trabalhos Futuros

- Aplicação experimental do algoritmo de rastreamento em tempo real;
- Análise do algoritmo de rastreamento operando em paralelo com controlador Fuzzy;
- Análise do controle pelo ângulo de desligamento para o GRC auto-excitado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abedini, S.; Zarabadipour, H. Tuning of an optimal pid controller with iterative feedback tuning method for dc motor. In: **The 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 611–615.

[84](#)

ANDRADE, D. A.; COSTA, R. S.; TEIXEIRA, R. S.; FLEURY, A. V. Energy efficiency for fractional power loads. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 12, n. 6, p. 12–20, Nov 2006. ISSN 1077-2618. [39](#)

ANDRADE, D. A.; KRISHNAN, R. Characterization of switched reluctance machines using fourier series approach. In: **Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting (Cat. No.01CH37248)**. [S.l.: s.n.], 2001. v. 1, p. 48–54 vol.1. ISSN 0197-2618.

[59](#), [82](#)

ARAUJO, W. R. H. **Projeto e Construção de um Protótipo e Implementação de Estratégias de Chaveamento de um Motor a Relutância Chaveado**. Dissertação de Mestrado, 2006. [39](#), [41](#), [61](#), [73](#), [114](#)

ARIFIN, A. M. S. **Switched Reluctance Generator Drive in the Low and Medium Speed Operation: Modelling and Analysis**. Thesis, 2013. [39](#)

ARORA, R. K. **Optimization - algorithms and applications**. [S.l.: s.n.], 2015.

[63](#)

BARROS, T. A. d. S.; NETO, P. J. d. S.; FILHO, P. S. N.; MOREIRA, A. B.; FILHO, E. R. An approach for switched reluctance generator in a wind generation system with a wide range of operation speed. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 32, n. 11, p. 8277–8292, Nov 2017. ISSN 0885-8993. [28](#)

BOLDEA, I. Control of electric generators: a review. In: **Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE**.

[S.l.: s.n.], 2003. v. 1, p. 972–980 vol.1. [36](#)

BORGES, T. T. **Motor a Relutância Chaveado com Controle Fuzzy e Detecção Indireta de Posição**. Tese de Doutorado, 2002. [38](#), [41](#)

BRATILOVEANU, C. R.; ANGHELUȘ, D.; BOLDEA, I. A comparative investigation of three pm-less mw power range wind generator topologies. In: **2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 535–543. ISSN 1842-0133. [37](#)

CAI, W. Comparison and review of electric machines for integrated starter alternator applications. In: **Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting**. [S.l.: s.n.], 2004. v. 1, p. 393. ISSN 0197-2618. [36](#)

CALIXTO, W. P.; COIMBRA, A. P.; MOTA, J. C. d.; WU, M.; SILVA, W. G. da; ALVARENGA, B.; BRITO, L. d. C.; ALVES, A. J.; DOMINGUES, E. G.; NETO, D. P. Troubleshooting in geoelectrical prospecting using real-coded genetic algorithm with chromosomal extrapolation. **International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields**, v. 28, n. 1, p. 78–95, 2015. ISSN 1099-1204. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/jnm.1986>. [67](#)

CARDENAS, R.; PENA, R.; PEREZ, M.; CLARE, J.; ASHER, G.; WHEELER, P. Control of a switched reluctance generator for variable-speed wind energy applications. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 20, n. 4, p. 781–791, Dec 2005. ISSN 0885-8969. [37](#)

CARDENAS, R.; RAY, W. F.; ASHER, G. M. Switched reluctance generators for wind energy applications. In: **Power Electronics Specialists Conference, 1995. PESC '95 Record., 26th Annual IEEE**. [S.l.: s.n.], 1995. v. 1, p. 559–564 vol.1. [37](#), [46](#)

CHAN, C. C. The state of the art of electric and hybrid vehicles. **Proceedings of the IEEE**, v. 90, n. 2, p. 247–275, Feb 2002. ISSN 0018-9219. [36](#)

CHEN, H.; MANG, C.; ZHAO, X. Research on the switched reluctance wind generator system. In: **2001 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. e-Systems and e-Man for Cybernetics in Cyberspace (Cat.No.01CH37236)**. [S.l.: s.n.], 2001. v. 3, p. 1936–1941 vol.3. ISSN 1062-922X. [46](#)

CHEN, H.; SHAO, Z. Turn-on angle control for switched reluctance wind power generator system. In: **30th Annual Conference of IEEE Industrial**

Electronics Society, 2004. IECON 2004. [S.l.: s.n.], 2004. v. 3, p. 2367–2370
Vol. 3. 37

da Cunha Reis, M. R.; de Araujo, W. R. H.; GOMES, V. M.; dos Santos e Silva, F.; GANZAROLI, C. A.; GOMES, F. A.; WAINER, G. A.; CALIXTO, W. P. Optimized techniques for driving and control of the switched reluctance motor to improve efficiency. **Control Engineering Practice**, v. 90, p. 1 – 18, 2019. ISSN 0967-0661. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066119300826>>. 95

DARIE, E.; CEPISCA, C.; DARIE, E. Notice of violation of iee publication principles the use of switched reluctance menerator in wind energy applications. In: **2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference.** [S.l.: s.n.], 2008. p. 1963–1966. 48

DOU, Y.; WANG, Q.; CHEN, H.; YU, D. High efficiency control of switched reluctance generator above base speed. In: **2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES).** [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. 28

EHSANI, M.; RAHMAN, K. M.; TOLIYAT, H. A. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 44, n. 1, p. 19–27, Feb 1997. ISSN 0278-0046. 36

EMADI, A.; WILLIAMSON, S. S.; KHALIGH, A. Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric, and fuel cell vehicular power systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 21, n. 3, p. 567–577, May 2006. ISSN 0885-8993. 36

ENERGIA, M. de Minas e. **Programa Luz para Todos.** 2014. Disponível em: <https://www.mme.gov.br/luzparatodos/Asp/o_programa.asp>. 30

FAHIMI, B. A switched reluctance machine based starter/generator for more electric cars. In: **IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat. No.01EX485).** [S.l.: s.n.], 2001. p. 73–78. 36

FAHIMI, B.; EMADI, A.; SEPE, R. B. A switched reluctance machine-based starter/alternator for more electric cars. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 19, n. 1, p. 116–124, March 2004. ISSN 0885-8969. 36

FAIZ, J.; MOAYED-ZADEH, K. Design of switched reluctance machine for starter/generator of hybrid electric vehicle. **Electric Power Systems Research**, v. 75, n. 2-3, p. 153–160, 2005. ISSN 0378-7796. [36](#)

FELGNER, F.; MEIERS, J.; EXEL, L.; FREY, G. Design of distributed energy systems: Role and requirements of modeling and simulation. In: **Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5. ISSN 1946-0740. [27](#)

FERNANDES, N.; R., B.; GEORGE, S. Control of switched reluctance generator in wind energy system. In: **2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–7. [28](#)

FERREIRA, C.; JONES, S. R.; HEGLUND, W. S.; JONES, W. D. Detailed design of a 30-kw switched reluctance starter/generator system for a gas turbine engine application. In: **Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting**. [S.l.: s.n.], 1993. p. 97–105 vol.1. [36](#)

FLEURY, A.; ANDRADE, D. A. de; SILVA, F. d. S. e; DOMINGOS, J. L. Switched reluctance generator for complementary wind power generation in grid connection. In: **2007 IEEE International Electric Machines Drives Conference**. [S.l.: s.n.], 2007. v. 1, p. 465–470. [37](#)

FRENCH, P. S. J. R. Switched reluctance motor drives for rail traction: relative assessment. **IEE Proceedings B - Electric Power Applications**, v. 131, n. 5, p. 209–219, September 1984. ISSN 0143-7038. [35](#)

GOMES, F.; ASSIS, A. de O.; REIS, M. R. da C.; GOMES, V. M.; OLIVEIRA, S. G. M.; ARAUJO, W. R. H. de; CALIXTO, W. P. Proposal of heuristic regression method applied in descriptive data analysis: case studies. **Transactions on Environment and Electrical Engineering**, v. 2, n. 2, p. 51–57, 2017. ISSN 2450-5730. [85](#)

GOMES, F. A.; GOMES, V. M.; ASSIS, A. d. O.; REIS, M. R. d. C.; CRUZ, G. da; CALIXTO, W. P. Heuristic regression method for descriptive data analysis. In: **2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5. [69](#), [70](#)

HAMBY, D. M. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 32, n. 2, p. 135–154, Sep 1994. ISSN 1573-2959. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00547132>>. 71

HAO, C.; TAO, S.; FANG, X.; YIFENG, Z. A switched reluctance wind power generator with the excitation of low voltage. In: **IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics**. [S.l.: s.n.], 2002. v. 6, p. 5 pp. vol.6–. ISSN 1062-922X. 46

HEIER, S. **Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems**. [S.l.: s.n.], 2014. 28

HU, J.-b.; HE, Y.-k. Dynamic modelling and robust current control of wind-turbine driven dfig during external ac voltage dip. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A**, v. 7, n. 10, p. 1757–1764, 2006. ISSN 1862-1775. 37

ILIC-SPONG, M.; MILLER, T. J. E.; MACMINN, S. R.; THORP, J. S. Instantaneous torque control of electric motor drives. **IEEE Transactions on Power Electronics**, PE-2, n. 1, p. 55–61, Jan 1987. ISSN 0885-8993. 54

JOHANSSON, R. **System modeling and identification**. [S.l.: s.n.], 1993. 69

LAFOZ, M.; MORENO-TORRES, P.; TORRES, J.; BLANCO, M.; NAVARRO, G. Design methodology of a high speed switched reluctance generator drive for aircrafts. In: **2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–9. 28

LIU, Y. z.; ZHOU, Z.; SONG, J. l.; FAN, B. j.; WANG, C. Based on sliding mode variable structure of studying control for status switching of switched reluctance starter/generator. In: **2015 Chinese Automation Congress (CAC)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 934–939. 29

MACMINN, S. R.; JONES, W. D. A very high speed switched-reluctance starter-generator for aircraft engine applications. In: **Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference**. [S.l.: s.n.], 1989. p. 1758–1764 vol.4. 36

MACMINN, S. R.; SEMBER, J. W. Control of a switched-reluctance aircraft engine starter-generator over a very wide speed range. In: **Proceedings of the**

24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. [S.l.: s.n.], 1989. p. 631–638 vol.1. [36](#)

MILLER, T. J. E. Optimal design of switched reluctance motors. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 49, n. 1, p. 15–27, Feb 2002. ISSN 0278-0046. [38](#)

MISHRA, A. K.; SINGH, B. A single stage solar pv array based water pumping system using srm drive. In: **2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting.** [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–8. [28](#)

MOHSENI, M.; NIASSATI, N.; TAJIK, S.; AFJEI, E. A novel method of maximum power point tracking for a srg based wind power generation system using ai. In: **2012 3rd Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC).** [S.l.: s.n.], 2012. p. 330–335. [29](#)

MUELLER, M. A. Design of low speed switched reluctance machines for wind energy converters. In: **1999. Ninth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 468).** [S.l.: s.n.], 1999. p. 60–64. ISSN 0537-9989. [46](#), [47](#)

_____. Design and performance of a 20 kw, 100 rpm, switched reluctance generator for a direct drive wind energy converter. In: **IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005.** [S.l.: s.n.], 2005. p. 56–63. [37](#), [46](#)

MURAHARA, M.; SEKI, K. On-site sodium production with seawater electrolysis as alternative energy for oil by offshore wind power generation. In: **2008 IEEE Energy 2030 Conference.** [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–8. [27](#)

NASSEREDDINE, M. **Switched Reluctance Generator for Wind Power Applications.** Master of Engineering, 2011. [30](#), [35](#), [37](#), [45](#)

OGAWA, K.; YAMAMURA, N.; ISHIDA, M. Study for small size wind power generating system using switched reluctance generator. In: **2006 IEEE International Conference on Industrial Technology.** [S.l.: s.n.], 2006. p. 1510–1515. [37](#)

OSORIO, C. R. D.; VIEIRA, R. P.; GRUNDLING, H. A. Sliding mode technique applied to output voltage control of the switched reluctance generator. In: **IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.** [S.l.: s.n.], 2016. p. 2935–2940. [28](#)

POLLOCK, C.; MICHAELIDES, A. Switched reluctance drives: a comparative evaluation. **Power Engineering Journal**, v. 9, n. 6, p. 257–266, Dec 1995. ISSN 0950-3366. [39](#)

QIXUE, Z.; XIANGHENG, W.; XUEZHONG, Z.; DIJI, L. A small single-phase switched reluctance generator for wind power generation. In: **Electrical Machines and Systems, 2001. ICEMS 2001. Proceedings of the Fifth International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2001. v. 2, p. 1003–1006 vol.2. [46](#)

RADUN, A. V. High-power density switched reluctance motor drive for aerospace applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 28, n. 1, p. 113–119, Jan 1992. ISSN 0093-9994. [36](#)

RADUN, A. V.; FERREIRA, C. A.; RICHTER, E. Two-channel switched reluctance starter/generator results. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 34, n. 5, p. 1026–1034, Sep 1998. ISSN 0093-9994. [36](#)

RAHMANIAN, E.; AKBARI, H.; SHEISI, G. H. Maximum power point tracking in grid connected wind plant by using intelligent controller and switched reluctance generator. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 8, n. 3, p. 1313–1320, 2017. ISSN 1949-3029. [28](#)

RAMU, K. **Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications**. [S.l.: s.n.], 2001. [38](#), [41](#), [51](#)

REIS, M. R. C.; CALIXTO, W. P.; ARAUJO, W. R. H.; MATIAS, C. A. Increasing efficiency of the switched reluctance generator using parametric regression and optimization methods. In: **2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. [29](#)

REIS, M. R. d. C. **Tecnicas de Acionamento e Controle Otimo Aplicados ao Motor a Relutancia Chaveado para Maximizar o Rendimento**. Tese de Doutorado, 2020. [95](#)

REIS, M. R. da C.; ARAÚJO, W. R. H. de; CALIXTO, W. P.; ALVES, A. J. Analysis of switched reluctance motor efficiency under different speed control strategies. In: **2015 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 467–472. [29](#), [83](#)

REN, H.; WU, Q.; BAN, Y. Design and assessment of distributed energy systems for neighboring buildings. In: **2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 651–654. ISSN 2161-7481. [27](#)

REN, H.; ZHOU, W.; NAKAGAMI, K. Transition to a low-carbon energy system through cooperation between urban and rural areas: Case study of a model area in china. In: **2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)**. [S.l.: s.n.], 2010. v. 5, p. 55–58. [29](#)

RICHTER, E.; FERREIRA, C. Performance evaluation of a 250 kw switched reluctance starter generator. In: **Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Conference Record of the 1995 IEEE**. [S.l.: s.n.], 1995. v. 1, p. 434–440 vol.1. ISSN 0197-2618. [36](#)

ROBERT, E. B. Chapter 8 - modeling and control of synchronous reluctance machines. In: _____. **Control in Power Electronics**. [S.l.: s.n.], 2002. [82](#)

SAKAKIBARA, K.; NAKAZAKI, T.; MATSUMOTO, T.; TANIGUCHI, I.; TAMAKI, H. Analysis of decentralized energy systems by mathematical programming techniques. In: **2015 54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 228–233. [27](#)

SARAIVA, J. P.; LIMA, B. S.; GOMES, V. M.; FLORES, P. H. R.; GOMES, F. A.; ASSIS, A. O.; REIS, M. R. C.; ARAUJO, W. R. H.; ABRENHOSA, C.; CALIXTO, W. P. Calculation of sensitivity index using one-at-a-time measures based on graphical analysis. In: **2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. [28](#), [70](#), [72](#)

SCHOFIELD, N.; LONG, S. Generator operation of a switched reluctance starter/generator at extended speeds. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 58, n. 1, p. 48–56, Jan 2009. ISSN 0018-9545. [36](#)

SHIN, H. U.; LEE, K. B. Optimal design of a 1 kw switched reluctance generator for wind power systems using a genetic algorithm. **IET Electric Power Applications**, v. 10, n. 8, p. 807–817, 2016. ISSN 1751-8660. [28](#)

SHOUJUN, S.; WEIGUO, L.; SCHAEFER, U. Thermal analysis of a 30kw switched reluctance starter/generator system used in aircraft. In: **2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 331–336. ISSN 2155-5516. [36](#)

SIMANI, S. Overview of modelling and advanced control strategies for wind turbine systems. **Energies**, v. 8, n. 12, p. 13395–13418, 2015. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/8/12/12374>>. [46](#)

SOGABE, T.; ICHIKAWA, H.; SOGABE, T.; SAKAMOTO, K.; YAMAGUCHI, K.; SOGABE, M.; SATO, T.; SUWA, Y. Optimization of decentralized renewable energy system by weather forecasting and deep machine learning techniques. In: **2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1014–1018. [27](#)

Somasundaram, S.; Benjanarasuth, T. Cdm based two degree of freedom pid controller tuning rules for stable foptd processes. In: **2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 221–225. [84](#)

SUSITRA, D.; JEBASEELI, E. A. E. **Switched Reluctance Generator - Modeling, Design, Simulation, Analysis and Control A Comprehensive Review**. 2010. [35](#)

Tajjudin, M.; Rahiman, M. H. F.; Ishak, N.; Adnan, R.; Ismail, H. Comparison between optimally-tuned pid with self-tuning pid for steam temperature regulation. In: **2012 4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS2012)**. [S.l.: s.n.], 2012. v. 2, p. 551–556. [84](#)

TAKENO, M.; CHIBA, A.; HOSHI, N.; OGASAWARA, S.; TAKEMOTO, M.; RAHMAN, M. A. Test results and torque improvement of the 50-kw switched reluctance motor designed for hybrid electric vehicles. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 48, n. 4, p. 1327–1334, July 2012. ISSN 0093-9994. [36](#)

VASSALLO, A.; MAKER, P.; DIXON, T.; AGELIDIS, V. Electricity storage: Renewable energy applications in the australian context. **IEEE Electrification Magazine**, v. 3, n. 3, p. 22–29, Sept 2015. ISSN 2325-5897. [29](#)

VITTAL VIJAY; AYYANAR, R. **Grid Integration and Dynamic Impact of Wind Energy**. [S.l.: s.n.], 2013. [27](#)

VUJICIC, V. P.; CALASAN, M. P. Simple sensorless control for high-speed operation of switched reluctance generator. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 31, n. 4, p. 1325–1335, Dec 2016. ISSN 0885-8969. [28](#)

WALKER, A.; ANPALAHAN, P.; COLES, P.; LAMPERTH, M.; RODGERT, D. Automotive integrated starter generator. In: **Second International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2004)**. [S.l.: s.n.], 2004. v. 1, p. 46–48 Vol.1. ISSN 0537-9989. [36](#)

WANG, S.; ZHAN, Q.; MA, Z.; ZHOU, L. Implementation of a 50-kw four-phase switched reluctance motor drive system for hybrid electric vehicle. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 41, n. 1, p. 501–504, Jan 2005. ISSN 0018-9464. [36](#)

WEIMER, J. A. Electrical power technology for the more electric aircraft. In: **[1993 Proceedings] AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference**. [S.l.: s.n.], 1993. p. 445–450. [36](#)

XU, J.-X.; PANDA, S. K.; ZHENG, Q. Multiobjective optimization of current waveforms for switched reluctance motors by genetic algorithm. In: **Evolutionary Computation, 2002. CEC '02. Proceedings of the 2002 Congress on**. [S.l.: s.n.], 2002. v. 2, p. 1860–1865. [29](#)

ZHU, Z. Q.; HOWE, D. Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. **Proceedings of the IEEE**, v. 95, n. 4, p. 746–765, April 2007. ISSN 0018-9219. [36](#)