



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO**

**VANESSA SIQUEIRA DE CASTRO TEIXEIRA**

**GERADOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL COM NÚCLEO DO TIPO C: ASPECTOS CONSTRUTIVOS E OPERACIONAIS**

***C-CORE SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR: CONSTRUCTIVE AND OPERATIONAL ASPECTS***

**CAMPINAS  
2018**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO**

**VANESSA SIQUEIRA DE CASTRO TEIXEIRA**

**GERADOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL COM NÚCLEO DO TIPO C: ASPECTOS CONSTRUTIVOS E OPERACIONAIS**

***C-CORE SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR: CONSTRUCTIVE AND OPERATIONAL ASPECTS***

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica, na área de Energia Elétrica.

*Doctorate thesis presented to the Electrical Engineering Postgraduation Program of the School of Engineering Electrical of the University of Campinas to obtain the Ph.D. grade in Engineering Electrical, in field of Electrical Energy.*

Orientador: Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho

Coorientador: Prof. Dr. Tércio André dos Santos Barros

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELA ALUNA VANESSA SIQUEIRA DE CASTRO TEIXEIRA E ORIENTADA PELO PROF. DR. ERNESTO RUPPERT FILHO

---

**CAMPINAS  
2018**

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1862-6389>

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

T235g Teixeira, Vanessa Siqueira de Castro, 1982-  
Gerador de relutância variável com núcleo do tipo C : aspectos construtivos e operacionais / Vanessa Siqueira de Castro Teixeira. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Ernesto Ruppert Filho.  
Coorientador: Tércio André dos Santos Barros.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Geradores elétricos. 2. Máquinas elétricas - Projetos e construção. 3. Método dos elementos finitos. I. Ruppert Filho, Ernesto, 1948-. II. Barros, Tércio André dos Santos, 1987-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

#### Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** C-Core switched reluctance generator : constructive and operational aspects

**Palavras-chave em inglês:**

Electrical generators

Electrical machines - Projects and construction

Finite element method

**Área de concentração:** Energia Elétrica

**Títuloção:** Doutora em Engenharia Elétrica

**Banca examinadora:**

Ernesto Ruppert Filho [Orientador]

Manoel Luís de Aguiar

Carlos Alberto Baldan

José Pissolato Filho

José Luís Azcue Puma

**Data de defesa:** 23-02-2018

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Elétrica

## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

**Candidata:** Vanessa Siqueira de Castro Teixeira: 144476

**Data da Defesa:** 23 de fevereiro de 2018

**Título da Tese:** “Gerador de relutância variável com núcleo do tipo C: aspectos construtivos e operacionais”.

Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho (Presidente, FEEC/UNICAMP)

Prof. Dr. José Pissolato Filho (FEEC/UNICAMP)

Prof. Dr. Manoel Luís de Aguiar (USP/SC)

Prof. Dr. José Luis Azcue Puma (UFABC)

Prof. Dr. Carlos Alberto Baldan (USP/Lorena)

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no processo de vida acadêmica da aluna.

*Dedico essa tese, e todo o meu amor, àqueles que investiram tempo e energia em prol do meu desenvolvimento e que são a base de toda a minha vida: minha querida família e amigos.*

## AGRADECIMENTOS

Veni, vidi, vinci. Mas disse o grande escritor Antoine de Saint-Exupéry: “aqueles que passam por nós, deixam um pouco de si, levam um pouco de nós.” Desta forma, sei que não cheguei até aqui sozinha.

À DEUS, o grande orientador da minha vida,

à minha mãe (Maria Siqueira) e meus queridos irmãos (Régis e Ítalo Teixeira), minha fonte de equilíbrio e amor,

aos Professores Ernesto Ruppert e Tércio André, pela orientação, dedicação e incentivo,

ao meu querido amigo Adson Bezerra, por todo apoio, ajuda, companheirismo e orientação durante essa jornada,

aos amigos de Laboratório (a Turma do Lepo Lepo) que me auxiliaram bastante no desenvolvimento deste trabalho,

às minhas queridas amigas cearenses da gema Nilena Brito, Giselle Soares, Lina Kassouf por toda a força, alegria e otimismo nas horas mais difíceis,

às Mazelas Josilaine Oliveira e Franciele Araújo, pela amizade e incentivo,

ao meu querido Nicola Trevisan, o italiano mais cearense que já conheci na vida, por todo o carinho, ajuda, sorrisos e críticas,

a todos estes e aos que não citei, mas que estiveram comigo durante essa jornada, sou eternamente grata.

*“Projetar é fácil quando se sabe como se faz. Tudo se torna fácil quando se conhece o modo de proceder para chegar à solução de algum problema, e os problemas que se apresentam na vida são infinitos: problemas simples que parecem difíceis porque se não se conhecem e problemas que parecem impossíveis de resolver”*

(Bruno Munari)

## RESUMO

O gerador de relutância variável (GRV) é considerado uma alternativa competitiva às máquinas elétricas convencionais utilizadas para a produção de energia elétrica a partir da energia eólica em aplicações de pequeno e médio portes. Entre os tipos construtivos dessa máquina elétrica, destaca-se a de fluxo magnético axial com núcleo do tipo C (GRV-C) que é abordada nesta pesquisa. Esta tese apresenta uma proposta de metodologia para o projeto eletromagnético de geradores de relutância variável de fluxo magnético axial com núcleo do tipo C e realiza análises estáticas e dinâmicas da sua operação em modo autoexcitado. O GRV-C é um tipo de gerador de relutância variável não convencional sendo que a maioria das pesquisas realizadas com o GRV focam nas estruturas tradicionais (estruturas regulares e de fluxo radial). Desta forma, este trabalho complementa a literatura, apresentando considerações sobre os dimensionamentos elétrico e magnético do GRV-C de pequeno e médio portes. A metodologia proposta foca diferentes aspectos. Primeiramente, as dimensões de um projeto inicial do núcleo eletromagnético são calculadas por meio de equações analíticas e de considerações baseadas em projetos de máquinas de relutância convencionais. Na sequência, um modelo usando o método dos elementos finitos em duas dimensões (MEF-2D) é utilizado no processo de otimização dos projetos elétrico e magnético. Optou-se pelo MEF-2D no processo de otimização dos parâmetros construtivos a fim de reduzir o tempo de processamento, quando comparado ao método dos elementos finitos em três dimensões (MEF-3D). Foi necessário inserir fatores de correção no modelo em duas dimensões. A análise da operação do GRV-C realizada nesta pesquisa é distinta das encontradas na literatura. Ela apresenta estudos comparativos entre três projetos de geradores obtidos a partir da metodologia proposta. Simulações estáticas e dinâmicas foram realizadas por meio de dois modelos diferentes: um usando o método dos elementos finitos e o outro baseado nas curvas de magnetização do gerador que representam bem as não linearidades magnéticas do gerador elétrico. Seguindo a metodologia de projeto proposta, foram obtidas as dimensões de um quarto gerador (utilizando o material magnético o disponível na empresa responsável pela fabricação) e o protótipo de um dos núcleos C foi construído a fim determinar os resultados estáticos experimentais. Os resultados de simulação e experimentais obtidos atestam a viabilidade e eficiência da metodologia proposta para o projeto de um GRV-C.

**Palavras-chave:** Fluxo Magnético Axial. Gerador de Relutância Variável. Método dos Elementos Finitos. Projeto Eletromagnético de Máquinas Elétricas.



## **ABSTRACT**

*The switched reluctance generator (SRG) is considered a competitive alternative to traditional electric machines used in wind energy systems for electric power generation for small and medium power applications. Prominent among the topologies of these electric machines is the Axial-Flux Switched Reluctance Generator with C Core (C-SRG) that is addressed in this research. This thesis presents a methodology proposal for the electromagnetic design of the Axial-Flux Switched Reluctance Generator with C Core and performs statics and dynamics analysis in self-exciting operation mode. The C-SRG is a non-conventional type of the switched reluctance generator and most research focuses on traditional structures of SRG (regular with the radial flux). So, this research supplements the literature, addressing a comprehensive framework of the electric and magnetic design of the C-SRG for small and medium power requirement. The proposed methodology focuses on different aspects. First, the dimensions of one initial design are obtained from analytic equations and design considerations based on traditional switched reluctance machines. After, a two-dimensional finite element method (FEM-2D) model is used to optimize the constructive parameters. The FEM-2D was chosen due to the high processing time during the optimization process when compared to three-dimensional finite element method (FEM-3D) model. However, it was necessary to include correction factors to calculate the inductances of the C-SRG model. The thesis C-SRG operations analysis is distinct from similar studies. It presents the comparative of three C-SRGs designs that were obtained from the proposed methodology. The static and dynamic simulations use two different models: one based on finite element method and the other on the generator's magnetization curves that well represents the magnetic nonlinearities of the electric generator. From the proposed design methodology, the final dimensions of a fourth generator are obtained (using the magnetic material available in the company responsible of the manufacturing) and an C-core prototype of the generator was built in order to obtain its experimental static results. The simulated and experimental results attested the viability and efficiency of the proposed methodology on the C-SRG design.*

**Keywords:** Axial Magnetic Flux. Electromagnetic Machine Design. Finite Element Method. Switched Reluctance Generator.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> – Diagrama do acionamento de um GRV-C em cascata para geração eólica .....	21
<b>Figura 2.1</b> – Configuração do gerador de relutância variável do tipo C – Fonte: X. D. Xue, K. W. E. Cheng, Y. J. Bao e J. Leung, “Design Consideration of C-core Switched Reluctance Generators for Wind Energy,” em in Proc. of Power Electronics Systems and Applications, Hong Kong, 2011 [20]. .....	28
<b>Figura 2.2</b> – Construção de um enrolamento auxiliar em um GRV-C – Fonte: X. Liu, K. Park e Z. Chen, “A Novel Excitation Assistance Switched Reluctance Wind Power Generator,” IEEE Transaction on Magnetics, vol. 50, nº 11, 2014 [21]. .....	28
<b>Figura 3.1</b> - GRV-C: vista parcial em perspectiva.....	30
<b>Figura 3.2</b> - GRV-C: vista parcial superior.....	31
<b>Figura 3.3</b> – Caminhos de fluxo magnético no núcleo C.....	32
<b>Figura 3.4</b> – Comportamento da indutância e operação do GRV-C no modo gerador.....	33
<b>Figura 3.5</b> – Princípio de funcionamento: etapa de excitação. ....	34
<b>Figura 3.6</b> – Princípio de funcionamento: etapa de geração. ....	34
<b>Figura 3.7</b> – Representação por fase do GRV-C.....	35
<b>Figura 3.8</b> – Representação por fase do GRV-C.....	36
<b>Figura 4.1</b> – Etapas do projeto do GRV-C.....	40
<b>Figura 4.2</b> – Distância angular entre fases adjacentes: $\delta_m=0$ . ....	44
<b>Figura 4.3</b> – Distância angular entre fases adjacentes: $\delta_m > 0$ . ....	44
<b>Figura 4.4</b> – Limites dos arcos polares. ....	45
<b>Figura 4.5</b> – Curva o material magnético DR5 10-50: joelho da curva. ....	46
<b>Figura 4.6</b> – Núcleo magnético C. ....	47
<b>Figura 4.7</b> – Algoritmo para determinação do número de espiras. ....	49
<b>Figura 4.8</b> – Indutâncias alinhada e desalinhada versus número de espiras. ....	51
<b>Figura 4.9</b> – Vistas do núcleo do GRV-C: (a) frontal; (b) lateral. ....	52
<b>Figura 4.10</b> – Soluções da função multiobjetivo. ....	54
<b>Figura 4.11</b> – Soluções de Pareto ótimas: (a) Diversidade de soluções satisfatória. ....	55
<b>Figura 4.12</b> – Soluções de Pareto ótimas: Diversidade de soluções precária. ....	55
<b>Figura 4.13</b> – Distribuição de Pareto: Gerador 1. ....	58
<b>Figura 4.14</b> – Distribuição de Pareto: Gerador 2. ....	58
<b>Figura 4.15</b> – Distribuição de Pareto: Gerador 3. ....	58

<b>Figura 4.16</b> – Critério de decisão: Gerador 1. ....	59
<b>Figura 4.17</b> – Critério de decisão: Gerador 2. ....	59
<b>Figura 4.18</b> – Soluções da função multiobjetivo: Gerador 3. ....	60
<b>Figura 5.1</b> – Exemplo de elementos utilizados na subdivisão do domínio. ....	64
<b>Figura 5.2</b> – Modelo Físico do GRV-C do Maxwell 3D. ....	65
<b>Figura 5.3</b> – Distribuição do Campo Magnético Gerador 1 (650 rpm): (a) alinhado; (b) desalinhado. ....	66
<b>Figura 5.4</b> – Distribuição do Campo Magnético Gerador 2 (1000 rpm): (a) alinhado; (b) desalinhado. ....	67
<b>Figura 5.5</b> – Distribuição do Campo Magnético Gerador 3 (1500 rpm): (a) alinhado; (b) desalinhado. ....	67
<b>Figura 5.6</b> – Exemplo do cálculo do ciclo de trabalho $W_m$ . ....	68
<b>Figura 5.7</b> – Exemplo do enlace de fluxo magnético durante operação dinâmica. ....	69
<b>Figura 5.8</b> – Curvas de Magnetização: Gerador 1 (650 rpm). ....	69
<b>Figura 5.9</b> – Curvas de Magnetização: Gerador 2 (1000 rpm). ....	70
<b>Figura 5.10</b> – Curvas de Magnetização: Gerador 3 (1500 rpm). ....	70
<b>Figura 5.11</b> – Indutâncias: Gerador 1 (650 rpm), Gerador 2 (1000 rpm) e Gerador 3 (1500 rpm). ....	71
<b>Figura 5.12</b> – Modelo Físico do Gerador 1 no FEMM. ....	72
<b>Figura 5.13</b> – Distribuição das Linhas de Campo Magnético para o Gerador 1 no FEMM. ..	72
<b>Figura 5.14</b> – Forças nos eixos x,y e z do Gerador 1 (650 rpm). ....	73
<b>Figura 5.15</b> – Forças nos eixos x,y e z do Gerador 2 (1000 rpm). ....	74
<b>Figura 5.16</b> – Forças nos eixos x,y e z do Gerador 3 (1500 rpm). ....	74
<b>Figura 5.17</b> – Representação por fase do GRV-C – Fonte: T. A. S. Barros, Propostas de Controles de Potência e Otimização do Desempenho do Gerador de Relutância Variável Aplicado em Geração Eólica Conectada à rede Elétrica de Baixa Tensão, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 2015 [5]. ....	75
<b>Figura 5.18</b> – Etapas para a obtenção de $I(\Phi, \theta)$ e $T(I, \theta)$ . ....	76
<b>Figura 5.19</b> – Conversor eletrônico de potência e o sistema de controle para acionamento do GRV-C. ....	77
<b>Figura 5.20</b> – Potência mecânica e potência nas cargas para o Gerador 1. ....	77
<b>Figura 5.21</b> – Potência mecânica e potência nas cargas para o Gerador 2. ....	77
<b>Figura 5.22</b> – Potência mecânica e potência nas cargas para o Gerador 3. ....	78
<b>Figura 5.23</b> – Tensão no barramento CC para os três GRVs-C projetados. ....	78

<b>Figura 5.24</b> – Correntes nas Fases A dos GRVs-C projetados. ....	79
<b>Figura 6.1</b> – Modelo do protótipo: (a) vista completa do protótipo; (b) vista superior da parte móvel.....	82
<b>Figura 6.2</b> – Vistas em perspectiva do protótipo com as dimensões: (a) estator; (b) rotor; (c) estator e rotor. ....	82
<b>Figura 6.3</b> – Curva de magnetização do aço-silício E 230. ....	83
<b>Figura 6.4</b> – Fotos do protótipo desenvolvido: (a) vista lateral; (b) perspectiva isométrica; (c) vista superior; (d) detalhes do entreferro. ....	84
<b>Figura 6.5</b> – Resultados simulados: curvas de magnetização do protótipo. ....	85
<b>Figura 6.6</b> – Resultados simulados: curvas de indutância do protótipo.....	86
<b>Figura 6.7</b> – Resultados Experimentais: Bancada.....	87
<b>Figura 6.8</b> – Fotos do protótipo desenvolvido: (a) detalhe mecanismo de posicionamento dos polos; (b) detalhe da trava mecânica.....	88
<b>Figura 6.9</b> – Resultados experimentais: Ensaio. ....	88
<b>Figura 6.10</b> – Resultados experimentais: Curva de Magnetização. ....	89
<b>Figura 6.11</b> – Resultados experimentais: Curva da Indutância.....	89
<b>Figura 6.12</b> – Comparação das Curvas de Magnetização: (a) experimental; (b) MEF-3D; (c) MEF-2D. ....	90
<b>Figura 6.13</b> – Comparação das Curvas de Indutância: (a) experimental; (b) MEF-3D; (c) MEF-2D.....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Configuração de máquinas com 3 fases. ....	42
Tabela 4.2 – Parâmetros iniciais do GRV-C: Gerador 1 (650 rpm), Gerador 2 (1000 rpm) e Gerador 3 (1500 rpm). ....	52
Tabela 4.3 – Valores máximos e mínimos do vetor $x$ : Gerador 1, 2 e 3. ....	56
Tabela 4.4 – Resultados da Otimização: Gerador 1. ....	60
Tabela 4.5 – Resultados da Otimização: Gerador 2. ....	60
Tabela 4.6 – Resultados da Otimização: Gerador 3. ....	60
Tabela 4.7 – Parâmetros finais do GRV-C: Gerador 1 (650 rpm), Gerador 2 (1000 rpm) e Gerador 3 (1500 rpm). ....	61
Tabela 5.1 – Características físicas das peças utilizadas. ....	66
Tabela 5.2 – Magnitude do Campo Magnético no Polo do Estator. ....	66
Tabela 5.3 – Resultados do processo de refinamento de malha – Gerador 1 – Posição Alinhada. ....	67
Tabela 5.4 – Resultados do processo de refinamento de malha – Gerador 1 – Posição Desalinhada. ....	68
Tabela 5.5 – Potência Estática Máxima: Gerador 1, 2 e 3. ....	69
Tabela 5.6 – Potência Elétrica e Tensão Induzida. ....	71
Tabela 5.7 – Comparação dos Resultados Estáticos: Indutância. ....	72
Tabela 5.8 – Comparação dos Resultados Estáticos: $P_{ele}$ e $E_{ind}$ . ....	73
Tabela 5.9 – Volume dos Núcleos Magnéticos. ....	73
Tabela 5.10 – Comparação dos Resultados: Potências e Rendimento. ....	79
Tabela 6.1 – Parâmetros do protótipo do GRV-C. ....	82
Tabela 6.2 – Parâmetros do protótipo do GRV-C. ....	83
Tabela 6.3 – Magnitude do Campo Magnético no Polo do Estator. ....	85
Tabela 6.4 – Comparação dos Resultados Estáticos. ....	91

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
C-SRG	Axial-Flux Switched Reluctance Generator with C Core
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FEEC	Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
FEMM	Finite Element Method Magnetics
FEM-2D	Two-dimensional Finite Element
FEM-3D	Three-dimensional Finite Element
GRV	Gerador de Relutância Variável
GRV-C	Gerador de Relutância Variável com núcleo do tipo C
LEPO	Laboratório de Eletrônica de Potência
MRV	Motor de Relutância Variável
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEF-2D	Método dos Elementos Finitos em Duas Dimensões
MEF-3D	Método dos Elementos Finitos em Três Dimensões
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
SRG	Switched Reluctance Generator
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
fem	Força Eletromotriz

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\beta_{es}$	Arco Polar do Estator
$\beta_{ro}$	Arco Polar do Rotor
$\delta_m$	Ângulo de Sobreposição entre as Curvas de Indutância
$\varepsilon$	Distância Angular entre Duas Curvas de Indutância de Fases Adjacentes
$\Phi$	Fluxo Magnético
$\varphi$	Funções de Bases Radiais
$a$	Coefficientes de Interpolação
$f_c$	Fator de Empacotamento dos Fios
$\theta_i$	Ângulo Mecânico de Condução de Corrente Elétrica
$\theta_{on}$	Ângulo de Disparo da Corrente Elétrica de Fase
$\theta_{off}$	Ângulo de Desligamento da Corrente Elétrica de Fase
$\lambda$	Fluxo Magnético Concatenado
$\lambda_a$	Fluxo Magnético Concatenado na Posição Alinhada
$\lambda_u$	Fluxo Magnético Concatenado na Posição Desalinhada
$\tau$	Torque Eletromagnético
$\omega_{rot}$	Velocidade do Rotor em Radianos por Segundos
$A$	Área do Polo do Estator
$A_s$	Carregamento Elétrico Específico
$B$	Densidade de Campo Magnético no Polo do Estator
$D$	Diâmetro Interno do Rotor
$E_{ind}$	Tensão Elétrica Induzida no Enrolamento de Fase
$E_{rel}$	Tensão Elétrica Induzida no Enrolamento de Fase Relativa
$F$	Força Tangencial
$I$	Corrente Média na Bobina do Estator
$I_{max}$	Máxima Corrente Elétrica no Enrolamento de Fase
$L$	Indutância
$L_a$	Indutância na Posição Alinhada
$L_u$	Indutância na Posição Desalinhada
$L_{a\_2D}$	Indutância Alinhada Calculada pelo MEF – 2D
$L_{a\_3D}$	Indutância Alinhada Calculada pelo MEF – 3D
$L_{u\_2D}$	Indutância Desalinhada Calculada pelo MEF – 2D
$L_{u\_3D}$	Indutância Desalinhada Calculada pelo MEF – 3D
$N_{es}$	Número de Polos do Estator

$N_{esp}$	Número de Espiras por Polo
$N_{ro}$	Número de Polos do Estator
$OF$	Função Multiobjetivo
$P$	Posição
$P_{ele}$	Potência Elétrica Total de Saída
$P_{max\_est}$	Potência Elétrica Estática Máxima
$P_{mec}$	Potência Mecânica
$P_{rel}$	Potência Elétrica de Saída Relativa
$R$	Resistência Total do Enrolamento de Fase
$R1$	Resistência de Carga 1
$R2$	Resistência de Carga 2
$R3$	Resistência de Carga 3
$V$	Tensão Elétrica nos Terminais de Fase
$V_e$	Potencial Elétrico
$V^*$	Potencial Elétrico
$W_m$	Trabalho por Ciclo
$Z$	Operador Diferencial
$erro_a$	Erro Relativo entre as Indutâncias Alinhadas Calculadas pelo MEF – 2D e MEF – 3D.
$erro_u$	Erro Relativo entre as Indutâncias Desalinhadas Calculadas pelo MEF – 2D e MEF – 3D.
$f$	Função de Força
$f_c$	Fator de Empacotamento dos Fios
$f_{enc}$	Fator de Enchimento de Ranhura
$f_{es}$	Frequência das Correntes Elétricas de Fase do Estator
$f_p$	Funções Objetivos
$p$	Número de Funções Objetivo ( $p$ inteiro)
$g_h$	Restrições
$h$	Número de Funções de Restrição ( $h$ inteiro)
$i$	Corrente Elétrica Instantânea no Enrolamento de Fase
$h_{es}$	Altura do Polo do Estator
$h_{ra}$	Altura da Ranhura
$h_{ro}$	Altura do Polo do Rotor
$k$	Constante de Estabilidade Mecânica do Sistema
$k_2$	Relação entre as indutâncias alinhada e desalinhada: $(1-L_u/L_a)$
$k_a$	Fator de Correção da Posição Alinhada



$k_u$	Fator de Correção da Posição Desalinhada
$k_e$	Fator de Eficiência
$k_d$	Ciclo de Operação do Gerador
$l_{bo}$	Largura da Bobina
$l_{ent}$	Comprimento do Entreferro
$l_{es}$	Largura do Polo do Estator
$l_{ra}$	Largura da Ranhura
$l_{ro}$	Largura do Polo do Rotor
$l_r$	Comprimento dos Polos
$m$	Número de Fases do Gerador
$m'$	Número de Fases que Conduzem Simultaneamente
$n'$	Número de Polos Ativos por Fase
$q$	Multiplicidade
$r_{int}$	Raio Externo do Rotor
$r_{out}$	Raio Interno do Rotor
$t$	Tempo
$\Delta t$	Tempo de Alinhamento entre os Polos do Estator e Rotor

## SUMÁRIO

<b>1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>	<b>20</b>
1.1 INTRODUÇÃO GERAL .....	20
1.2 OBJETIVOS .....	21
1.3 JUSTIFICATIVAS .....	22
1.4 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO .....	23
<b>2 ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>24</b>
2.1 GERADOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL .....	24
2.2 MOTORES DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL DE FLUXO MAGNÉTICO AXIAL .....	26
2.3 GERADORES DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL DE FLUXO MAGNÉTICO AXIAL .....	27
2.4 CONCLUSÃO .....	29
<b>3 GERADOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL DE FLUXO MAGNÉTICO AXIAL COM NÚCLEO DO TIPO C.....</b>	<b>30</b>
3.1 ESTRUTURA DO GRV-C E CARACTERÍSTICAS GERAIS .....	30
3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GRV-C.....	33
3.3 EQUAÇÕES DE SAÍDA: TENSÃO E POTÊNCIA ELÉTRICA .....	34
3.4 CONCLUSÃO .....	38
<b>4 PROJETO DO GRV-C.....</b>	<b>39</b>
4.1 ETAPAS DE PROJETO .....	39
4.2 GRV-C: PRÉ-PROJETO .....	39
<b>4.2.1 Determinação do número de fases .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.2 Número de polos .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.3 Comprimento do entreferro .....</b>	<b>43</b>
<b>4.2.4 Arcos polares.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2.5 Largura dos polos do estator e do rotor .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2.6 Raio interno do rotor .....</b>	<b>46</b>
<b>4.2.7 Altura dos polos .....</b>	<b>47</b>
<b>4.2.8 Comprimento dos polos .....</b>	<b>48</b>
<b>4.2.9 Dimensionamento da bobina de excitação .....</b>	<b>48</b>
4.3 DIMENSÕES INICIAIS DO GRVS-C .....	51
4.4 GRV-C: OTIMIZAÇÃO .....	53
<b>4.4.1 Otimização multiobjetivo .....</b>	<b>53</b>

<b>4.4.2 Dimensões finais do GRV-C</b> .....	<b>56</b>
4.5 CONCLUSÃO .....	61
<b>5 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO</b> .....	<b>62</b>
5.1 SOLUÇÃO DE PROBLEMAS USANDO O MEF .....	63
<b>5.1.1 Passos para a solução de problemas usando o MEF</b> .....	<b>63</b>
5.2 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO ESTÁTICA .....	65
5.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DINÂMICA .....	74
<b>5.3.1 Modelo do GRV-C baseado nas curvas de magnetização</b> .....	<b>75</b>
<b>5.3.2 Respostas Dinâmicas</b> .....	<b>76</b>
5.4 CONCLUSÃO .....	80
<b>6 VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DA METODOLOGIA PROPOSTA</b> .....	<b>81</b>
6.1 CARACTERÍSTICAS DO PROTÓTIPO .....	81
6.2 RESULTADOS ESTÁTICOS DE SIMULAÇÃO .....	85
6.3 RESULTADOS ESTÁTICOS EXPERIMENTAIS .....	86
6.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....	89
6.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS ESTÁTICOS .....	91
6.6 CONCLUSÃO .....	93
<b>7 CONCLUSÃO</b> .....	<b>94</b>
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	95
7.2 PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTA PESQUISA .....	95
<b>7.2.1 Artigos completos publicados em periódicos</b> .....	<b>95</b>
<b>7.2.2 Trabalhos publicados em anais de congressos</b> .....	<b>96</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>97</b>

---

# CAPÍTULO 1

---

## CONSIDERAÇÕES INICIAIS

### 1.1 INTRODUÇÃO GERAL

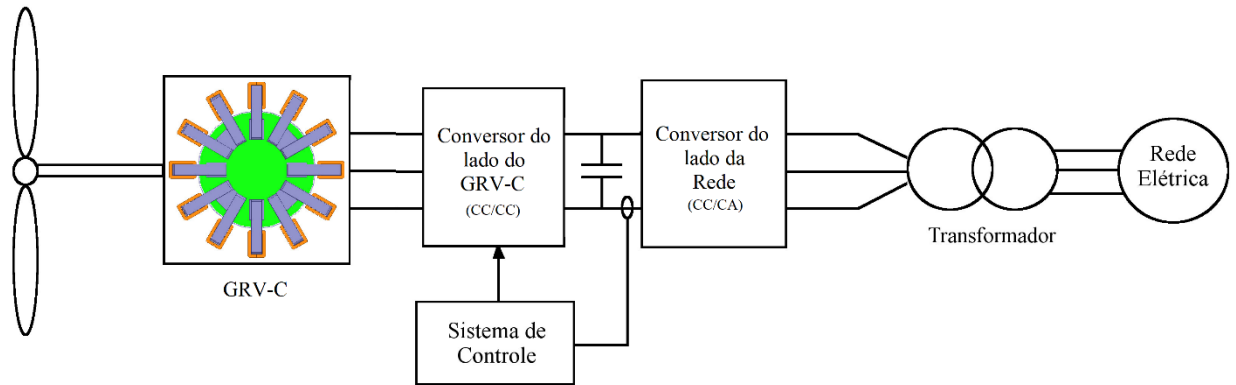
As máquinas de relutância variável (MRVs) estão, gradativamente, ganhando espaço em pesquisas aplicadas a sistemas que requerem alta densidade de potência, simplicidade de construção e baixo custo de fabricação e são uma ótima opção para aplicações na faixa de potência de pequeno porte ou até mesmo para aplicações industriais [1].

Nas últimas décadas, as MRVs têm sido alvo de estudos principalmente na área de veículos elétricos e de geração eólica. Isto ocorre não apenas pela sua simplicidade e baixo custo de fabricação, mas também pela ausência de elementos magnéticos permanentes e pela presença de bobinas apenas no estator [2], [3]. Desta forma, as máquinas de relutância possuem um rotor leve que, somada à sua natureza comutada, exige necessariamente a presença de um conversor eletrônico de potência para o seu funcionamento, tornando-as compatíveis e atrativas para aplicações em geração eólica [4].

Na área de geração eólica, o gerador de relutância variável (GRV) é uma alternativa competitiva sobre os tradicionais geradores elétricos utilizados (geradores de indução e geradores síncronos) em aplicações de pequena e média potências [5]. Ainda, de acordo com [6], [7] o GRV é tido como uma boa solução para microredes.

A principal desvantagem da utilização do GRV em aplicações industriais concentra-se na necessidade da utilização de sistemas de controle robustos para a operação em ampla faixa de velocidade e do uso de sensores de posição para a sua operação. Além disso, elas tendem a produzir nível de ruído sonoro, bem como oscilações elevadas de conjugado quando comparadas aos geradores de indução e aos síncronos [5].

A estrutura mais básica de acionamento de um GRV-C conectado à rede elétrica é apresentada na Figura 1.1. O sistema é composto por dois conversores estáticos em cascata e a geração elétrica é controlada por meio desses dois conversores. O conversor assimétrico do tipo meia-ponte (*half bridge*) controla a tensão no barramento de corrente contínua (CC) e o conversor conectado à rede elétrica de corrente alternada (CA), conversor CC-CA, transmite a potência elétrica para o barramento infinito de acordo com o perfil eólico disponível.



**Figura 1.1** – Diagrama do acionamento de um GRV-C em cascata para geração eólica

## 1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa é a de apresentar uma metodologia para projeto eletromagnético do gerador de relutância variável de fluxo magnético axial com núcleo do tipo C e de seu acionamento, bem como realizar análises da sua operação em modo autoexcitado voltados a sistemas de geração eólica.

Os objetivos específicos são:

- a) descrever uma metodologia do projeto eletromagnético para a obtenção das dimensões iniciais de um GRV-C;
- b) obter as dimensões de três núcleos magnéticos de GRV-C com as mesmas características de saída, mas com velocidades de operação diferentes para, por meio de simulações computacionais, obter o comportamento estático e dinâmico dos GRV-C, analisando os resultados de simulação e verificando se as definições exigidas no projeto são atendidas;
- c) a partir da análise computacional do comportamento estático e dinâmico dos três núcleos magnéticos de GRV-C, escolher um para a implementação;
- d) construir o protótipo de um núcleo C do gerador escolhido, obter as suas características magnéticas e elétricas estáticas e comparar os resultados experimentais com os obtidos por meio da simulação computacional.

### 1.3 JUSTIFICATIVAS

O consumo energético está intrinsecamente ligado com o nível de desenvolvimento de uma nação, tornando-o um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e da qualidade de vida de um país. Países ditos "ricos" e que compõem a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), entre eles Estados Unidos, França, Reino Unido e Alemanha, são os maiores consumidores de energia elétrica do mundo, produzindo juntos mais da metade da riqueza mundial.

O Brasil, sendo uma economia emergente, apresenta uma taxa crescente de consumo energético onde destaca-se o consumo de energia elétrica. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), estima-se que, até 2020, o consumo interno de eletricidade deverá crescer em torno de 4% ao ano, sendo necessário o aumento da produção [8]. O Brasil é um dos países de maior potencial hidroelétrico do mundo. Cerca de 67% da produção de energia elétrica brasileira é proveniente da geração hidráulica [9]. Por outro lado, menos de 40% do potencial hidroelétrico brasileiro foi explorado, que corresponde a um valor bem menor do que a observada em países industrializados segundo dados do Ministério e Minas de Energia [10]. Grande parte do potencial hidráulico brasileiro concentra-se na região norte do país, dificultando a exploração deste potencial devido às particularidades ambientais e sociais inerentes a região [11]. Desta forma, é imprescindível complementar a fonte base de geração elétrica principal, que no caso do brasileiro é a hidráulica, com outras formas de geração de eletricidades.

A energia eólica é uma forma complementar de utilização bastante promissora. O Brasil possui uma grande disponibilidade desse tipo de energia, com estimativas de geração de energia elétrica na ordem de 300 mil MW usando torres de 100 m de altura [12]. Essa geração representa em torno de vinte vezes do que pode ser gerado pela usina elétrica de Itaipu. Em período de poucos ventos, a geração elétrica pode não ser suficiente para suprir a demanda, o que torna a geração eólica intermitente. Contudo, em períodos de fortes ventos, que normalmente coincidem com a época da estiagem, sua utilização é bastante viável, permitindo a estocagem da água.

O desenvolvimento desta pesquisa se justifica pela necessidade da inclusão de sistemas de geração de energia elétrica complementares e eficientes na matriz energética brasileira que sejam competitivos com as atuais tecnologias. Embora muitas publicações abordem sistemas que utilizam a máquina de relutância variável para a geração eólica, pouquíssimos são os sistemas que utilizam a configuração de fluxo magnético axial, em especial, operando de forma autoexcitada. Assim, há uma necessidade real do desenvolvimento de estudos desse tipo de

gerador, sejam eles relacionados ao seu projeto ou relacionados aos sistemas de acionamento e de controle.

#### 1.4 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

Este trabalho apresenta várias contribuições para o uso do GRV-C na geração eólica. Inicialmente, faz-se uma descrição compreensiva do projeto eletromagnético de geradores de relutância variável de fluxo magnético axial com núcleo do tipo C, bem como seu sistema de acionamento em operação autoexcitada. O GRV-C é um tipo de gerador de relutância variável não convencional e a maioria das pesquisas mostradas na literatura focam nas estruturas convencionais (estruturas regulares e de fluxo radial), desta forma, esse trabalho complementa a literatura apresentando uma investigação e considerações sobre o dimensionamento elétrico e magnético do GRV-C.

Análise realizada nesta pesquisa é distinta das encontradas na literatura pois apresenta estudos comparativos entre projetos de três geradores desenvolvidos a partir da metodologia proposta. As simulações estáticas e dinâmicas foram realizadas por meio de dois modelos matemáticos diferentes: um que usa do método dos elementos finitos e o outro baseado nas curvas de magnetização do gerador, que representam bem as não linearidades magnéticas do sistema.

Seguindo a metodologia de projeto proposta, foram obtidas as dimensões de um quarto gerador (cujo material magnético de fabricação do núcleo é diferente do material dos GRVs-C projetados para a realização dos estudos comparativos de simulação) e o protótipo de um dos núcleos C foi construído a fim determinar os resultados estáticos experimentais. Os resultados de simulação e experimentais permitem concluir que a metodologia de projeto de projeto proposta para o GRV-C é viável e eficiente.

---

## CAPÍTULO 2

---

### ESTADO DA ARTE

Atualmente, os geradores de relutância variável (GRV) têm sido usados em aplicações de geração eólica devido à sua simplicidade de construção, baixo custo de fabricação e de manutenção e alta densidade de potência. Os GRVs têm sido apontados como uma alternativa competitiva e promissoras para aplicações de pequena e média potência em relação às máquinas elétricas tradicionalmente utilizadas na geração eólica (geradores de indução e síncronos). Isso se deve, principalmente, às suas características de funcionamento que permitem a operação em uma ampla faixa de velocidades com alto rendimento [5].

Entretanto, a maioria das pesquisas se concentram na estrutura tradicional do gerador de relutância variável de fluxo radial [13], [14], [15], [16], [17], [18]. Poucos são os estudos dedicados ao gerador de relutância de fluxo magnético axial para geração eólica [19], [20], [21].

Entre as novas topologias estudadas, destacam-se os geradores de relutância de fluxo magnético axial com núcleo do tipo C. Os GRVs-C possuem, como principal característica, um estator modular formado por vários núcleos em formato de C independentes entre si. Semelhantes aos outros tipos de sistemas de conversão eletromecânica de energia, essas máquinas podem operar tanto em modo gerador como em modo motor.

O presente capítulo aborda os principais trabalhos desenvolvidos sobre os geradores de relutância variável convencionais, bem como apresenta uma revisão bibliográfica sobre máquinas de relutância de fluxo magnético axial com núcleo do tipo C.

#### 2.1 GERADOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL

Um dos primeiros artigos que trata dos princípios básicos de funcionamento das máquinas de relutância variável de dupla saliência foi publicado na década de oitenta pelos pesquisadores Peter J. Lawrenson, J.M. Stephenson e P.T. Blenkinsop da Universidade de Leeds [22]. Esse trabalho foi base para muitas pesquisas subsequentes. Nele são descritos, além do comportamento de motores de relutância variável em regime permanente, as principais características de projeto e algumas considerações para a escolha das dimensões físicas do núcleo magnético e dos enrolamentos de fases. Nos anos seguintes, várias pesquisas focaram seus objetivos



no projeto e implementação de motores de relutância variável aplicados a diversas áreas da engenharia tais como: [23], [24], [25], e [26].

As primeiras pesquisas relevantes sobre dos geradores de relutância variável surgiram já no final da década de 80. A referência [27] apresenta um estudo comparativo entre geradores de relutância variável (GRV) e geradores de indução aplicados a sistemas eólicos. Os resultados da pesquisa mostram que o GRV pode ser 6% mais eficiente e até 13% mais barato quando comparados aos geradores elétricos de indução aplicados em sistemas eólicos com níveis acima de 50kW. Já a referência [28] realiza uma análise de viabilidade técnica da utilização de ímãs permanentes em GRVs com objetivo de auxiliar no processo de excitação. Os resultados da pesquisa mostram que o uso de magnetos permanentes reduz o comprimento do núcleo do gerador elétrico.

Conforme citado na introdução deste trabalho, um dos principais obstáculos que limita a utilização de geradores de relutância variável são as oscilações do conjugado eletromagnético devido às saliências do circuito magnético. Desta forma, pesquisas recentes propõem, desde a utilização de novas técnicas de controle [29], [30], [31] como a alteração das dimensões do núcleo magnético ou das especificações dos enrolamentos de fase que possam auxiliar na minimização das oscilações no conjugado [32]. Além da oscilação no conjugado eletromagnético, esforços para a redução de vibrações e de ruídos acústicos produzidos por esse tipo de gerador vem sendo alvo de pesquisas nos últimos anos [33], [34], [35].

Outra dificuldade ocorre devido à carência de trabalhos que apresentem uma metodologia de projeto clara dos geradores de relutância variável ou de modelos matemáticos ou dinâmicos que considerem suas características não-lineares. Os GRVs possuem característica de fluxo magnético em função da corrente elétrica altamente não-linear em que os seus valores se alteram com a posição relativa do rotor. Desta forma, utilizar modelos ou metodologias de projeto que não adicionam a saturação do material magnético do núcleo provocada pela corrente elétrica do enrolamento do estator (principalmente na zona de alinhamento dos polos) implica na inclusão de erros nos resultados obtidos.

Não existe uma metodologia padrão para o projeto de geradores de relutância variável. Os trabalhos existentes, relacionados ao projeto do GRV, baseiam-se ou na utilização de modelos aproximados que impõem uma operação ideal do gerador ou integram nos procedimentos de projeto iterações computacionais que visam a inclusão das características não-lineares desses geradores conforme mostrados nas pesquisas [36], [37], [38].

A referência [39] apresenta o projeto de um gerador de relutância variável aplicado a sistemas de geração eólica de pequeno porte. Nesse estudo, foi utilizada uma técnica analítica

para a obtenção dos parâmetros do gerador. Por meio de um processo de otimização, as dimensões físicas de um projeto inicial do GRV foram ajustadas (utilizando o método de Kriging e algoritmos genéticos) e um estudo comparativo entre o projeto inicial e o final foi realizado. Os resultados mostram que houve uma melhora significativa no projeto otimizado em relação à eficiência e à densidade de potência do gerador. O volume do núcleo magnético do projeto otimizado foi reduzido, resultando num melhor aproveitamento do material magnético. Observa-se que, nessa pesquisa, os autores utilizaram o MEF-2D para a determinação dos resultados de simulação. Desta forma, parte dos caminhos de fluxo magnético nas extremidades dos polos foram desconsiderados, gerando erros de simulação consideráveis quando comparados aos resultados experimentais. Contudo, o MEF-2D foi utilizado apenas na comparação entre as dimensões do projeto inicial e do projeto otimizado. Assim, o comportamento dos resultados de simulação apresentou a mesma tendência de comportamento dos resultados experimentais.

Outros trabalhos que abordam considerações ou inovações no projeto do GRV são mostrados em [16], [40], [41]. A referência [41], por exemplo, propõe modificação na largura dos polos de GRVs do tipo 6x4 e 6x6 a fim de aumentar a saturação magnética durante a etapa de excitação do gerador. De acordo com os autores, a geometria modificada apresentou, em ambos os casos, um aumento no rendimento de no mínimo 5% quando comparada com a geometria padrão (ou seja, não modificada).

## 2.2 MOTORES DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL DE FLUXO MAGNÉTICO AXIAL

A referência [42] apresenta uma visão geral do projeto de um motor de relutância de fluxo magnético axial com estator em forma de C e do rotor em forma de disco. No trabalho, foi desenvolvido um equacionamento que busca similaridades com as metodologias de projeto adotadas em motores de relutância de fluxo radial. Embora trate de uma visão geral do projeto de motores de relutância de fluxo magnético axial, o trabalho também aborda a influência da largura dos arcos polares sobre a eficiência desse tipo de motor.

Outras duas topologias de motores de relutância variável de fluxo magnético axial são abordadas em [43] e [44]. Ambos trabalhos adotam estatores com núcleo do tipo C e rotores em forma de blocos retangulares fixados a uma estrutura de baixa inércia.

A referência [43] não aborda diretamente o projeto do motor, contudo apresenta uma descrição detalhada de um motor de relutância do tipo C, bem como sua expansão com módulos de rotores em cascata. Na análise, os autores utilizando um modelo simplificado do núcleo

magnético do motor com o uso do método dos elementos finitos em duas dimensões e realizam a comparação com um motor de relutância variável tradicional (de fluxo magnético radial).

A referência [44] apresenta uma proposta de correção na geometria dos polos para a redução do efeito de borda em motores de relutância axial com núcleo do tipo C aplicados a veículos elétricos. Foi realizada uma análise do projeto e detalhada a metodologia para a obtenção da equação da potência de saída desenvolvida. Por meio de uma equação analítica, são calculadas as indutâncias nas posições alinhada e desalinhada do motor. Um protótipo foi construído e foram realizados testes comparativos entre os resultados estáticos obtidos experimentalmente e os obtidos por meio do método dos elementos finitos em duas e três dimensões. Embora essa pesquisa trate do projeto de motores de relutância, são detalhadas apenas a obtenção de alguns parâmetros construtivos. Em uma continuação, os mesmos autores apresentam em [45] investigações sobre o mesmo protótipo desenvolvido, com o objetivo de reduzir a dispersão de fluxo magnético nos polos do motor. A pesquisa analisou as causas da baixa relação de indutância em um núcleo C (causadas pela dispersão de fluxo) e propôs ações com objetivo de melhorar essa relação tais como: modificação da configuração da bobina do núcleo; utilização de um seguimento de aço com grãos orientados na fabricação do núcleo magnético; utilização de uma blindagem eletromagnética com o uso de ímãs permanentes.

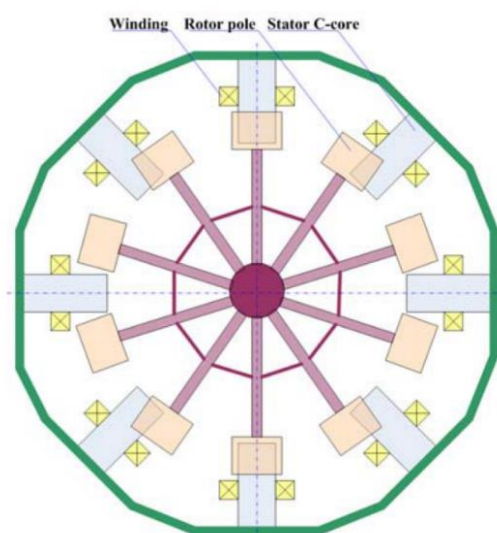
Outra pesquisa sobre uma estrutura similar a esse tipo de motor foi apresentada em [46] para aplicação em veículos elétricos. Apesar de se tratar de um motor de relutância variável com núcleo do tipo C a estrutura é modificada, fazendo com que a distribuição de fluxo magnético no motor seja radial.

### 2.3 GERADORES DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL DE FLUXO MAGNÉTICO AXIAL

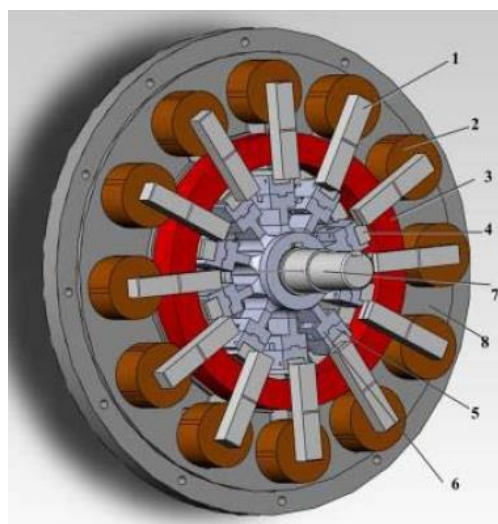
Estudos do GRV-C sobre aplicações eólicas foram realizados em [19], [20] e [21]. A referência [19] apresenta o projeto de um conversor assimétrico tipo meia ponte (*Asymmetric Half Bridge*) para o GRV-C e propõe um método de controle de potência ajustado para sistemas de geração eólica.

Em [20] são descritas as etapas de funcionamento do GRV-C, mostrado na Figura 2.1, e apresentados os modelos de circuitos magnéticos equivalentes para as posições alinhadas e desalinhadas, semelhante ao desenvolvido por [47] em motores de relutância de fluxo radial. Embora [20] aborde algumas considerações de projeto, não são detalhados os procedimentos para o cálculo das dimensões da máquina.

O processo de magnetização de um gerador de relutância axial com núcleo do tipo C da Figura 2.2 foi analisado em [21]. A alta indutância nos enrolamentos dos geradores de relutância evita que a magnetização seja estabelecida rapidamente podendo limitar a potência elétrica de saída gerada. No estudo, foi proposta a utilização de um enrolamento auxiliar a fim de permitir que a corrente elétrica durante o período de magnetização se estabeleça rapidamente.



**Figura 2.1** – Configuração do gerador de relutância variável do tipo C – Fonte: X. D. Xue, K. W. E. Cheng, Y. J. Bao e J. Leung, “Design Consideration of C-core Switched Reluctance Generators for Wind Energy,” em in Proc. of Power Electronics Systems and Applications, Hong Kong, 2011 [20].



**Figura 2.2** – Construção de um enrolamento auxiliar em um GRV-C – Fonte: X. Liu, K. Park e Z. Chen, “A Novel Excitation Assistance Switched Reluctance Wind Power Generator,” IEEE Transaction on Magnetics, vol. 50, nº 11, 2014 [21].<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 1: núcleo magnético do estator, 2: bobina de fase, 3: bobina auxiliar de excitação, 4: núcleo magnético do rotor, 5: base do núcleo do rotor, 6: suporte de sustentação do rotor, 7: eixo 8: carcaça do estator.

## 2.4 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foi apresentada uma a revisão bibliográfica com o objetivo de contextualizar os principais tópicos estudados sobre os geradores de relutância variável, tanto na configuração tradicional (de fluxo magnético radial) quanto na configuração de fluxo magnético axial (geradores com núcleo do tipo C). Foram abordados os principais trabalhos desenvolvidos no âmbito nacional e internacional acerca do projeto de geradores de relutância variável que serviram como base para a realização dessa pesquisa. O próximo capítulo apresenta os aspectos construtivos do GRV-C e as suas características gerais de funcionamento.

---

## CAPÍTULO 3

---

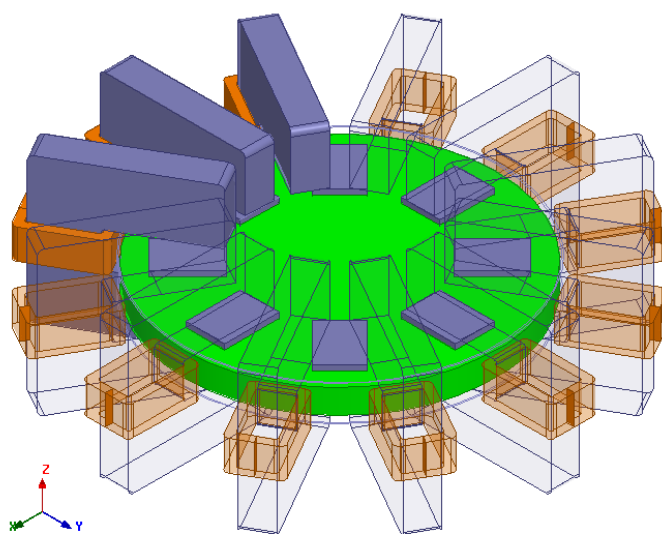
### GERADOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL DE FLUXO MAGNÉTICO AXIAL COM NÚCLEO DO TIPO C

O GRV-C possui características construtivas que diferem das estruturas tradicionais de fluxo radial. Contudo, da mesma forma que os geradores de relutância convencionais, ele apresenta um comportamento não linear durante a sua operação, fazendo com que o fluxo magnético varie com a posição relativa dos polos do gerador.

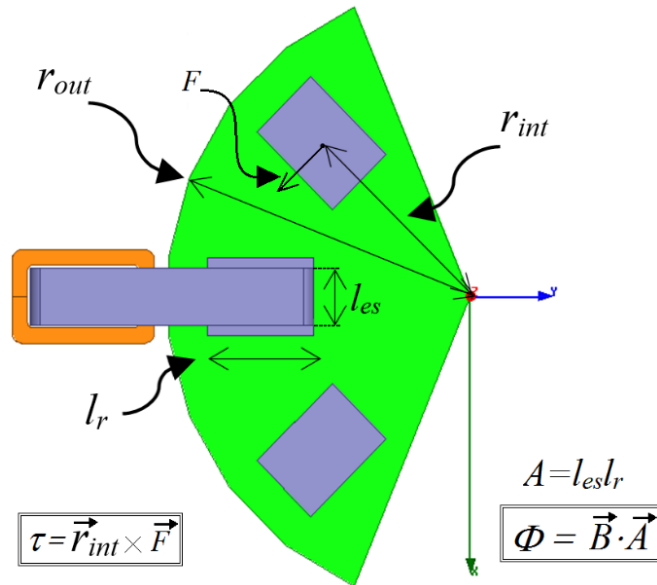
Este capítulo tem como objetivo apresentar os aspectos construtivos do GRV-C e suas características gerais. Além disso, descreve-se o seu princípio de funcionamento e detalha-se como são obtidas as equações de tensão e potência elétrica utilizadas como ponto de partida no projeto do GRV-C a ser mostrado no Capítulo 4.

#### 3.1 ESTRUTURA DO GRV-C E CARACTERÍSTICAS GERAIS

O GRV-C possui uma alta densidade de potência, simplicidade de construção, manutenção e reparo. Sua estrutura com núcleos magnéticos modulares e independentes, conforme a Figura 3.1 e a Figura 3.2, permite que cada núcleo C possa ser transportado para manutenção e enrolado separadamente dos demais.



**Figura 3.1** - GRV-C: vista parcial em perspectiva.



**Figura 3.2** - GRV-C: vista parcial superior.

O GRV-C une em sua estrutura a tecnologia da máquina elétrica de relutância rotativa e da linear de fluxo magnético transversal (em que a última possui caminhos de fluxo magnético perpendiculares à direção do movimento do linor).

Em relação aos aspectos construtivos, essa topologia possibilita a existência de núcleos magnéticos C enrolados sobressalentes para instalação imediata em caso de enrolamentos danificados ou fadiga de materiais. O rotor é formado por blocos de material magnético presos a uma estrutura em formato de disco (de baixa permeabilidade magnética) com finalidade apenas de sustentação.

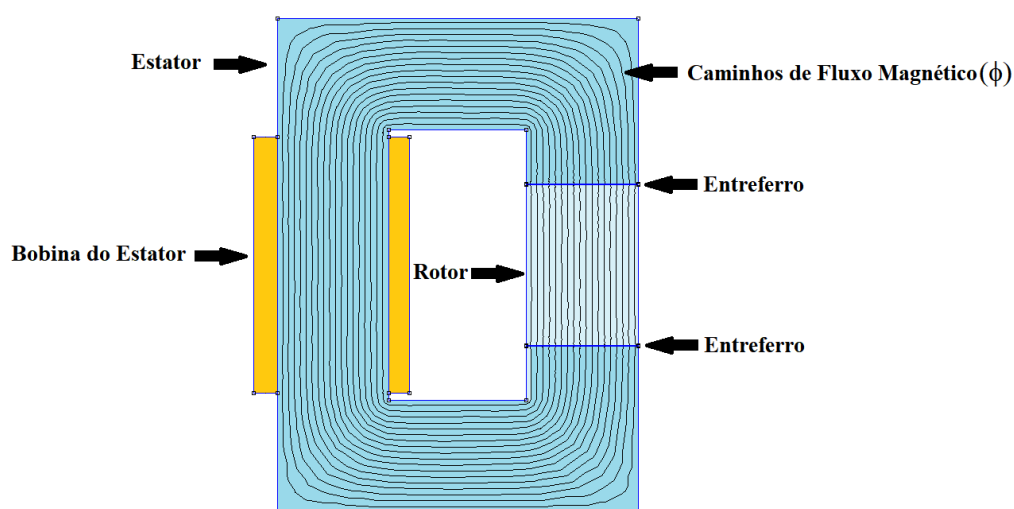
Em relação aos aspectos dos projetos elétrico e magnético, cita-se como vantagens mais relevantes do GRV-C as seguintes: a) núcleos C eletricamente e magneticamente isolados, b) possui caminhos de fluxo magnético curtos, unidirecionais e independentes, c) baixas perdas por histerese magnética.

As perdas por histerese em máquinas de relutância estão relacionadas com a frequência do fluxo reverso em partes do núcleo do estator [47], [48]. Contudo, o GRV-C não altera a direção do fluxo magnético durante a sua operação, ou seja, não existe a formação de fluxo reverso nas partes internas no estator. Assim as perdas por histerese do GRV-C são menores quando comparadas com as estruturas tradicionais de geradores de relutância variável.

Quanto às características de projetos mecânico e elétricos, o GRV-C apresenta as seguintes vantagens: a) amplo espaço para acomodação das bobinas; b) rotor com baixa inércia, já que, respeitando as restrições de origens mecânicas, o disco de sustentação pode ser construído com material de menor densidade de massa do que os blocos de material magnético; c)

possibilidade de reduzir ainda mais a inércia inserindo aberturas no disco, sem exceder os limites de resistência mecânica do material; d) permite o aumento do comprimento do raio do rotor, conseqüentemente do torque eletromagnético, sem alterar o caminho de fluxo magnético.

O torque eletromagnético do GRV-C pode ser obtido por meio do produto vetorial entre a força tangencial ( $F$ ) e o raio interno ( $r_{int}$ ) – Figura 3.2. Observa-se na Figura 3.3 que os caminhos de fluxos magnéticos no GRV-C são independentes do raio interno do rotor, assim, é possível elevar o torque eletromagnético aumentando o comprimento do raio interno, com a vantagem de não interferir no circuito magnético do gerador.



**Figura 3.3** – Caminhos de fluxo magnético no núcleo C.

No que diz respeito à dissipação térmica e, conseqüentemente, a geração de calor, o GRV-C apresenta como principais vantagens: a) bom fator de dissipação térmica devido a estrutura fina, em forma de panqueca; b) as bobinas são montadas na parte externa do núcleo magnético, facilitando tanto a passagem de ar como a troca de calor com o ambiente; c) a estrutura que permite adotar sistemas de arrefecimento em torno da carcaça do gerador.

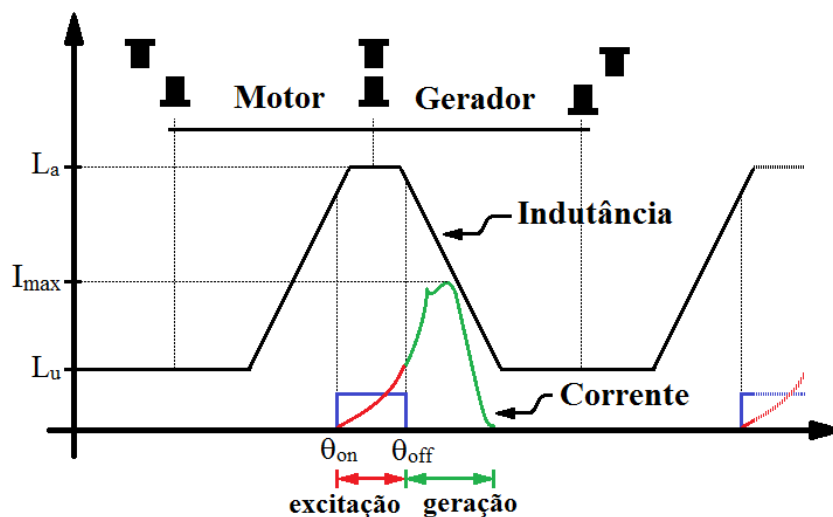
O GRV-C tende a produzir baixo nível de ruído acústico, pois a força de relutância desenvolvida no rotor possui uma parcela muito pequena de componente radial em relação à tangencial [48]. A principal fonte de produção de ruído acústico em um motor de relutância variável é a componente de força radial de acordo com [49]. Este fato também vale para o gerador elétrico de relutância.



### 3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GRV-C

O princípio de funcionamento do GRV-C baseia-se na variação da relutância do circuito magnético durante o movimento do rotor. Devido à dupla saliência dos polos do gerador, o deslocamento do rotor em torno do eixo z, Figura 3.1, produz variação da relutância entre os polos da máquina e, conseqüentemente, no fluxo do circuito magnético, originando uma força contra eletromotriz nos terminais do enrolamento.

O comportamento ideal da curva de indutância do GRV-C é ilustrado na Figura 3.4 [50]. A indutância mútua entre o estator e o rotor é função da posição do rotor. Durante o processo de alinhamento dos polos, a indutância cresce e chega ao seu valor máximo,  $L_a$ , na posição de completo alinhamento (ou próxima a essa posição). No desalinhamento dos polos, a indutância decresce chegando ao seu valor mínimo na posição de total desalinhamento,  $L_u$ .



**Figura 3.4** – Comportamento da indutância e operação do GRV-C no modo gerador.

Na Figura 3.4, observam-se também as etapas de operação do GRV-C que são a excitação e a geração. Na etapa de excitação, o núcleo magnético do estator é magnetizado com a aplicação de uma corrente no enrolamento de fase, desta forma, uma a energia magnética é armazenada no núcleo C do GRV-C. Durante esse período, a carga é alimentada por meio do capacitor do elo CC como mostra a Figura 3.5.

A excitação inicial necessária para carregar o capacitor do elo CC é, em geral, fornecida por uma fonte externa. Após essa a excitação inicial, o próprio capacitor do elo CC passa a excitar os enrolamentos de fase durante a etapa de excitação do gerador, dispensando o uso da

fonte externa. Observa-se que o capacitor do elo CC também tem a função de estabilizar a tensão entregue à carga [5].

Já na etapa de geração, o conjugado referente à energia magnética armazenada na etapa anterior é somado ao conjugado mecânico no eixo da máquina, proveniente da máquina primária, e transferida para a carga [51], carregando também o capacitor do elo CC, conforme mostra o circuito da Figura 3.6.

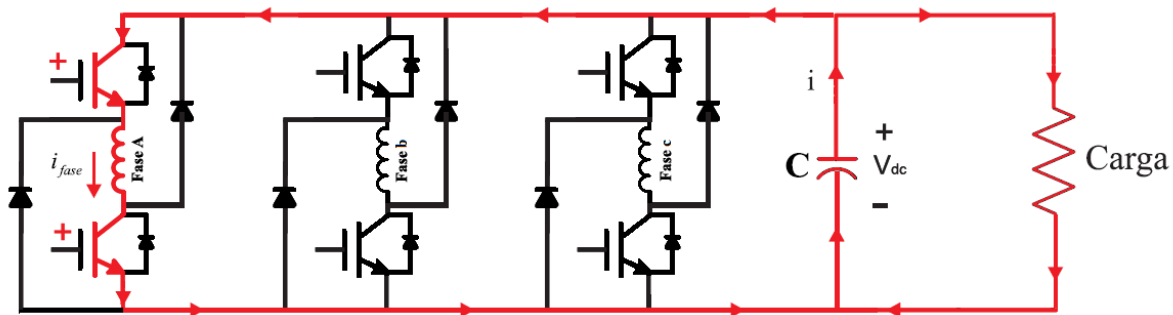


Figura 3.5 – Princípio de funcionamento: etapa de excitação.

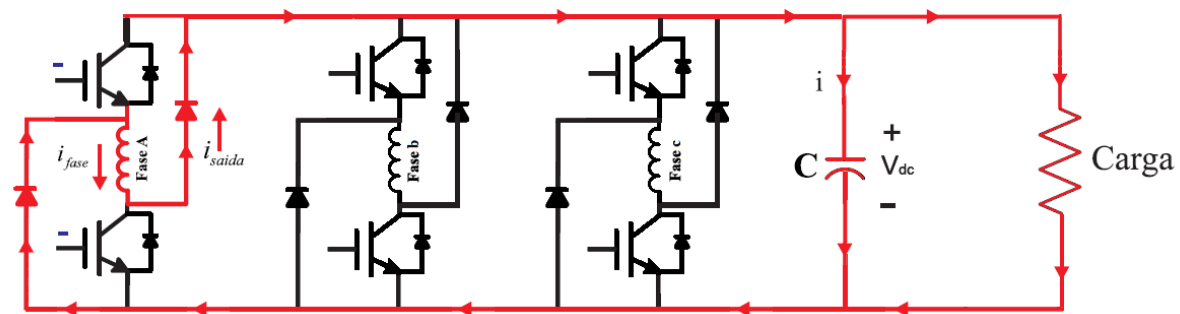


Figura 3.6 – Princípio de funcionamento: etapa de geração.

### 3.3 EQUAÇÕES DE SAÍDA: TENSÃO E POTÊNCIA ELÉTRICA

O circuito elétrico de uma fase do GRV-C é ilustrado na Figura 3.7. A equação desse circuito elétrico é mostrada em (3.1):

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

onde  $v$  é a tensão instantânea no terminal de fase,  $R$  é a resistência elétrica total do enrolamento de fase,  $i$  é a corrente elétrica instantânea do enrolamento de fase,  $\lambda$  é o fluxo magnético concatenado com o enrolamento de fase,  $\theta$  é o ângulo de posição do rotor,  $t$  é o tempo e  $E_{ind}$  é a força eletromotriz induzida (fem) no enrolamento de fase do gerador.

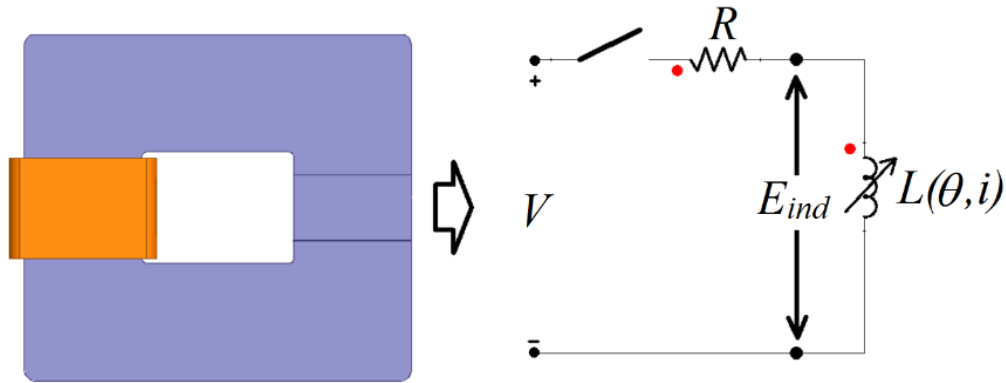


Figura 3.7 – Representação por fase do GRV-C.

Desconsiderando a resistência elétrica  $R$ , a tensão no terminal de fase torna-se igual à tensão induzida no enrolamento de fase do gerador ( $E_{ind}$ ). Sabendo que o fluxo concatenado com o enrolamento de fase é dado por  $\lambda = L(\theta, i) \cdot i$ . Supondo que a corrente de fase seja constante durante o período de condução e que a taxa de variação de crescimento (ou decrescimento) do fluxo magnético ocorra de forma linear, a tensão média nos terminais de fase pode ser aproximada por (3.2):

$$V \cong \frac{(\lambda_a - \lambda_u)}{\Delta t} \cong I \frac{(L_a - L_u)}{\Delta t} \quad (3.2)$$

sendo:  $\lambda_a$  o fluxo magnético concatenado na posição alinhada,  $\lambda_u$  o fluxo magnético concatenado na posição desalinhada e  $I$  a corrente média na bobina do estator.

A variável  $\Delta t$  é o tempo que os polos do gerador levam para sair da posição de máxima indutância para a de mínima indutância. Em outras palavras, é o tempo que os polos do rotor gastam para percorrer o comprimento do polo do estator. Desta forma, o tempo pode ser representado em função do arco polar percorrido pelo estator ( $\beta_{es}$ ) e da velocidade do rotor em rad/s ( $\omega_{rot}$ ) de acordo com (3.3):

$$\Delta t = \frac{\beta_{es}}{\omega_{rot}} \quad (3.3)$$

Substituindo (3.3) em (3.2) e colocando a indutância  $L_a$  em evidência, obtém-se (3.4):

$$V = I L_a \left( 1 - \frac{L_u}{L_a} \right) \left( \frac{\omega_{rot}}{\beta_{es}} \right) \quad (3.4)$$

A potência elétrica de saída desenvolvida pelo GRV-C é calculada por meio da equação (3.5) de acordo com a referência [44]:

$$P_{ele} = k_e k_d m' V I \quad (3.5)$$

sendo:  $k_e$  o fator de eficiência,  $k_d$  o ciclo de operação e  $m'$  o número de fases que conduzem simultaneamente.

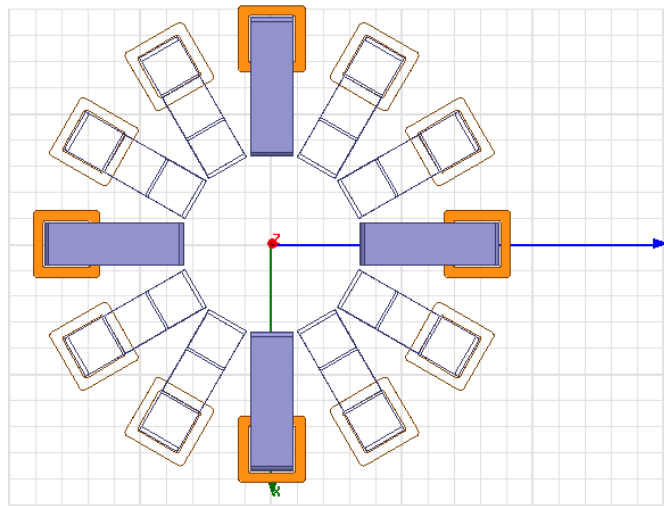
O fator de eficiência  $k_e$  está relacionado à conversão eletromecânica de energia, sendo adotado um valor entre 0,8 a 0,93 [47].

A variável  $k_d$  representa o ciclo de operação do gerador e é definida por (3.6):

$$k_d = \frac{\theta_i m N_{ro}}{2\pi} \quad (3.6)$$

sendo:  $\theta_i$  o ângulo mecânico de condução de corrente,  $m$  o número total de fases do GRV-C e  $N_{ro}$  o número de polos do rotor.

É importante ressaltar que o GRV-C pode possuir mais de um polo ativo por enrolamento de fase. A Figura 3.8 ilustra essa característica para um GRV-C de 3 fases com 12 polos no estator e 8 polos no rotor. Durante as etapas de excitação e geração, cada enrolamento de fase possui 4 polos ativos.



**Figura 3.8** – Representação por fase do GRV-C.

Desta forma, foi incluída a variável  $n'$  na equação (3.5) com o objetivo de representar a quantidade de polos ativo durante o chaveamento de fase conforme mostra (3.7):

$$P_{ele} = k_e k_d n' m' V I \quad (3.7)$$

onde  $n'$  é número de polos ativos por fase.

Substituindo (3.4) em (3.7) obtém-se (3.8):

$$P_{ele} = k_e k_d n' m' I^2 \left( \frac{\omega_{rot}}{\beta_{es}} \right) L_a \left( 1 - \frac{L_u}{L_a} \right) \quad (3.8)$$

Define-se carregamento elétrico específico ( $A_s$ ) com sendo o total de número de condutores (ou o total de ampere-espiras) distribuídos ao longo da periferia do entreferro. Para um gerador elétrico de relutância variável tradicional (ou seja, de fluxo radial),  $A_s$  é representado pela equação (3.9). O carregamento elétrico específico encontra-se em uma faixa de 20000 a

90000 ampere-espiras/metros e não deve exceder os limites estabelecidos pelo sistema de refrigeração do gerador elétrico de acordo com [42].

$$A_s = \frac{(2 N_{esp} I m')}{(\pi D)} \quad (3.9)$$

onde  $N_{esp}$  é o número de espiras e  $D$  o diâmetro interno do rotor ( $D = 2r_{int}$ ).

Novamente, para que a equação (3.9) esteja adequada para o GRV-C, é necessário incluir a quantidade de números de polos ativos durante o funcionamento como é mostrado em [44] e [52] resultando na equação (3.10):

$$A_s = \frac{(2 N_{esp} I m' n')}{(\pi D)}. \quad (3.10)$$

O fluxo magnético concatenado com o enrolamento ( $\lambda_a$ ) na posição alinhada pode ser também representado em função do número de espiras por polo ( $N_{esp}$ ) e do fluxo magnético do circuito ( $\phi$ ) de acordo com (3.11):

$$\lambda_a = L_a I = N_{esp} \phi \quad (3.11)$$

Além disso, desconsiderando os efeitos da dispersão e espraiamento magnético, o fluxo  $\phi$  pode ser dado pelo produto escalar entre o vetor densidade de campo magnético no entreferro ( $\vec{B}$ ) e o vetor área do polo do estator ( $\vec{A}$ ) conforme (3.12):

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{A} = B A \cos(\gamma), \quad (3.12)$$

onde  $\gamma$  é o ângulo entre os vetores  $\vec{B}$  e  $\vec{A}$ . Sabendo o vetor de campo magnético no entreferro do estator tem a mesma direção do vetor normal a área do polo do estator, o ângulo  $\gamma$  é, então, igual a zero.

Observa-se na Figura 3.2 que a área do polo do estator é igual ao produto entre o comprimento do polo do estator ( $l_r$ ) e a largura do polo ( $l_{es}$ ). Definindo a variável  $l_{es}$  em função do arco polar do estator e do raio interno do rotor ( $r_{int}$ ), o módulo do vetor área  $A$  é, então, descrito por a (3.13):

$$A = l_r \beta_{es} r_{int} \quad (3.13)$$

Substituindo (3.12) e (3.13) em (3.11) obtém-se (3.14):

$$L_a = \frac{N_{esp} B l_r \beta_{es} r_{int}}{I} \quad (3.14)$$

Substituindo (3.14) em (3.8) e reorganizando a equação, obtém-se (3.15):

$$P_{ele} = \pi k_e k_d \omega_{rot} \left( \frac{2 m' n' N_{esp} I}{(2\pi r_{int})} \right) B l_r r_{int}^2 \left( 1 - \frac{L_u}{L_a} \right) \quad (3.15)$$

Finalmente, substituindo (3.10) em (3.15), obtém-se a potência elétrica de saída total desenvolvida pelo GRV-C que é calculada por meio de (3.16):

$$P_{ele} = \pi k_e k_d \omega_{rot} A_s B l_r r_{int}^2 \left(1 - \frac{L_u}{L_a}\right) \quad (3.16)$$

A equação da potência elétrica de saída relaciona velocidade de rotação, carregamento elétrico, carregamento magnético, indutância dos enrolamentos e parâmetros construtivos do gerador (raio interno e comprimento dos polos). Ela será o ponto de partida do projeto do GRV-C.

### 3.4 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foram descritos os aspectos e conceitos gerais do gerador de relutância variável com núcleo do tipo C. Foi apresentada a estrutura básica e as características construtivas do GRV-C, bem como um detalhamento do seu princípio de funcionamento. Por final, apresentou-se as equações de tensão e potência elétrica que saída que serão utilizadas como ponto de partida no projeto do GRV-C. O próximo capítulo aborda a metodologia de projeto proposta para a obtenção das dimensões desses geradores elétricos.

---

## CAPÍTULO 4

---

### PROJETO DO GRV-C

Conforme citado no Capítulo 2, não há uma metodologia de projeto padrão para geradores de relutância variável. Os principais trabalhos utilizam modelos aproximados que impõem uma operação ideal ao gerador ou integram iterações computacionais na estratégia de projeto com o objetivo de incluir as características não lineares desse tipo de gerador.

Este capítulo apresenta uma proposta de metodologia para o projeto de geradores de relutância variável com núcleo magnético do tipo C. Para permitir avaliar os procedimentos adotados na metodologia proposta, três geradores de relutância com núcleo do tipo C foram projetados neste trabalho para operação em diferentes velocidades nominais visando analisar seus comportamentos em operação estática e dinâmica.

#### 4.1 ETAPAS DE PROJETO

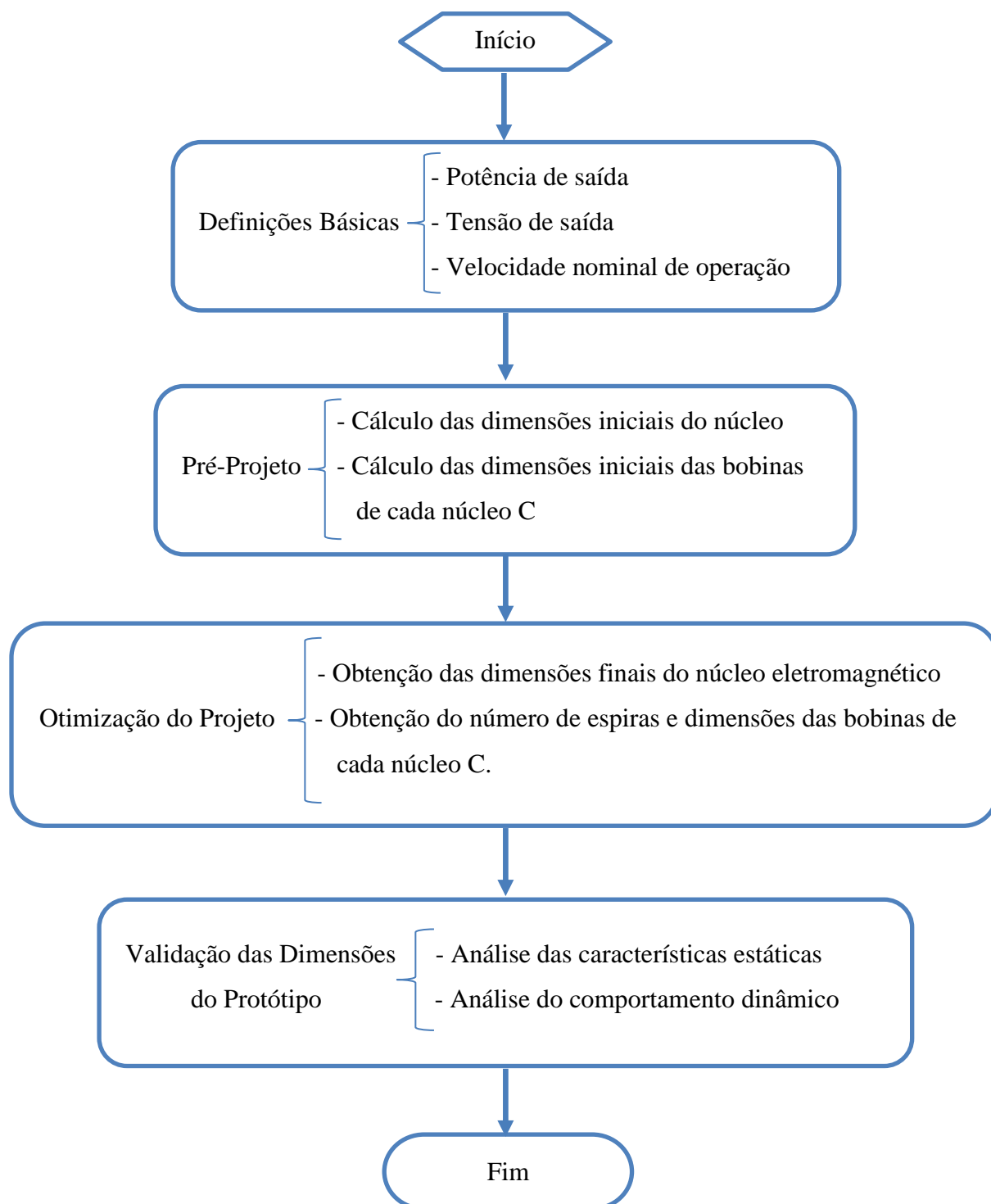
O fluxograma da Figura 4.1 ilustra as etapas de projeto do GRV-C. A metodologia proposta nesta pesquisa envolve a obtenção das dimensões do núcleo magnético a partir de um projeto inicial (pré-projeto). Em seguida, as dimensões finais do gerador elétrico são determinadas por meio da utilização de uma técnica de otimização multiobjetivo (projeto final).

O método de otimização adotado permite que as dimensões do pré-projeto do GRV-C possam ser escolhidas de forma arbitrária. Contudo, utilizar dimensões de um projeto inicial que atenda, pelo menos, parcialmente as especificações do projeto final é um bom ponto de início para a técnica de otimização, uma vez que pode tornar o processo de busca do ponto ótimo mais rápido.

#### 4.2 GRV-C: PRÉ-PROJETO

O projeto do núcleo magnético do GRV-C parte das equações de saída do gerador e das especificações básicas desejadas tais como: potência nominal, tensão de saída e velocidade nominal de operação. Neste caso, o objetivo desse capítulo é determinar as dimensões de três

geradores elétricos de relutância variável com potência de saída de 1,5kW e tensão terminal de 180V para as seguintes velocidades nominais: 650 rpm, 1000 rpm e 1500 rpm. Foram escolhidos valores de velocidades nominais de operação semelhantes aos utilizados em outros trabalhos que abordam o uso de Geradores de Relutância Variável aplicados à sistemas de geração eólica.



**Figura 4.1** – Etapas do projeto do GRV-C.



Seguindo o fluxograma da Figura 4.1, na fase de pré-projeto, é necessário calcular as dimensões do núcleo magnético do GRV-C e realizar o projeto da bobina do estator. A determinação dessas grandezas tem sido documentada na literatura para máquinas de relutância de fluxo radial (tradicionais) [23], [25], [36], [37], [39], [47]. Alguns desses procedimentos foram adaptados para a obtenção das dimensões do núcleo magnético e da bobina de excitação na máquina de relutância de fluxo axial. A seguir apresentam-se as etapas utilizadas para a definição das dimensões dos GRVs-C aqui projetados.

#### 4.2.1 Determinação do número de fases

O número de fases no motor elétrico de relutância está relacionado principalmente com a partida e a capacidade de operação nos dois sentidos de rotação. No gerador elétrico de relutância, esses dois fatos não são relevantes e ele poderia conter apenas uma fase [2].

É importante ressaltar que, conforme citado na introdução desse trabalho, o GRV-C exige necessariamente a presença de um conversor eletrônico de potência (neste caso do tipo CC-CC) para o seu funcionamento. Assim, independente do número de enrolamentos de fase que estão sendo chaveados durante o funcionamento do GRV-C a tensão de saída nos terminais será do tipo contínua. Por isso, é razoável afirmar que um gerador elétrico de relutância poderia operar apenas com uma fase, já que a sua conexão com a rede elétrica é dada por meio de um segundo conversor eletrônico do tipo CC-CA.

Contudo, geradores elétricos de relutância variável com maior número de fases (seja ele de fluxo magnético radial ou axial) são mais confiáveis já que, no caso de falha em um dos enrolamentos de fase, podem continuar operando, ainda que com limitações de potência gerada, com as demais fases por um período de tempo. Foi estabelecido para o projeto dos GRVs-C um número de fases igual a 3.

#### 4.2.2 Número de polos

Várias topologias com diferentes números de polos podem ser obtidas para um GRV de fluxo magnético radial.

Em geral, adotam-se estruturas em que os polos do rotor e do estator são simetricamente espaçados (ou seja, estruturas regulares) com o número de polos do estator ( $N_{es}$ ) maior do que

o rotor ( $N_{ro}$ ). Pesquisas utilizando estruturas com número de polos no rotor maior do que o do estator foram abordadas em [53], [54], [55]. A referência [55], por exemplo, indica que máquinas com  $N_{ro} > N_{es}$  apresentam um maior conjugado/peso quando operam em baixa densidade de corrente.

No projeto dos geradores deste trabalho, adota-se uma estrutura regular de três fases com  $N_{ro} < N_{es}$ . Desta forma, deve-se utilizar uma das configurações mostradas na Tabela 4.1. Define-se como multiplicidade ( $q$ ) o número de pares de polos ativos concomitantemente durante o funcionamento do GRV-C.

**Tabela 4.1 – Configuração de máquinas com 3 fases.**

	$N_{es}$	$N_{ro}$	<b>Multiplicidade (<math>q</math>)</b>
<b>GRV-C 6/4</b>	6	4	1
<b>GRV-C 12/8</b>	12	8	2
<b>GRV-C 18/12</b>	18	12	3

A multiplicidade possui uma relação direta com a vibração e o ruído sonoro em máquinas elétricas de relutância tradicionais [56]. Em geral, quanto maior a multiplicidade do gerador elétrico, menor é a produção de vibrações e ruído acústico. A principal fonte desses dois fenômenos são as forças eletromagnéticas geradas no sentido do raio da máquina que causam a deformação mecânica da peça do rotor [57] e [58].

No entanto, a componente da força eletromagnética produzida no sentido radial em máquinas elétricas de relutância do tipo C, é bem menor do que a força eletromagnética que atua no sentido tangencial conforme apresentado em [48] e no Capítulo 5 dessa pesquisa. Assim, a multiplicidade não estabelece uma relação tão significativa com o GRV-C quando se associa o aumento do número de polos e a redução da vibração e do ruído sonoro.

Um fator significativo no GRV-C que está relacionado com o número de polos (e, consequentemente, a multiplicidade) é a frequência de pulsação das correntes de fase do estator ( $f_{es}$ ) que é a mesma frequência de chaveamento do conversor eletrônico de potência dada por (4.1):

$$f_{es} = N_{ro} \frac{\omega_{rot}}{2\pi} \quad (4.1)$$

Observa-se que a frequência de chaveamento é diretamente proporcional ao número de polos no rotor. Aumentar  $f_{es}$  reduz o capacitor de filtro do barramento CC já que a frequência de oscilação do conjugado eletromagnético também aumenta. Por outro lado, aumentar  $f_{es}$  eleva as perdas por chaveamento [47]. Assim, sugere-se que o projetista realize uma análise de custo

benefício para a determinação da configuração mais adequada do GRV-C de acordo com a sua aplicação.

Para o projeto dos GRVs-C, foi escolhida a topologia 12/8. Essa topologia vem sendo bastante abordada em estudos de GRV de fluxo radial para aplicação eólica nos últimos anos [59], [60], [61]. Assim, optou-se por utilizar uma estrutura semelhante no projeto dos geradores do tipo C deste trabalho.

### 4.2.3 Comprimento do entreferro

O comprimento do entreferro possui uma relevante influência sobre a força magnetomotriz produzida pelos enrolamentos. Quanto menor for o entreferro da máquina elétrica, menor será a corrente elétrica necessária para a produção de uma mesma força magnetizante. Contudo, a construção mecânica é o fator limitante para se obter uma máquina com pequeno entreferro.

De acordo com [62], máquinas elétricas industriais podem apresentar entreferro de até 0,2mm. As máquinas elétricas de pequeno porte tradicionais possuem um entreferro entre 0,127mm a 0,254mm [63].

Neste projeto, adotou-se um entreferro de 0,25mm. A escolha do tamanho do entreferro foi dada principalmente devido às limitações construtivas do futuro protótipo. Também, buscou-se utilizar um valor próximo de pesquisas existentes na literatura que utilizam as máquinas elétricas de relutância do tipo C.

### 4.2.4 Arcos polares

As dimensões dos arcos polares do estator ( $\beta_{es}$ ) e do rotor ( $\beta_{ro}$ ) definem a região efetiva da produção de conjugado eletromagnético e pode garantir o melhor aproveitamento da curva da indutância para a geração de energia elétrica.

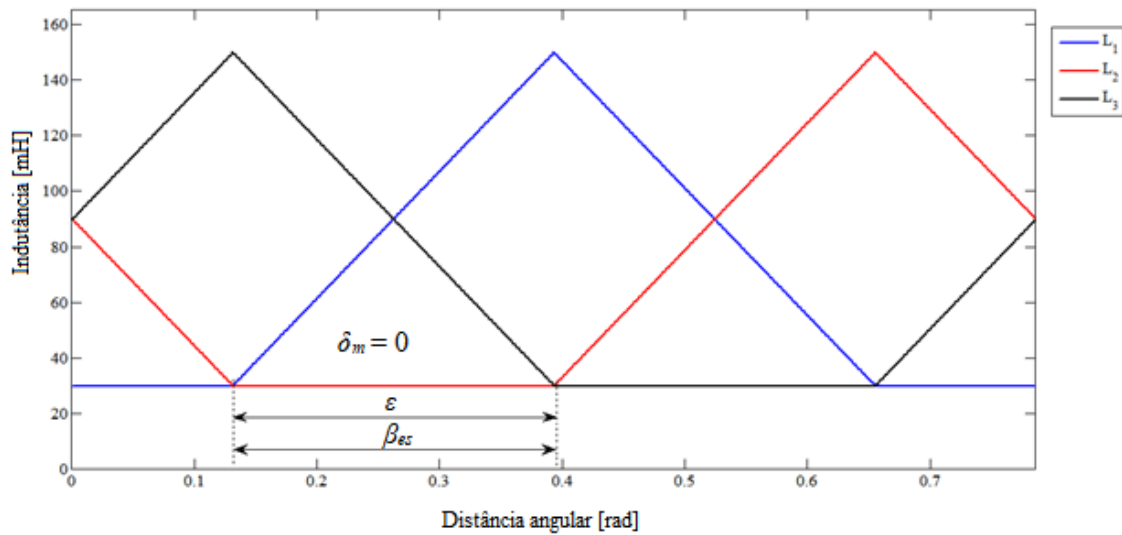
De acordo com [43], para uma máquina regular,  $\beta_{es}$  e  $\beta_{ro}$  devem obedecer às seguintes relações construtivas:  $\beta_{ro} \geq \beta_{es}$  e  $(\beta_{ro} + \beta_{es}) \leq (2\pi / N_{ro})$ . Uma terceira relação construtiva deve ser definida com o objetivo de reduzir as oscilações no conjugado. Essa redução é dada pela presença de um ângulo de sobreposição entre as curvas de indutância.

A variável  $\varepsilon$  representa a distância angular entre duas curvas de indutância de fases adjacentes. Essa distância é ilustrada nas Figuras 4.2 e 4.3 e pode ser calculada por meio da equação (4.2). Um GRV-C de 3 fases com número de polos do rotor igual a 8, por exemplo, possui uma distância angular  $\varepsilon$  igual a 15°.

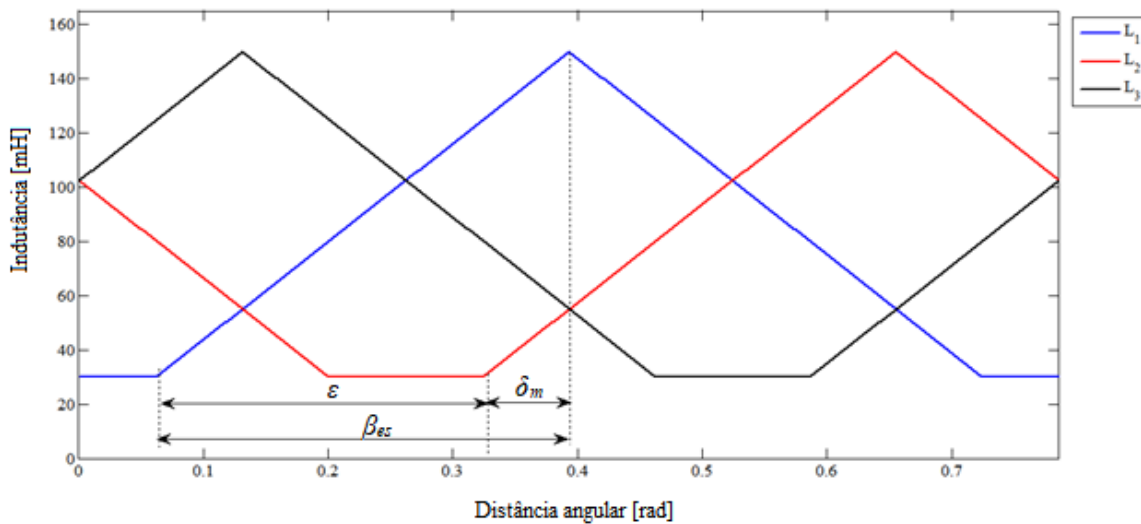
$$\varepsilon = \frac{360^\circ}{m N_{ro}}. \quad (4.2)$$

Ainda, é possível estabelecer um ângulo de sobreposição entre as curvas de indutância de fases adjacentes. Esse ângulo de sobreposição é representado pela variável  $\delta_m$  e pode ser calculado pela equação (4.3). Note que  $\delta_m$  será maior do que zero quando  $\beta_{es} > \varepsilon$ .

$$\delta_m = \beta_{es} - \varepsilon. \quad (4.3)$$



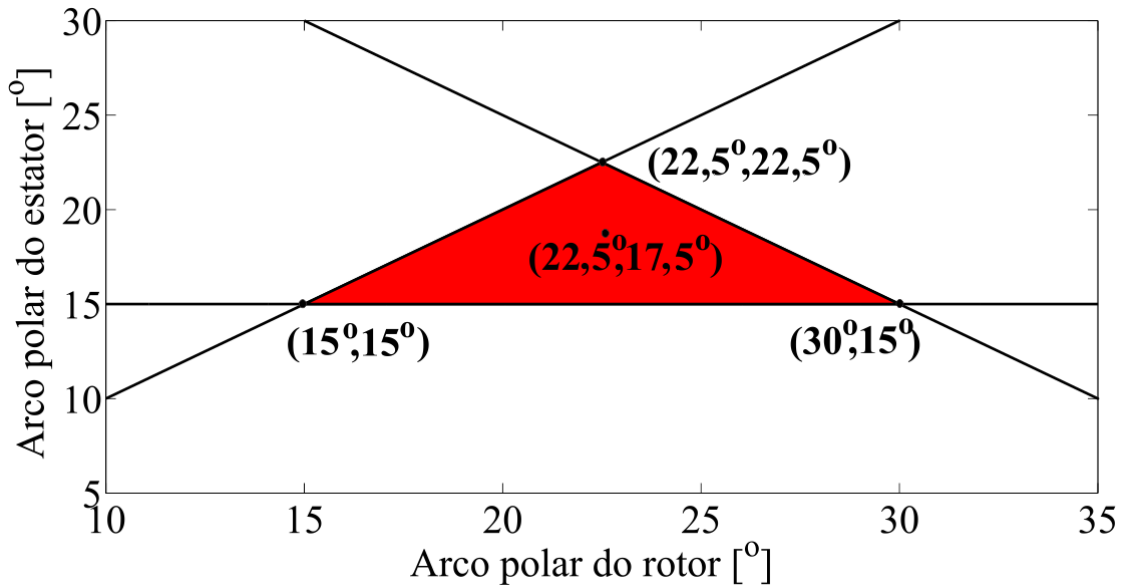
**Figura 4.2** – Distância angular entre fases adjacentes:  $\delta_m=0$ .



**Figura 4.3** – Distância angular entre fases adjacentes:  $\delta_m > 0$ .

De acordo com [32], a presença da sobreposição permite que haja fluxo de corrente em pelo menos duas fases adjacentes durante a comutação, reduzindo a oscilação no conjugado eletromagnético. Logo, aconselha-se fazer  $\delta_m$  maior do que zero conforme ilustra a Figura 4.3.

A partir dessas três relações construtivas, é possível estabelecer limites para os valores dos arcos polares conforme, a Figura 4.4. Quaisquer valores de arcos polares pertencentes ao triângulo com preenchimento em vermelho, satisfazem os critérios estabelecidos.



**Figura 4.4** – Limites dos arcos polares.

Neste projeto, foi escolhido o ponto  $(22,5^\circ, 17,5^\circ)$  para representar os valores iniciais dos arcos polares do rotor e do estator.

#### 4.2.5 Largura dos polos do estator e do rotor

Definidos os comprimentos dos arcos polares do estator e do rotor, a largura dos polos do rotor,  $l_{ro}$ , e do estator,  $l_{es}$ , são calculados por (4.4) e (4.5) respectivamente.

$$l_{ro} = \frac{D}{2} \beta_{ro} = r_{int} \beta_{ro} \quad (4.4)$$

$$l_{es} = \frac{D}{2} \beta_{es} = r_{int} \beta_{es} \quad (4.5)$$

#### 4.2.6 Raio interno do rotor

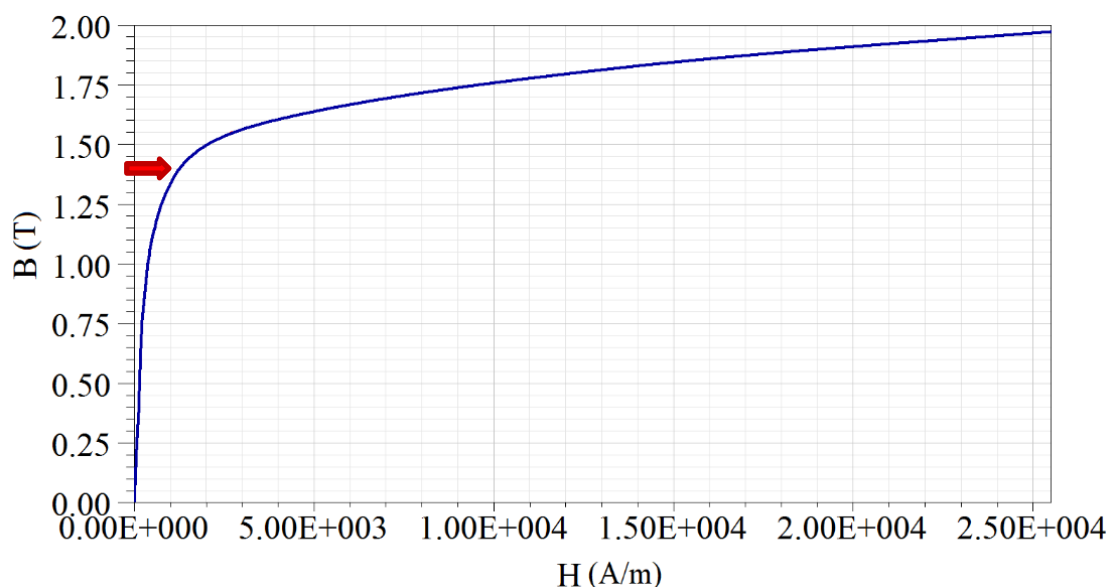
O raio interno do gerador,  $r_{int}$ , é calculado a partir da equação da potência de saída total, conforme apresentada no Capítulo 3 em (3.16). Isolando a variável  $r_{int}$ , obtém-se (4.6):

$$r_{int} = \sqrt[3]{\left(\frac{P_{ele}}{\pi k_e k_d A_s \omega_{rot} B^2 \tan\left(\frac{\beta_{es}}{2}\right) k_2}\right)} \quad (4.6)$$

sendo:  $k_2 = 1 - \frac{L_u}{L_a}$ .

A variável  $k_2$  depende do ponto de operação do gerador. Em máquinas de fluxo radial operando em condições nominais, adota-se um valor para  $k_2$  que se encontra na faixa de 0,65 a 0,75 segundo [48]. Inicialmente, definiu-se  $k_2 = 0,65$  para o projeto dos GRVs-C. Esses valores serão corrigidos durante o processo de otimização do núcleo magnético.

Adotou-se também, inicialmente, uma densidade de fluxo magnético  $B$  de 1,4 T que o valor aproximado da densidade de campo magnética no joelho da curva de magnetização do material magnético DR5 10-50, como pode ser visto na Figura 4.5.



**Figura 4.5** – Curva o material magnético DR5 10-50: joelho da curva.

### 4.2.7 Altura dos polos

Inicialmente será feita uma breve explanação acerca do dimensionamento da altura dos polos em geradores de relutância de tradicionais (fluxo radial), com o objetivo de estabelecer uma comparação entre a topologia de máquinas elétricas de fluxo magnético radial e axial.

Em geradores elétricos de relutância tradicionais, a altura do polo do estator ( $h_{es}$ ) é determinada a partir da altura da bobina de excitação. Como as bobinas são alocadas no polo do estator,  $h_{es}$  deve possuir uma altura suficiente para comportar a bobina de excitação. Já a altura do polo do rotor ( $h_{ro}$ ) está relacionada ao diâmetro interno da máquina. Observa-se que esses critérios não são exigências para geradores com núcleo do tipo C, pois as bobinas do estator não estão alocadas nos polos e os blocos magnéticos do rotor não dependem diretamente do diâmetro interno do rotor.

Em [64] são apresentadas duas relações entre as alturas dos polos de um gerador de relutância de fluxo radial e os passos polares conforme (4.7) e (4.8):

$$\frac{h_{es}}{\left(\frac{\pi D}{2 N_{es}}\right)} \approx \frac{h_{es}}{\left(\frac{\pi r_{int}}{N_{es}}\right)} \approx (0,7 - 0,8) \quad (4.7)$$

$$\frac{h_{ro}}{\left(\frac{\pi D}{2 N_{ro}}\right)} \approx \frac{h_{ro}}{\left(\frac{\pi r_{int}}{N_{ro}}\right)} \approx (0,7 - 0,8) \quad (4.8)$$

Já em geradores com núcleo do tipo C, nota-se que seria possível adotar  $h_{es} = 0$ , uma vez que as bobinas estão alocadas na coluna externa da ranhura, conforme ilustra a Figura 4.6.

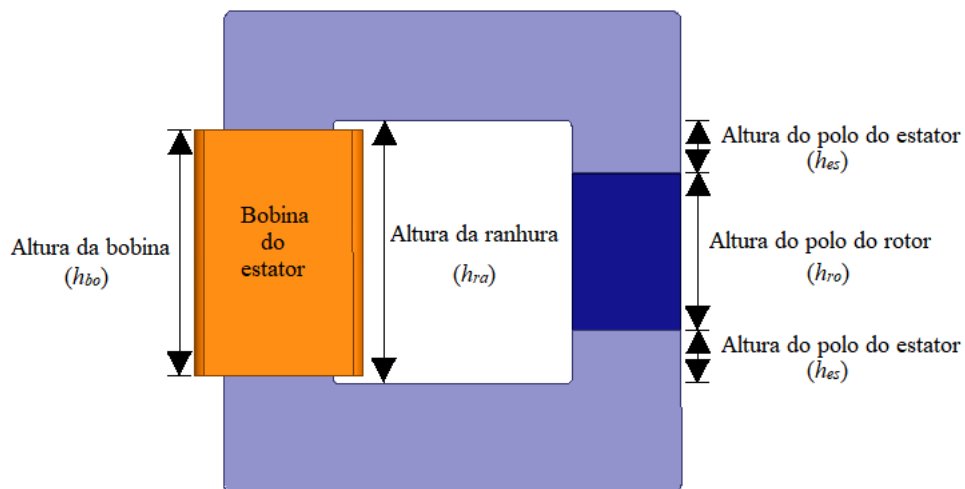


Figura 4.6 – Núcleo magnético C.

Desta forma, a altura da bobina de excitação se relaciona diretamente com altura da ranhura ( $h_{ra}$ ) do GRV-C e não com a altura do polo do estator. Contudo, foi estabelecido como um dos critérios neste projeto, um valor diferente de zero para o polo do estator com o objetivo de melhor direcionar das linhas de fluxo magnético no entreferro, ou seja, de reduzir o efeito de borda na região do entreferro.

Caso a altura da ranhura  $h_{ra}$  seja conhecida, a altura do polo do rotor pode ser estimada aplicando (4.9):

$$h_{ro} = h_{ra} - 2h_{es} - 2l_{ent} \quad (4.9)$$

Embora não seja uma exigência, as duas relações descritas em (4.7) e (4.8) foram utilizadas para estimar os valores iniciais de  $h_{es}$  e  $h_{ro}$  nos GRVs-C. Esses valores serão readequados no processo de otimização, após a definição do número de espiras dos geradores elétricos.

#### 4.2.8 Comprimento dos polos

O comprimento dos polos do estator e do rotor representados pela variável  $l_r$  é, em geral, submúltiplo do raio interno, calculado por meio de (4.10), em que a constante  $k$  está relacionada com a estabilidade do sistema e é definida de acordo com a natureza de aplicação da máquina de relutância. Em servomotores, por exemplo,  $k$  varia entre 1 a 3. Em aplicações de outro tipo,  $k$  encontra-se em uma faixa de 0,25 a 0,7 [47].

$$l_r = 2 k r_{int} \quad (4.10)$$

Nesta pesquisa, foi adotado como critério de projeto  $l_r$  igual à largura do polo do estator. Deste modo, a equação (4.10) pode ser aproximada por (4.11).

$$l_r = 2 \tan\left(\frac{\beta_{es}}{2}\right) r_{int} \quad (4.11)$$

#### 4.2.9 Dimensionamento da bobina de excitação

##### a) Número de espiras

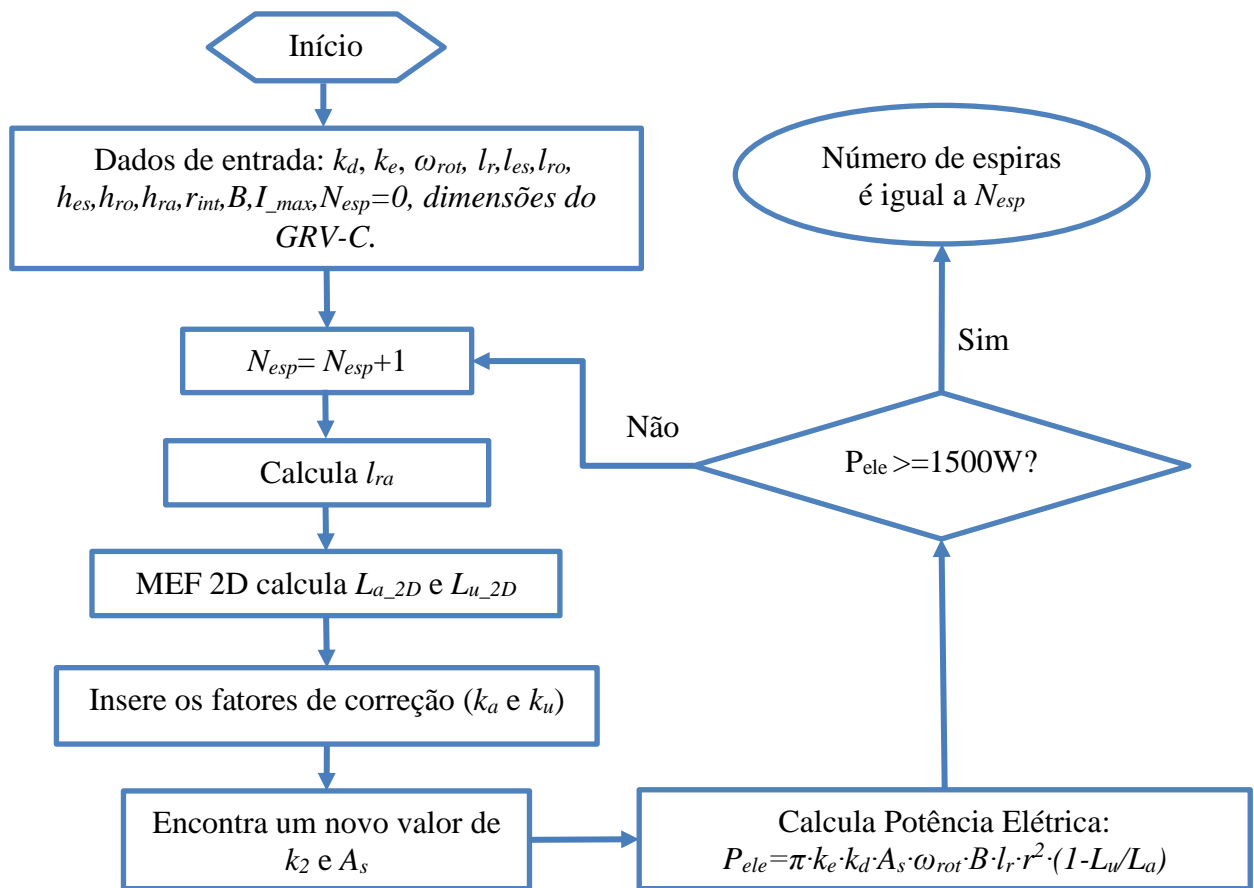
A principal dificuldade no cálculo do número de espiras em máquinas elétricas convencionais é a de como acomodar as bobinas de excitação dentro das ranhuras do estator e/ou rotor sem exceder o limite de espaço adequado para a alocação e refrigeração. No entanto, os geradores do tipo GRV-C possuem um amplo espaço para a acomodação das bobinas que, alocadas



na parte externa do núcleo magnético, facilitam a passagem do fluxo de ar e a troca de calor com o meio ambiente.

O número de espiras por núcleo C ( $N_{esp}$ ) pode ser calculado a partir de (3.12) supondo um valor para o carregamento elétrico específico e a máxima corrente elétrica permitida no condutor. Observa-se que o carregamento elétrico não deve exceder o limite permitido para cada sistema de refrigeração do gerador.

O número de espiras também pode ser calculado aplicando o processo iterativo computacional. Desta forma, propõe-se o algoritmo apresentado no fluxograma da Figura 4.7 que utiliza um processo iterativo para cálculo de  $N_{esp}$  com o uso do método dos elementos finitos em duas dimensões (MEF-2D).



**Figura 4.7** – Algoritmo para determinação do número de espiras.

No algoritmo proposto, solicita-se a cada iteração os valores da indutância nas posições alinhada e desalinhada dos polos. Devido à natureza tridimensional da distribuição de fluxo magnético no GRV-C, o cálculo da indutância por meio do MEF-2D torna-se pouco preciso,

principalmente na posição desalinhada. Os erros são atribuídos aos caminhos de fluxo magnético existentes na dimensão que não é considerada no MEF-2D. Contudo, optou-se pelo uso método dos elementos finitos em duas dimensões devido a quantidade de iterações que devem ser realizadas durante o cálculo no número de espiras, reduzindo, assim, o tempo de processamento caso o método dos elementos finitos em três dimensões fosse utilizado.

De acordo com [47], a contribuição dos caminhos de fluxo magnético que foram ignorados, numa avaliação bidimensional, podem representar cerca de 15% na posição desalinhada e 5% na posição alinhada. Quando comparado com o valor experimental, o erro final do valor da indutância na posição desalinhada determinados através do MEF-2D, por exemplo, pode chegar em torno de 50% conforme é mostrado em [44].

Com o objetivo de reduzir esse erro no cálculo das indutâncias determinadas por meio do MEF-2D, foram incluídos os fatores de correção  $k_a$  e  $k_u$  nas indutâncias alinhada e desalinhada conforme mostram (4.12) e (4.13).

$$L'_a = k_a L_{a\_2D} \quad (4.12)$$

$$L'_u = k_u L_{u\_2D} \quad (4.13)$$

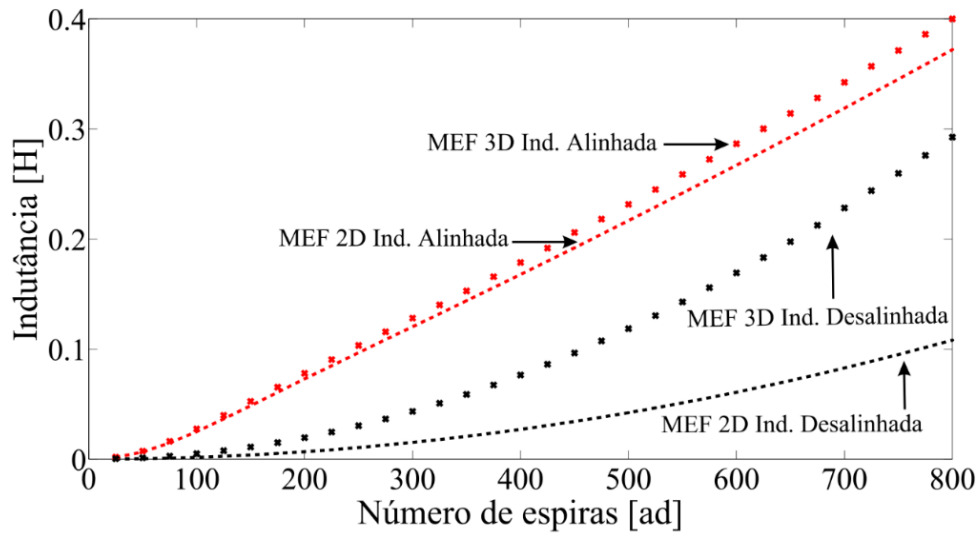
onde  $L'_a$  e  $L'_u$  são, respectivamente, as indutâncias calculadas por meio do MEF-2D corrigidas nas posições alinhada e desalinhada.

Os fatores de correção  $k_a$  e  $k_u$  são calculados utilizando (4.14) e (4.15). Os erros relativos entre as indutâncias calculadas por meio do MEF-2D e MEF-3D ( $erro_a$  e  $erro_u$ ) são obtidos da seguinte forma:

- a) para um grupo de 20 pontos dentro de um intervalo de busca definido para o número de espiras ( $0 < N_{esp} < 800$ ), é encontrada a diferença entre os valores de indutância calculados por meio do MEF em duas e três dimensões, conforme ilustra a Figura 4.8.
- b) utilizando a técnica de interpolação *spline*, são calculados os erros relativos  $erro_a$  e  $erro_u$ , a partir de um número de espiras equivalente à saturação magnética do material, ou seja, de acordo com a densidade de campo magnético  $B$  no entreferro.

$$k_a = \frac{1}{(1-erro_a)} = \frac{1}{\left(1 - \frac{(L_{a\_3D} - L_{a\_2D})}{L_{a\_3D}}\right)} \quad (4.14)$$

$$k_u = \frac{1}{(1-erro_u)} = \frac{1}{\left(1 - \frac{(L_{u\_3D} - L_{u\_2D})}{L_{u\_3D}}\right)} \quad (4.15)$$



**Figura 4.8** – Indutâncias alinhada e desalinhada versus número de espiras.

*b) Altura e largura da ranhura*

A altura da ranhura ( $h_{ra}$ ) pode ser encontrada ou a partir do número de espiras ou por meio da altura dos polos. Neste projeto, optou-se por calcular a altura da ranhura com base na altura dos polos e do comprimento do entreferro, conforme mostra (4.16):

$$h_{ra} = h_{ro} + 2h_{es} + 2l_{ent} \quad (4.16)$$

A largura da ranhura ( $l_{ra}$ ) é calculada a partir da largura da bobina. Além disso,  $l_{ra}$  deve ter o comprimento suficiente para acomodar a borda do disco do rotor. Desta forma,  $l_{ra}$  foi estimado a partir de (4.17):

$$l_{ra} = \frac{l_{ro}}{2} + l_{bo} \quad (4.17)$$

onde:  $l_{bo}$  representa a largura da bobina.

Observa-se que o fator de enchimento da ranhura ( $f_{enc}$ ) e do empacotamento dos fios ( $f_c$ ) devem estar entre os limites estabelecidos para máquinas elétricas. Nessa pesquisa, admitiu-se  $f_c = 0,8$ . Já o fator de enchimento varia entre 0,2 a 0,7 segundo [47], entretanto, na prática, esse valor chega no máximo a 40% [44].

### 4.3 DIMENSÕES INICIAIS DO GRVs-C

Aplicando os procedimentos descritos na seção 4.1, foram calculadas as dimensões iniciais dos três geradores – Figura 4.9 e Tabela 4.2.

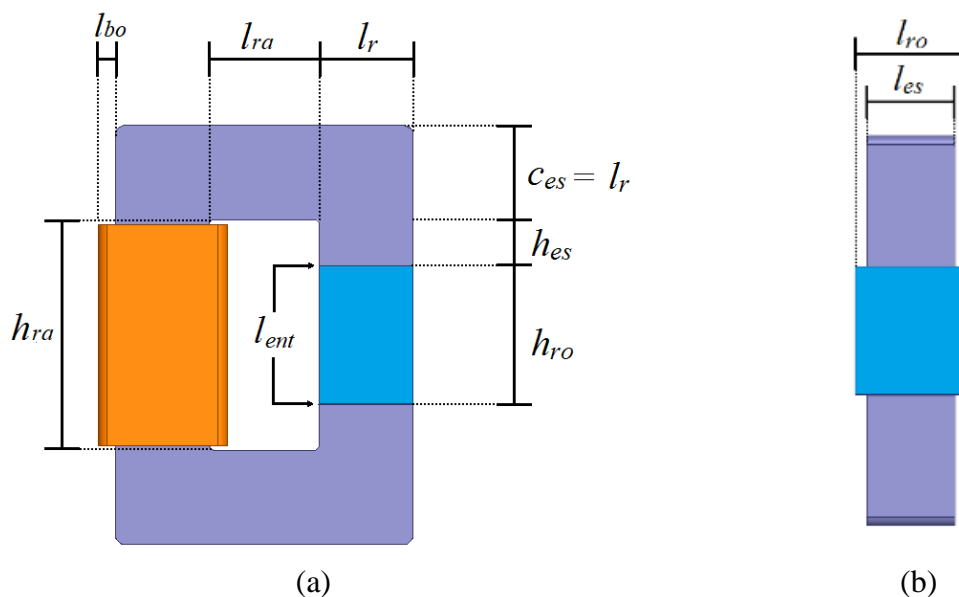


Figura 4.9 – Vistas do núcleo do GRV-C: (a) frontal; (b) lateral.

Tabela 4.2 – Parâmetros iniciais do GRV-C: Gerador 1 (650 rpm), Gerador 2 (1000 rpm) e Gerador 3 (1500 rpm).

Parâmetro	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3
Número de polos do estator ( $N_{es}$ )	12	12	12
Número de polos do rotor ( $N_{ro}$ )	8	8	8
Arco polar do estator ( $\beta_{es}$ )	0,3054	0,3054	0,3054
Arco polar do rotor ( $\beta_{ro}$ )	0,3927	0,3054	0,3054
Raio interno do rotor ( $r_{int}$ )	114 mm	100 mm	86 mm
Largura do polo do estator ( $l_{es}$ )	35 mm	31 mm	27 mm
Altura do polo do estator ( $h_{es}$ )	21 mm	19 mm	16 mm
Comprimento da ranhura ( $l_{ra}$ )	50 mm	44 mm	40 mm
Comprimento dos polos ( $l_r$ )	45 mm	31 mm	27 mm
Número de espiras por núcleo C ( $N_{esp}$ )	405	339	260
Entreferro ( $l_{ent}$ )	0,25 mm	0,25 mm	0,25 mm
Largura do polo do rotor ( $l_{ro}$ )	45 mm	40 mm	35 mm
Altura do polo do rotor ( $h_{ro}$ )	63 mm	55 mm	48 mm
Altura da ranhura ( $h_{ra}$ )	105,5 mm	93,5 mm	80,5 mm
Corrente máxima ( $l_{max}$ )	5 A	5 A	5 A

## 4.4 GRV-C: OTIMIZAÇÃO

### 4.4.1 Otimização multiobjetivo

O processo de otimização de qualquer dispositivo eletromagnético exige que haja compromisso entre o objetivo a ser atingido, as definições dos parâmetros de projeto e as restrições do sistema. O balanço entre esses elementos ou está relacionado à experiência do projetista ou ao conhecimento fiel do comportamento do sistema. Contudo, nem sempre uma representação fiel do sistema é conhecida e o projetista recorre a modelos baseados em aproximações de primeira ordem que podem ser insuficientes para a compreensão da física integral do sistema, tornando o dimensionamento do sistema de acionamento mais complicado. Assim, utilizar desde a fase de otimização de projeto um modelo que represente com mais fidelidade as não linearidades do sistema, indica que o balanço entre objetivo/parâmetros/restrições caminha para o ponto ótimo.

Em linhas gerais, problema de otimização multiobjetivos pode ser definido como a busca, dentro de um determinado espaço definido, de soluções que satisfaçam todos os objetivos dentro de critérios estabelecidos. O objetivo, por exemplo, pode ser de minimização ou maximização uma determinada função.

De acordo com [65], a formulação geral um problema de minimização multiobjetivos é dada pelas equações (4.18) e (4.19):

$$\text{minimizar: } OF = f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x) \quad (4.18)$$

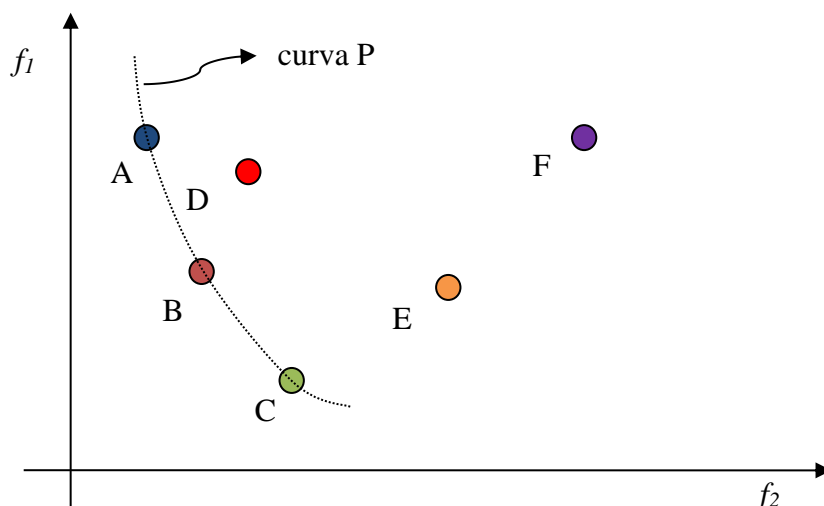
$$\text{sujeito a: } g_1(x) \leq 0, g_2(x) \leq 0, \dots, g_h(x) \leq 0 \quad (4.19)$$

onde:  $OF$  é a função multiobjetivo,  $f_p(x)$  são as funções objetivo,  $g_h(x)$  as funções de restrição,  $p$  é o número de funções objetivo ( $p$  inteiro) e  $h$  é número de funções de restrição ( $h$  inteiro).

O processo de otimização busca um vetor solução, dentro de um espaço euclidiano de  $s$  dimensões  $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_s]$ , que é a melhor solução para o vetor formado com as funções objetivos,  $[f_1(x) \ f_2(x) \ \dots \ f_u(x)]$ , também definido dentro de um espaço euclidiano (onde  $u$  é inteiro). O conjunto da solução (ou soluções viáveis) deve atender as funções de restrições.

Na otimização multiobjetivos não existe uma única solução ótima, mas sim, um conjunto de soluções viáveis. Contudo, dentro de um conjunto de soluções existem aquelas que são possíveis e não dominadas, conhecidas também como soluções ótimas de Pareto. Por definição, um vetor  $A$  é uma solução ótima de Pareto se não existir outro vetor  $B$  que melhore uma das funções objetivos sem piorar pelo menos umas das outras, ou seja, se  $B$  não dominar  $A$  [66].

Considere um problema multiobjetivo de duas dimensões. Supondo também que se deseja minimizar as funções objetivos  $f_1$  e  $f_2$  e que A, B, C, D, E e F são soluções da função multiobjetivo objetivo OF. A Figura 4.10 mostra o gráfico com essas soluções possíveis de para OF.



**Figura 4.10** – Soluções da função multiobjetivo.

Os eixos do plano cartesiano da Figura 4.8 representam as funções objetivos. Cada uma das soluções (A, B, C, D, E e F) possui coordenadas que são definidas pelos valores das funções objetivos ( $f_1$  e  $f_2$ ) no plano cartesiano, denominado espaço de decisão.

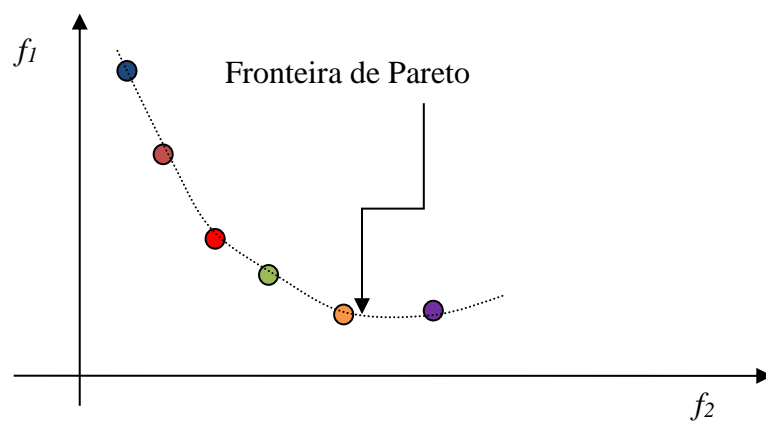
Tomando, como exemplo, as soluções F e E. Apesar de F ser uma solução possível do problema, ela é inferior em relação E. Note que, sendo o problema de minimização, os valores individuais de  $f_1$  e  $f_2$  devem os menores possíveis. No caso da solução E, os valores de  $f_1$  e  $f_2$  são menores que em F. Então, diz-se que E domina a solução F. Observe ainda que F é dominada por todas as outras soluções.

A solução A é indiferente a solução D. O valor individual de  $f_2$  em A é melhor que em D. Contudo o valor de  $f_1$  em D é melhor que em A. Por outro lado, os valores individuais de  $f_1$  e  $f_2$  em B são melhores que em D, logo D é uma solução dominada por B. Já a solução E é dominada pela solução C.

As soluções A, B e C são indiferentes entre si e não são dominadas por nenhuma outra solução. Desta forma, elas são as soluções mais eficientes do problema multiobjetivos. O conjunto formado A, B e C são conhecidas como soluções ótimas de Pareto (representada pela curva P na Figura 4.10).

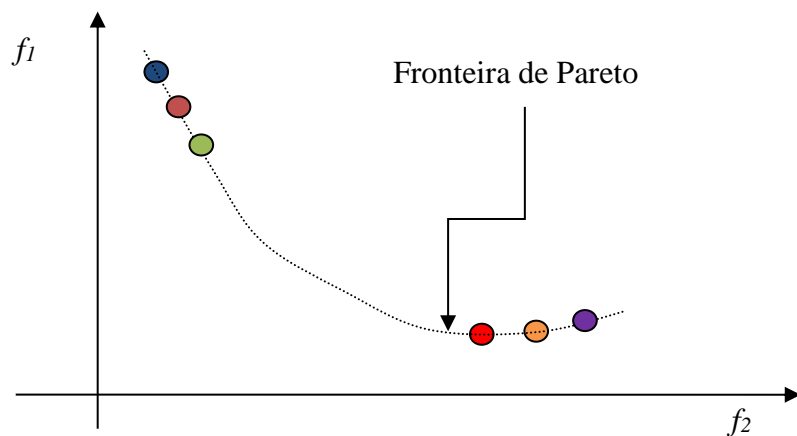
A técnica de otimização adotada neste trabalho é a das Somas Ponderadas ou Método dos Pesos. O Método dos pesos é uma das formas mais comuns de solucionar problemas multiobjetivos e apresenta como vantagem sua simplicidade [67]. Esse método reduz a função multiobjetivos em uma função escalar mono-objetivo atribuindo diferentes valores de pesos a cada função objetivo.

A escolha dos pesos é um critério importante nesta técnica de otimização uma vez que, deseja-se encontrar as soluções mais próximas da Fronteira de Pareto e que tenham a maior diversidade possível como pode ser observado na Figura 4.11.



**Figura 4.11** – Soluções de Pareto ótimas: (a) Diversidade de soluções satisfatória.

O Método dos Pesos torna-se ineficiente quando o espaço de objetivos é não convexo, uma vez que ele não consegue gerar todas as soluções de pareto ótimas [68]. É importante ressaltar que distribuir uniformemente os pesos, não garante que as soluções encontradas no espaço de soluções sejam uniformemente distribuídas conforme exemplificado na Figura 4.12.



**Figura 4.12** – Soluções de Pareto ótimas: Diversidade de soluções precária.

Após a determinação da curva de Pareto, é necessário utilizar procedimentos de tomada de decisão a fim de definir qual das soluções existentes na curva de Pareto será adotada. Várias são as técnicas e algoritmos existentes na literatura que realizam a tomada de decisão. Em geral, essas técnicas estão relacionadas com a redução do custo final do projeto e facilidade de fabricação.

#### 4.4.2 Dimensões finais do GRV-C

As dimensões finais do núcleo magnético C dos geradores são calculadas utilizando um método clássico de otimização. Deseja-se obter três geradores de relutância em que a potência elétrica de saída esteja entre 1,5kW a 1,7kW e tensão induzida nos enrolamentos de fase entre 90V e 180V. Dado que existe mais de um objetivo a ser atingido, o problema é caracterizado como multiobjetivo. Além disso, o método dos elementos finitos em duas dimensões é acoplado ao processo iterativo de otimização a fim de incluir as características não linearidades do material magnético do núcleo do gerador.

Na otimização do núcleo do GRV-C, o vetor solução  $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]$  possui 4 dimensões, onde as variáveis são, respectivamente:  $N_{esp}$ ,  $r_{int}$ ,  $\beta_{es}$  e  $\beta_{ro}$ . Os valores máximos e mínimos do vetor de variáveis são definidos na Tabela 4.3. Já o vetor com as funções objetivos é bidimensional, uma vez que o problema possui apenas dois objetivos a serem atingidos.

**Tabela 4.3 – Valores máximos e mínimos do vetor x: Gerador 1, 2 e 3.**

<b>Parâmetro</b>	$N_{esp}$	$r_{int}$	$\beta_{es}$	$\beta_{ro}$
Mínimo	155	50	0,2618	0,2618
Máximo	800	150	0,39269	0,52359

Aplicando o Método dos Pesos, determina-se a função multiobjetivo  $OF$  (4.20) e as relações de restrição (4.21):

$$OF = \min (\sum w_i c_i f_i(\mathbf{x})), i = 1,2 \quad (4.20)$$

$$\text{sujeito a: } x_3 - x_4 \leq 0 \text{ e } x_3 + x_4 \leq 0.78539 \quad (4.21)$$

O vetor dos pesos é representado pela variável  $w$  em que  $w > 0$  e  $\|w\|=1$ . A variável  $c_i$  é um fator de normalização dado por (4.22). A normalização dos dados é necessária para comparar os objetivos numa mesma escala durante a otimização.



$$c_i = \frac{1}{[\max(f_i(x)) - \min(f_i(x))]}, \quad i = 1, 2 \quad (4.22)$$

As funções objetivos  $f_1$  e  $f_2$  são, respectivamente, o quadrado do erro relativo da potência elétrica total do gerador (4.23) e o quadrado do erro relativo da tensão elétrica induzida no enrolamento,  $E_{ind}$  (4.24).

$$f_1(\mathbf{x}) = \left( \frac{P_{ele}(\mathbf{x}) - P_{rel}}{P_{rel}} \right)^2 \quad (4.23)$$

$$f_2(\mathbf{x}) = \left( \frac{E_{ind}(\mathbf{x}) - E_{rel}}{E_{rel}} \right)^2 \quad (4.24)$$

sendo:  $P_{rel}$  a potência elétrica de referência e  $E_{rel}$  a tensão induzida no enrolamento de fase de referência.

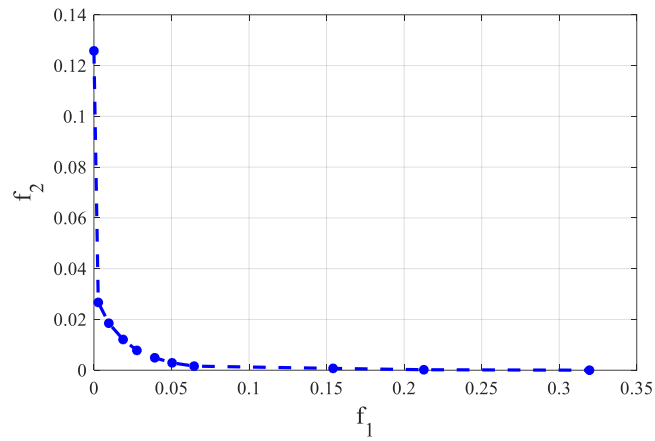
Os valores de  $P_{ele}$  e  $E_{ind}$  são determinados utilizando o MEF-2D com o auxílio do programa *Finite Element Method Magnetics* (FEMM). Dado que os valores das indutâncias nas posições alinhada e desalinhada são utilizados no cálculo de  $P_{ele}$  e  $E_{ind}$ , destaca-se novamente que é necessário incluir os fatores  $k_a$  e  $k_u$  para a correção dos valores de indutância (conforme descrito no item a) da seção 4.2.9).

A minimização da função multiobjetivo  $OF$  foi realizada com o uso do método de busca direta *Pattern Search*, disponível no toolbox de otimização do *software* Matlab®. Esse método não utiliza derivadas e busca a solução ótima por meio de um processo iterativo. Em linhas gerais, o algoritmo *Pattern Search* seleciona um conjunto de soluções em torno do ponto atual a cada iteração, buscando um valor onde a função  $OF$  seja menor que a solução vigente [69], [70], [71].

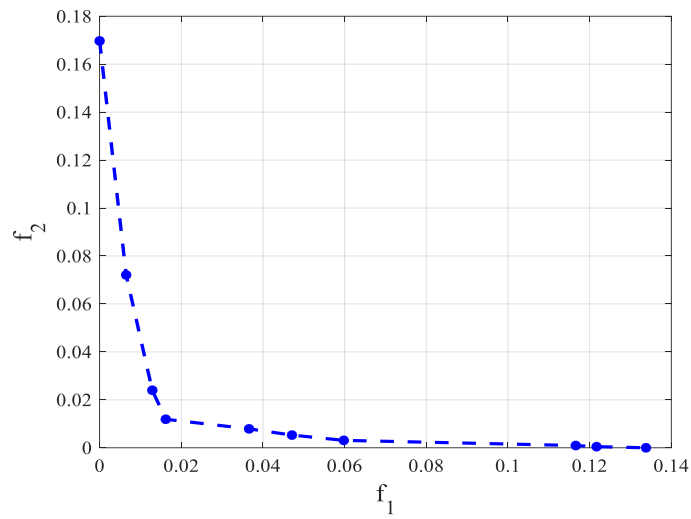
Aplicando o método dos pesos na minimização de  $OF$ , foi determinada a Distribuição de Pareto para cada projeto do gerador conforme ilustram as Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15.

Após a obtenção da curva de Pareto, é necessário decidir qual das soluções, pertencentes ao conjunto do conjunto de soluções ótimas, será adotada no projeto de cada gerador. A tomada de decisão não é simples e envolve além da aplicabilidade do gerador (critérios que foram incluídos no algoritmo de otimização) um compromisso entre custo e viabilidade de fabricação.

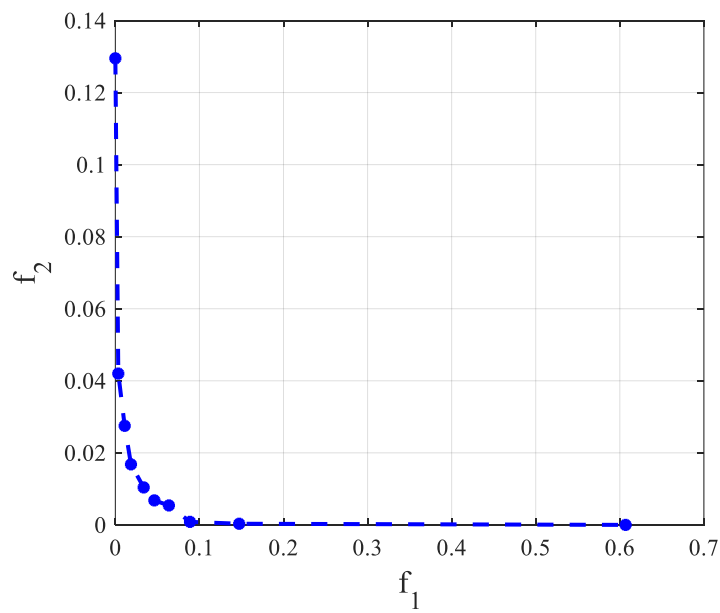
Visto que, no atual estágio dessa pesquisa, não se busca ainda uma redução dos custos de fabricação no projeto dos GRVs-C, foi adotado como critério de decisão a solução (ou o ponto) onde os valores individuais de  $f_1$  e  $f_2$  estejam mais próximos de zero. Em outras palavras onde o quadrado do erro relativo quadrado do erro relativo  $P_{ele}$  e  $E_{ind}$  sejam os menores possíveis.



**Figura 4.13** – Distribuição de Pareto: Gerador 1.

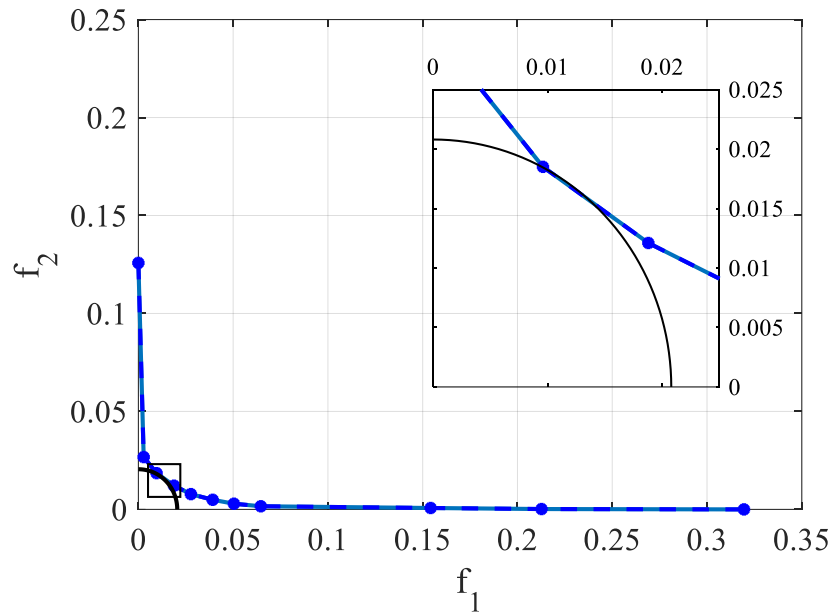


**Figura 4.14** – Distribuição de Pareto: Gerador 2.

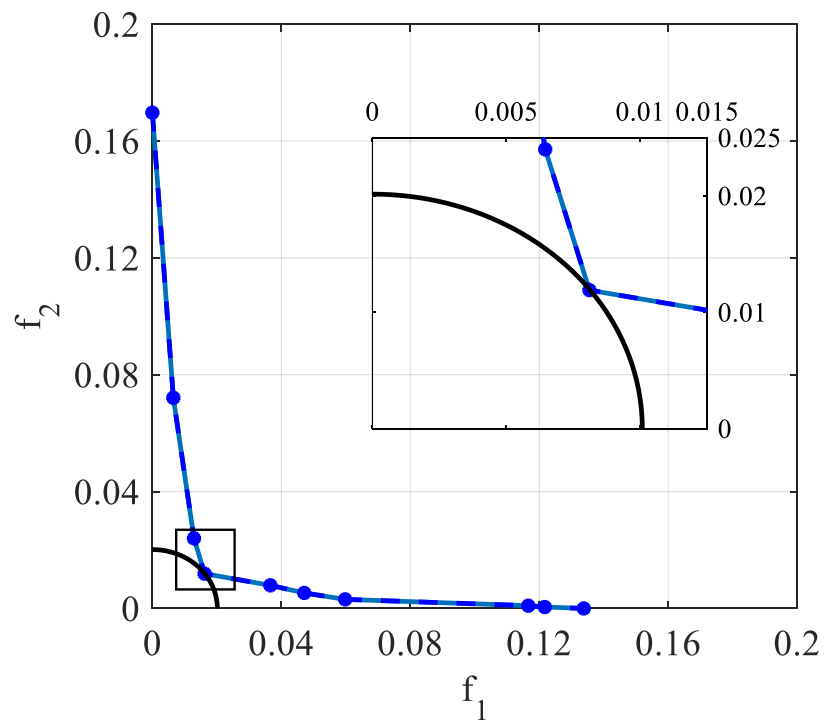


**Figura 4.15** – Distribuição de Pareto: Gerador 3.

Para isso, foi traçada uma circunferência no plano cartesiano do espaço de soluções com centro em (0,0). O raio dessa circunferência é dado pela menor distância entre o ponto (0,0) e a curva de Pareto. Assim, a solução mais próxima do ponto onde a curva de Pareto toca a circunferência é solução escolhida, conforme pode ser observado nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18.



**Figura 4.16** – Critério de decisão: Gerador 1.



**Figura 4.17** – Critério de decisão: Gerador 2.

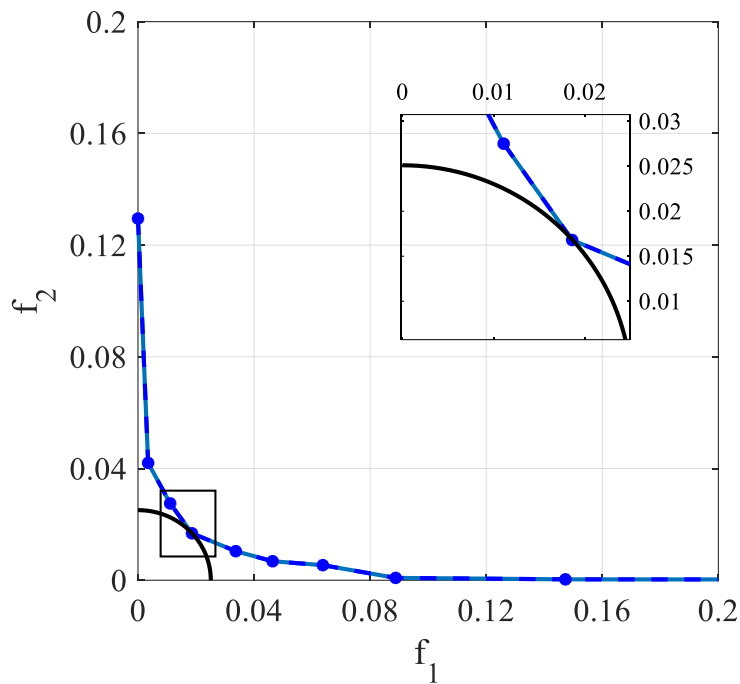


Figura 4.18 – Soluções da função multiobjetivo: Gerador 3.

Os valores do vetor solução  $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]$  e as coordenadas no espaço de decisão de  $f_1$  e  $f_2$  para cada gerador são mostrados nas Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6.

Tabela 4.4 – Resultados da Otimização: Gerador 1.

<b>Projeto ótimo escolhido</b>	$N_{esp}$	$r_{int}$	$\beta_{es}$	$\beta_{ro}$
	350	114	0,373	0,390
	$P_{ele}$ (kW)	$E_{ind}$ (V)	$f_1$	$f_2$
	1,647	120,94	0,0159	0,0971

Tabela 4.5 – Resultados da Otimização: Gerador 2.

<b>Projeto ótimo escolhido</b>	$N_{esp}$	$r_{int}$	$\beta_{es}$	$\beta_{ro}$
	311	96	0,381	0,381
	$P_{ele}$ (kW)	$E_{ind}$ (V)	$f_1$	$f_2$
	1,69	124,71	0,0165	0,0125

Tabela 4.6 – Resultados da Otimização: Gerador 3.

<b>Projeto ótimo escolhido</b>	$N_{esp}$	$r_{int}$	$\beta_{es}$	$\beta_{ro}$
	272	86	0,368	0,391
	$P_{ele}$ (kW)	$E_{ind}$ (V)	$f_1$	$f_2$
	1,7	121,87	0,0269	0,0138

A partir dos parâmetros  $N_{esp}$ ,  $r_{int}$ ,  $\beta_{es}$  e  $\beta_{ro}$  (definidos pelo vetor solução escolhido para cada gerador), são calculadas as demais grandezas de cada núcleo C. As dimensões finais dos geradores são apresentadas na Tabela 4.7.

Os resultados das simulações estáticas e do comportamento dinâmico sob condição de carga para os Geradores 1, 2 e 3 são apresentados no Capítulo 5 dessa tese de doutorado.

**Tabela 4.7 – Parâmetros finais do GRV-C: Gerador 1 (650 rpm), Gerador 2 (1000 rpm) e Gerador 3 (1500 rpm).**

<b>Parâmetro</b>	<b>Gerador 1</b>	<b>Gerador 2</b>	<b>Gerador 3</b>
Número de polos do estator ( $N_{es}$ )	12	12	12
Número de polos do rotor ( $N_{ro}$ )	8	8	8
Arco polar do estator ( $\beta_{es}$ )	0,373	0,381	0,368
Arco polar do rotor ( $\beta_{ro}$ )	0,390	0,381	0,391
Raio interno do rotor ( $r_{int}$ )	114 mm	96 mm	86 mm
Largura do polo do estator ( $l_{es}$ )	43 mm	37 mm	32 mm
Altura do polo do estator ( $h_{es}$ )	21 mm	18 mm	16 mm
Comprimento da ranhura ( $l_{ra}$ )	50 mm	41 mm	38 mm
Comprimento dos polos ( $l_r$ )	43 mm	37 mm	32 mm
Número de espiras por núcleo C ( $N_{esp}$ )	350	311	272
Entreferro ( $l_{ent}$ )	0,25 mm	0,25 mm	0,25 mm
Largura do polo do rotor ( $l_{ro}$ )	45 mm	37 mm	34 mm
Altura do polo do rotor ( $h_{ro}$ )	63 mm	53 mm	47 mm
Altura da ranhura ( $h_{ra}$ )	105,5 mm	89,5 mm	79,5 mm
Corrente máxima ( $I_{max}$ )	5 A	5 A	5 A

#### 4.5 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foi apresentada uma metodologia de projeto geradores de relutância variável com núcleo magnético do tipo C. Seguindo a metodologia proposta, as dimensões finais do núcleo magnético C e da bobina de excitação de três GRVs-C foram encontradas. Os três geradores do tipo C projetados possuem potência e tensão elétrica de saída similares, diferenciando-se apenas quanto às velocidades nominais de operação. Foram escolhidos valores de velocidades nominais semelhantes aos utilizados em outros trabalhos que abordam o uso de Geradores de Relutância Variável aplicados à sistemas de geração eólica. O próximo capítulo apresentará os resultados de simulação estática e dinâmica desses geradores elétricos projetados.

---

## CAPÍTULO 5

---

### RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Uma boa simulação das máquinas elétricas exige que o modelo utilizado represente todas as características físicas do sistema com maior fidelidade. Em geral, os modelos mais fiéis utilizam técnicas numéricas para a obtenção dos resultados, já que a solução analítica, muitas vezes, não é possível de ser determinada devido à complexidade geométrica dos dispositivos e a operação na região não linear dos materiais magnéticos que os compõem.

Um método que vem sendo bastante utilizado no desenvolvimento de soluções de campos em máquinas elétricas é o Método dos Elementos Finitos. O MEF é uma técnica de análise numérica generalista e que pode ser aplicada em diversas áreas de conhecimento tecnológico. As principais vantagens desse método são:

- a) Por utilizar uma solução aproximada a partir de uma função interpolada, a solução pode ser obtida em qualquer ponto do domínio, permitindo assim, uma análise local;
- b) Pode ser aplicado em geometrias complexas e irregulares (especialmente em casos onde os métodos clássicos são insatisfatórios);
- c) Devido a sua representação bem próxima ao real, reduz bastante a quantidade de protótipos a serem desenvolvidos.

Como se trata de uma técnica numérica, a solução é sempre aproximada e, caso o método não seja utilizado de forma adequada (por exemplo, uma definição incorreta do problema e das condições de contorno) os resultados obtidos serão incoerentes. Mas, a principal desvantagem do MEF está relacionada ao custo computacional da sua aplicação, principalmente que é realizada uma análise tridimensional. Em geral, tenta-se minimizar esse problema explorando ao máximo a simetria das estruturas (que geram a redução dos cálculos), bem como o refinamento da malha apenas em locais de maior concentração de campos.

As simulações estáticas dos GRVs-C foram desenvolvidas nos *softwares* Maxwell 3D/Ansys e FEMM (*Finit Element Method Magnetics*). Tanto o Maxwell 3D/Ansys quanto o FEMM realizam a simulação de campos eletromagnéticos em baixa frequência.

O modelo do GRV-C também é desenvolvido a partir das curvas de magnetização de cada gerador, adquiridas nos ensaios estáticos, com o objetivo de encontrar as respostas dinâmicas. Para isso, foi utilizado um modelo com o auxílio dos *softwares* Matlab® e Simulink® conforme será mostrado na seção 5.3 desse capítulo.

## 5.1 SOLUÇÃO DE PROBLEMAS USANDO O MEF

Os problemas eletromagnéticos são, em geral, definidos por campos vetoriais expressos na sua forma diferencial [72] conforme (5.1):

$$Z \sigma(P, t) = f(P, t) \quad (5.1)$$

sendo  $Z$  um operador diferencial (em geral linear),  $\sigma$  é a função a ser determinada e  $f$  a função de força. Tanto  $f$  quanto  $\sigma$  são funções da posição  $P$  do tempo  $t$ .

Em termos eletromagnéticos, a equação (5.1) pode ser dada, por exemplo, pela equação de Laplace (5.2), onde o operador  $Z$  é o laplaciano,  $\sigma$  é o potencial elétrico  $V_e$  (do tipo escalar ou vetorial) e  $f$  a distribuição de carga no domínio (5.2):

$$\nabla^2 V_e = 0 \quad (5.2)$$

O método dos elementos finitos realiza a solução do problema na forma integral. Assim como outras técnicas clássicas para solução de problemas de campo (Método de Galerkin ou Método de Rayleigh-Ritz), o MEF encontra uma função  $V^*$  que é a mais próxima possível de  $V_e$  dada por uma combinação de funções linearmente independentes (funções de base radiais) conforme:

$$V^*(P, t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot a_i = \varphi_1 \cdot a_1 + \varphi_2 \cdot a_2 + \varphi_3 \cdot a_3 + \dots + \varphi_n \cdot a_n \quad (5.3)$$

sendo  $\varphi$  as funções base radiais e  $a$  os coeficientes de interpolação.

O conceito base do MEF é subdividir a geometria do problema em pequenos elementos em que tanto a equação diferencial do problema quanto as condições de contorno são válidas. Diferente dos métodos clássicos, as funções de base radiais são definidas para cada subdomínio e não para o domínio completo.

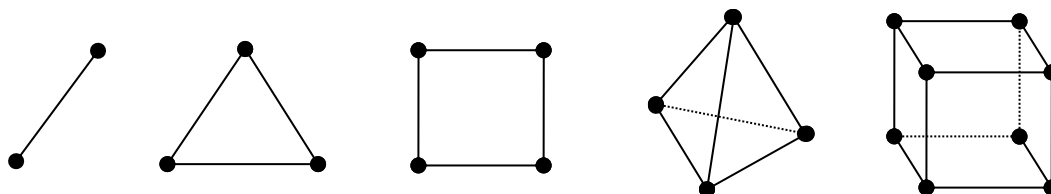
### 5.1.1 Passos para a solução de problemas usando o MEF

A resolução dos problemas em MEF são organizadas nos seguintes passos [72]:

#### a) Discretização do domínio

Inicialmente, o domínio é subdividido em pequenos elementos. Eles devem apresentar formas geométricas bem definidas e conectadas entre si conforme mostra a Figura 5.1. O elemento fundamental para problemas em duas dimensões é o triângulo e, em três dimensões, o tetraedro.

O tipo de elemento utilizado na Discretização da malha, dependerá da geometria do domínio. Em alguns casos, por exemplo, é mais conveniente utilizar elementos retangulares e não triangulares.



**Figura 5.1** – Exemplo de elementos utilizados na subdivisão do domínio.

A quantidade de elementos afeta a solução do problema. Em geral, quanto maior for o número de elementos utilizados melhor a precisão da solução do problema. Contudo, há um custo computacional. Desta forma, é essencial que a malha seja refinada apenas em locais onde ocorre a maior concentração de campos.

*b) Escolha da função de interpolação*

Nesta etapa, as funções de base radiais,  $\varphi_i$ , são escolhidas. O grau da função de base radial (ou função de interpolação) determina a precisão do resultado. Elas devem ser escolhidas de tal forma que a solução aproximada melhore com o aumento de número de funções utilizadas. Altas ordens polinomiais, podem trazer uma melhor precisão no resultado, contudo a formulação será mais complexa.

Observa-se que, como as funções de base radiais são definidas para cada elemento (ou subdomínio), é conveniente e vantajoso que seu valor seja nulo para todo o domínio, exceto no subdomínio em questão e seus adjacentes.

*c) Formulação do sistema*

O problema geral é formulado montando um sistema de equações que contemple todos os elementos do domínio. Qualquer método para solução de problema de campo tais como os citados (Galerkin ou Rayleigh-Ritz) pode ser utilizado para a formulação do problema. Contudo, eles devem ser aplicados para cada elemento separadamente.

*d) Solução do problema*

Após a formulação do problema e definição das condições de contorno do domínio, algoritmos numéricos são utilizados para a determinar a solução em cada elemento. Conhecendo a solução em cada elemento, é possível obter tanto a solução geral do domínio quanto soluções locais.

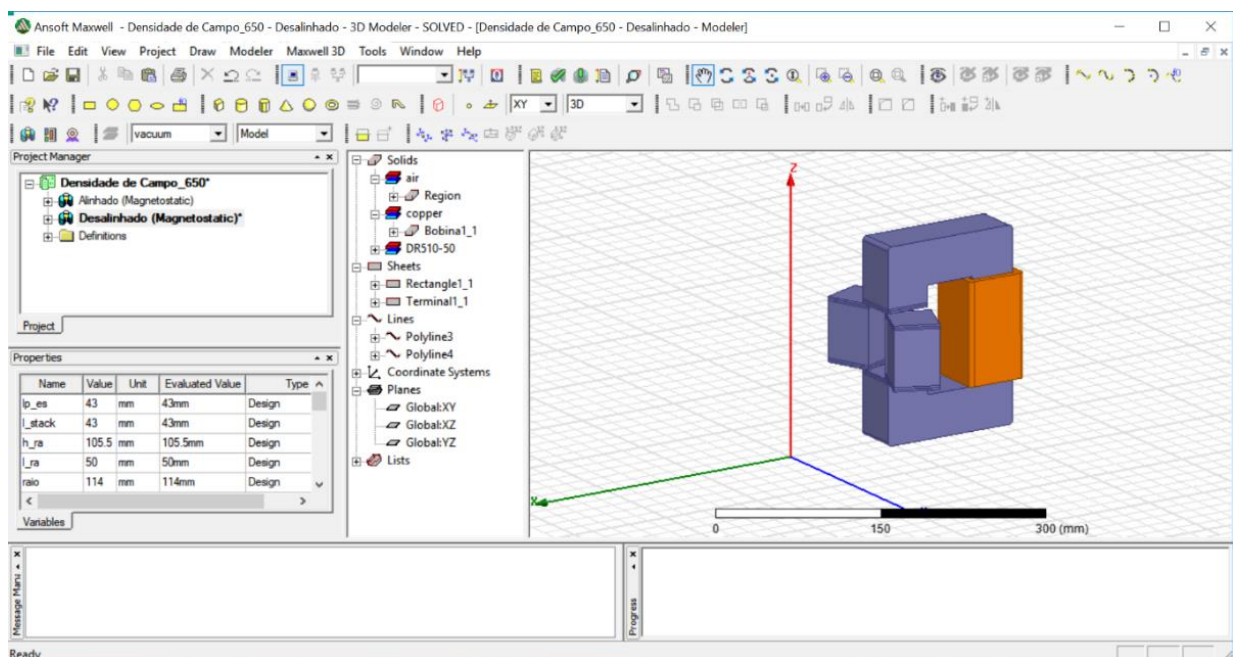


Os dois softwares de elementos utilizados neste projeto de doutorado, já realizam a discretização do domínio, a seleção das funções de base, a formulação do sistema e a solução do sistema de equações do problema. Ao final, são disponibilizados os valores dos campos nos elementos do domínio onde, é possível, calcular as grandezas desejadas tais como: indutância, conjugado, força entre outras.

## 5.2 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO ESTÁTICA

Devido à estrutura modular e simétrica do GRV-C, é necessário a simulação de apenas um núcleo C para a obtenção das características estáticas totais do gerador. Para isso, são utilizados como dados de entrada, nesta simulação, as dimensões físicas dos núcleos C dos geradores projetados no Capítulo 4 (Tabela 4.7) e a curva de magnetização do material DR5 10-50 (Figura 4.5).

Os modelos físicos dos geradores foram implementados no software Maxwell 3D. A Figura 5.2 ilustra o modelo físico do Gerador 1 em três dimensões no *software* Ansoft Maxwell. A corrente elétrica na bobina no núcleo é mantida constante durante a simulação estática com valor igual a 5 A. Os principais parâmetros da estrutura física de cada peça são mostrados na Tabela 5.1.



**Figura 5.2** – Modelo Físico do GRV-C do Maxwell 3D.

Tabela 5.1 – Características físicas das peças utilizadas.

	Material	Condutividade [S/M]	Permeabilidade Relativa [ad]
Estator	Steel DR5 10-50	1900000	Curva B-H
Rotor	Steel DR5 10-50	1900000	Curva B-H
Bobina	Cobre	58000000	0,99
Região	Vácuo	0	1,00

A bobina foi representada por um bloco sólido de cobre (sem espiras). No entanto, é imposta uma condição do tipo “*stranded*” na definição do circuito de excitação, fazendo com que o programa simule o comportamento como se fosse uma bobina composta de camadas (negligenciando o efeito pelicular). O número de espiras da bobina do gerador é definido na matriz de parâmetros referente ao pós-processamento.

As distribuições das linhas de campo e a densidade de campo magnético em cada núcleo C dos Geradores 1, 2 e 3 para as posições alinhadas e desalinhadas são apresentadas nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5. Os resultados das magnitudes das densidades de campo magnético no polo do estator para essas duas posições são mostradas na Tabela 5.2. Conforme esperado, as densidades de campo magnético nas posições alinhada encontram-se em torno de 1,4T, ou seja, na região do joelho da curva de magnetização do material magnético (Figura 4.5).

Tabela 5.2 – Magnitude do Campo Magnético no Polo do Estator.

	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3
Posição Alinhada	1,4 T	1,37 T	1,35T
Posição Desalinhada	0,12 T	0,13 T	0,12 T

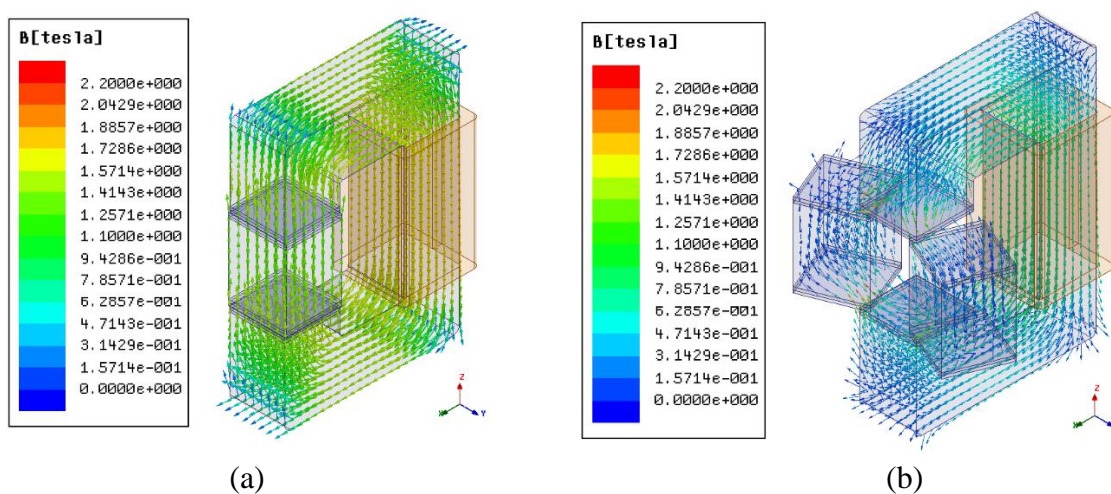
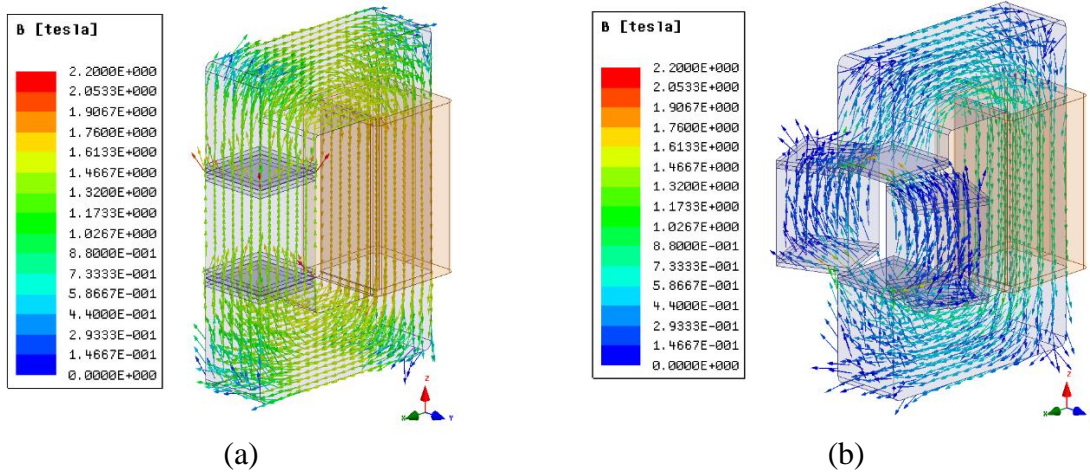
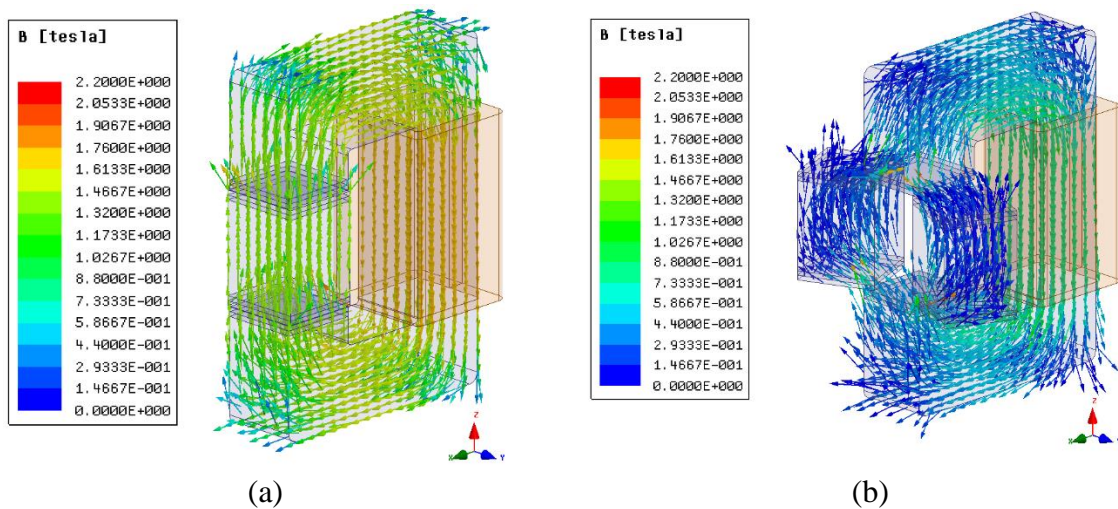


Figura 5.3 – Distribuição do Campo Magnético Gerador 1 (650 rpm): (a) alinhado; (b) desalinhado.



**Figura 5.4** – Distribuição do Campo Magnético Gerador 2 (1000 rpm): (a) alinhado; (b) desalinhado.



**Figura 5.5** – Distribuição do Campo Magnético Gerador 3 (1500 rpm): (a) alinhado; (b) desalinhado.

Os resultados do processo de refinamento da malha para o Gerador 1 na simulação de obtenção da densidade de campo nas posições alinhada e desalinhada são mostrados nas Tabela 5.3 e 5.4.

**Tabela 5.3** – Resultados do processo de refinamento de malha – Gerador 1 – Posição Alinhada.

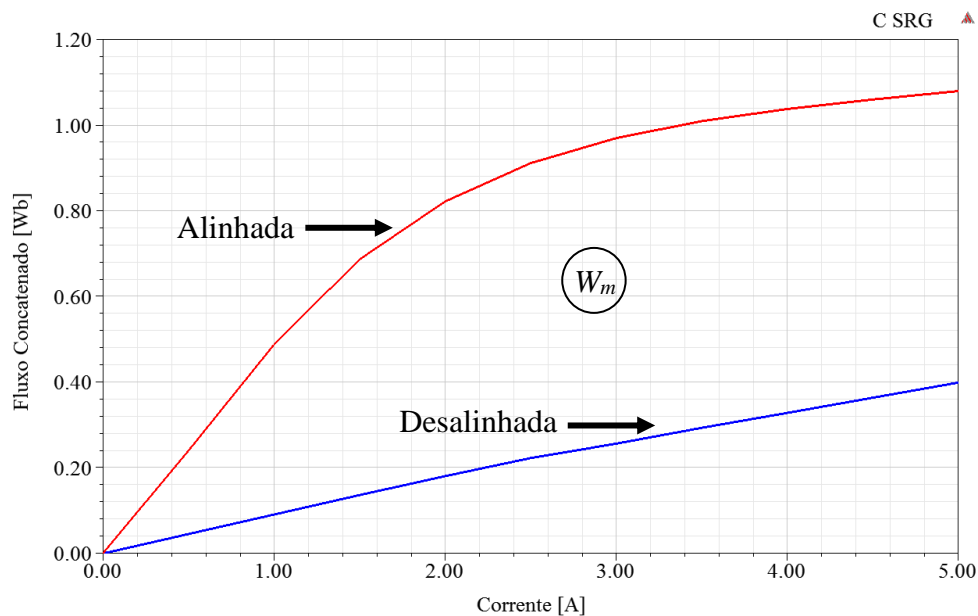
Passo	# Tetraedros	Energia total [J]	Erro percentual de energia [%]	Varição da energia [%]
1	10692	2,7166	33,619	N/A
2	13884	2,6981	8,5469	0,67922
3	18061	2,6927	3,3744	0,2023
4	23469	2,6899	1,4676	0,1029
5	30511	2,6889	0,75469	0,039327

Tabela 5.4 – Resultados do processo de refinamento de malha – Gerador 1 – Posição Desalinhada.

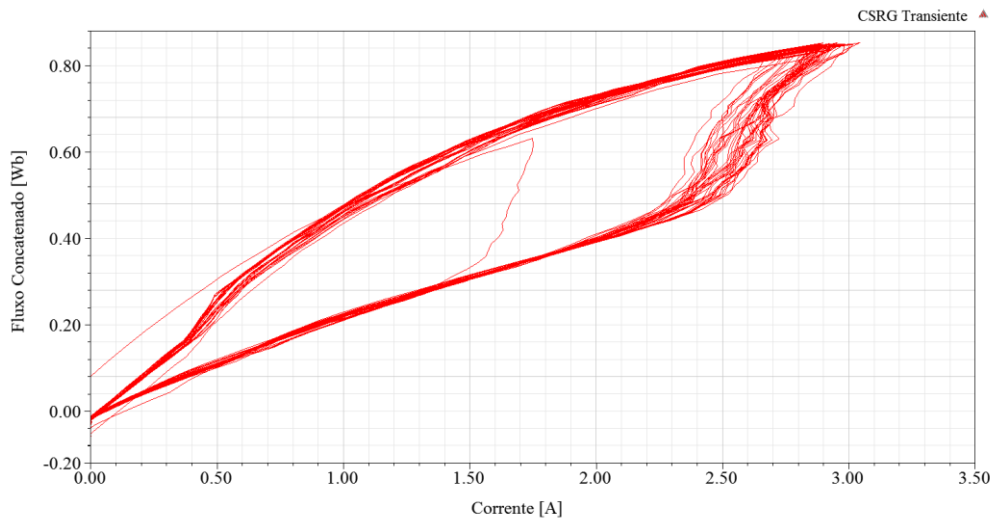
Passo	# Tetraedros	Energia total [J]	Erro percentual de energia [%]	Varição da energia [%]
1	10260	1,5308	188,49	N/A
2	13342	1,305	34,952	14,751
3	17347	1,2717	14,656	2,5572
4	22548	1,2572	6,9966	1,1335
5	29311	1,2499	3,9293	0,58146
6	38117	1,2462	2,2775	0,29977
7	49558	1,2471	1,4729	0,072852
8	64432	1,2454	1,0319	0,13945
9	83780	1,2443	0,70517	0,084931

O trabalho por ciclo ( $W_m$ ) realizado por cada núcleo do GRV-C é obtido calculando a área entre as curvas de fluxo magnético concatenado das posições alinhada ( $0^\circ$ ) e desalinhada ( $22,5^\circ$ ) dos polos, conforme a Figura 5.6. Desta forma, a potência elétrica estática máxima ( $P_{max\_est}$ ) é obtida a partir da equação (5.4):

$$P_{max\_est} = \frac{n'W_m m N_{ro}}{2\pi} \omega_{rot} \quad (5.4)$$

Figura 5.6 – Exemplo do cálculo do ciclo de trabalho  $W_m$ .

Observa-se  $P_{max\_est}$  seria a potência elétrica total caso a corrente elétrica permanecesse constante nos enrolamentos e se toda a curva de decrescimento da indutância fosse utilizada durante o estágio de geração elétrica. Durante a operação dinâmica esse fato não ocorre, conforme é ilustrado na Figura 5.7.

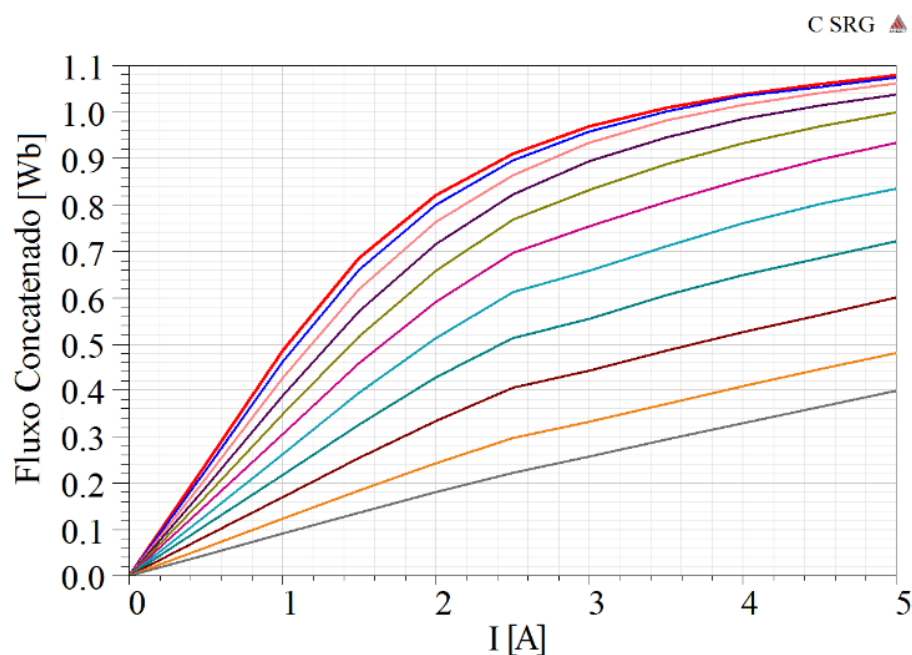


**Figura 5.7** – Exemplo do enlace de fluxo magnético durante operação dinâmica.

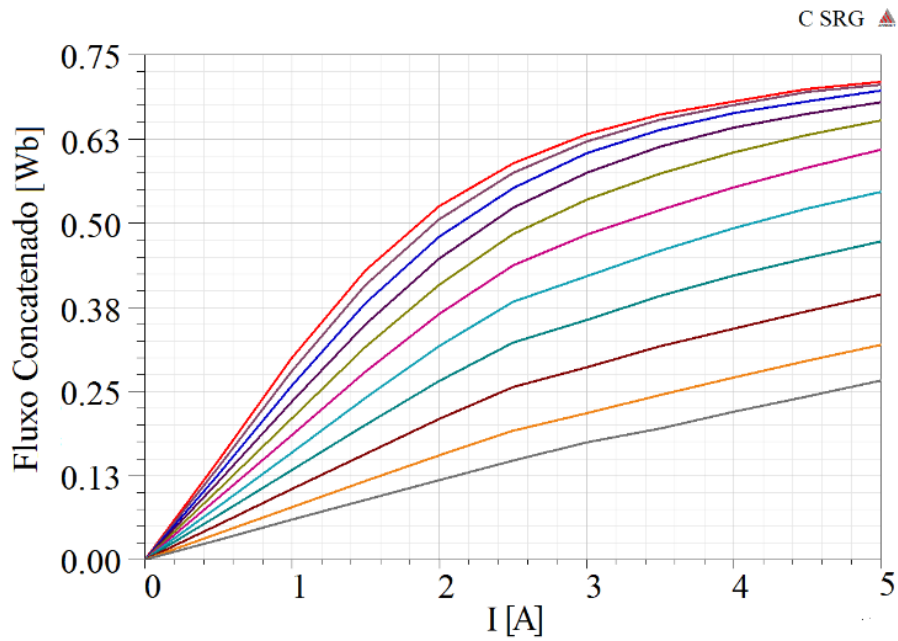
As potências estáticas totais calculadas por meio de (5.4) de cada GRV-C são mostradas na Tabela 5.5 e as curvas de magnetização para 11 posições diferentes entre os polos do estator e rotor de cada núcleo C são dadas nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10. As curvas de magnetização simuladas foram obtidas variando a corrente elétrica na bobina do estator de 0 até 5 A ( $I_{max}$ ) para as 11 posições diferentes entre os polos do rotor entre 0 a 22, 5°.

**Tabela 5.5** – Potência Estática Máxima: Gerador 1, 2 e 3.

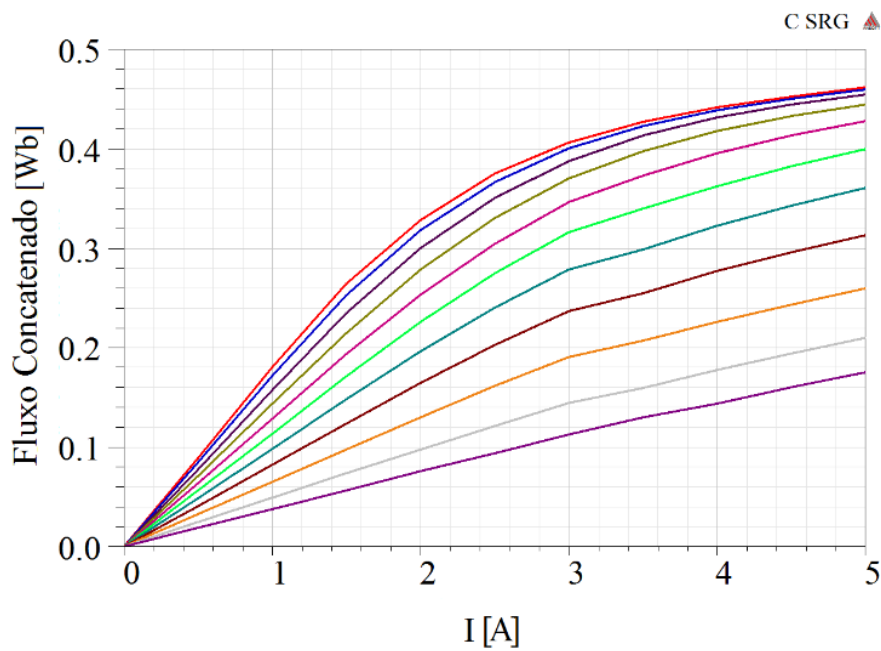
$P_{max\_est}$	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3
	2,93 kW	2,89 kW	2,73 kW



**Figura 5.8** – Curvas de Magnetização: Gerador 1 (650 rpm).



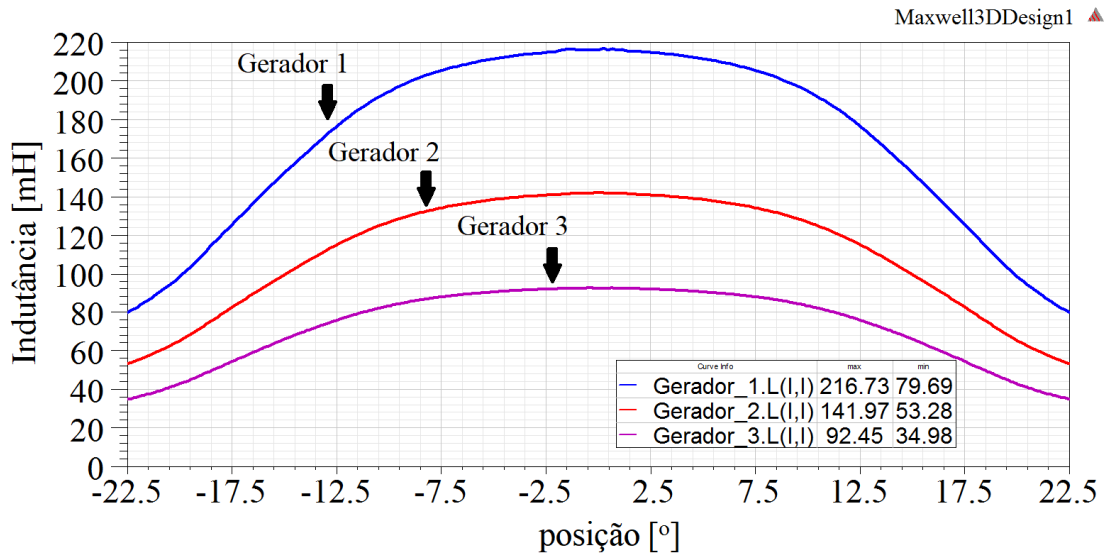
**Figura 5.9** – Curvas de Magnetização: Gerador 2 (1000 rpm).



**Figura 5.10** – Curvas de Magnetização: Gerador 3 (1500 rpm).

A Figura 5.11 ilustra o perfil de indutância para os Geradores 1, 2 e 3. Os valores das indutâncias  $L_a$  e  $L_u$  de cada gerador são mostrados na legenda. Com os valores de  $L_a$  e  $L_u$  é possível encontrar as tensões elétricas induzidas nos enrolamentos de fases dos geradores a partir da equação (3.4).

Também, as potências elétricas totais dos Geradores 1, 2 e 3 podem ser determinadas aplicando em (3.16) os respectivos valores de  $L_a$  e  $L_u$ , bem como os demais parâmetros solicitados na equação que foram apresentados na Tabela 4.7 (tabela com as dimensões finais dos núcleos C de cada gerador) e na Tabela 5.2 (tabela com as densidades de fluxo magnético na posição alinhada de cada gerador). Os valores obtidos de  $P_{ele}$  e  $E_{ind}$  são mostrados na Tabela 5.6.



**Figura 5.11** – Indutâncias: Gerador 1 (650 rpm), Gerador 2 (1000 rpm) e Gerador 3 (1500 rpm).

**Tabela 5.6** – Potência Elétrica e Tensão Induzida.

	$P_{ele}$	$E_{ind}$
<b>Gerador 1</b>	1,638 kW	124,1 V
<b>Gerador 2</b>	1,583 kW	121,8 V
<b>Gerador 3</b>	1,578 kW	122,4 V

Os modelos físicos dos GRVs-C também foram simulados com o uso do método dos elementos finitos em duas dimensões, utilizando o FEMM (que é um software gratuito e aberto), como ilustram as Figura 5.12 e 5.13 para o Gerador 1. Destaca-se que foram aplicados os fatores  $k_a$  e  $k_u$  para a correção dos valores de indutância nesta simulação.

Os resultados das indutâncias nas posições alinhadas e desalinhadas, das potências elétricas totais e das tensões elétricas induzidas no enrolamento de fase calculadas por meio do MEF-2D são apresentadas nas Tabelas 5.7 e 5.8 e comparadas com os resultados obtidos pelo MEF-3D. Conforme esperado, os valores obtidos estão próximos, apresentando erros percentuais relativos ao MEF-3D abaixo de 10%.

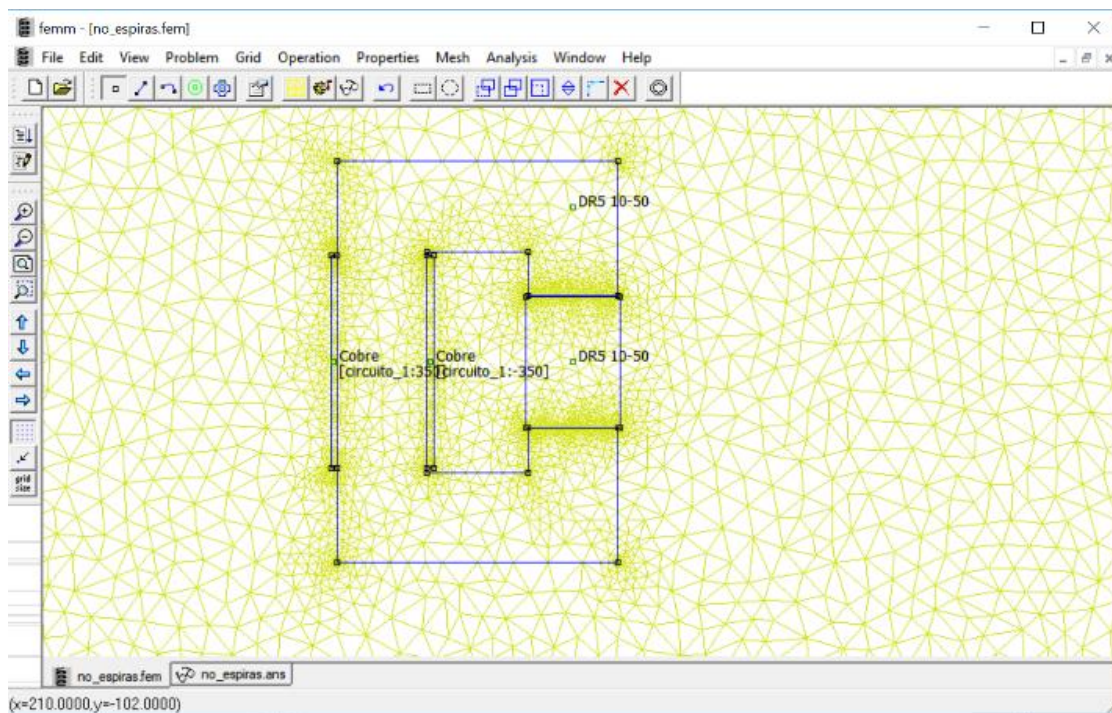


Figura 5.12 – Modelo Físico do Gerador 1 no FEMM.

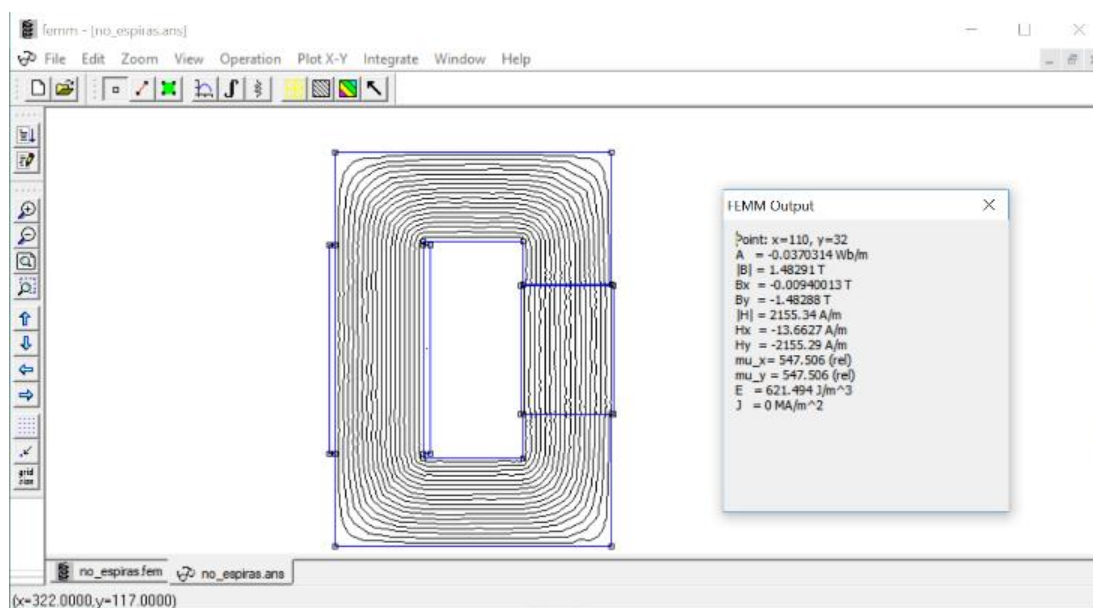


Figura 5.13 – Distribuição das Linhas de Campo Magnético para o Gerador 1 no FEMM.

Tabela 5.7 – Comparação dos Resultados Estáticos: Indutância.

	Gerador 1		Gerador 2		Gerador 3	
	$L_a$ (mH)	$L_u$ (mH)	$L_a$ (mH)	$L_u$ (mH)	$L_a$ (mH)	$L_u$ (mH)
<b>MEF – 2D (corrigido)</b>	216,50	76,90	141,80	50,80	92,30	31,90
<b>MEF – 3D</b>	216,73	79,69	141,97	53,28	92,45	34,98
<b>Erro Percentual Relativo</b>	0,106%	3,50%	0,12%	4,80%	0,16%	8,81 %



Tabela 5.8 – Comparação dos Resultados Estáticos:  $P_{ele}$  e  $E_{ind}$ .

	Gerador 1		Gerador 2		Gerador 3	
	$P_{ele}$ (kW)	$E_{ind}$ (V)	$P_{ele}$ (kW)	$E_{ind}$ (V)	$P_{ele}$ (kW)	$E_{ind}$ (V)
<b>MEF – 2D (corrigido)</b>	1,65	120,95	1,65	122,34	1,71	120,74
<b>MEF – 3D</b>	1,64	124,1	1,58	121,8	1,58	122,4
<b>Erro Percentual Relativo</b>	-0,61%	2,54%	-4,43%	-0,44%	-8,23%	1,36%

O volume do núcleo magnético do GRV-C (estator + rotor) é inversamente proporcional a velocidade nominal de operação. O Gerador 3, cuja velocidade nominal de operação é maior do que dos Geradores 1 e 2, possui um volume menor em relação aos outros dois, como é mostrado na Tabela 5.9. Conseqüentemente, as perdas no núcleo magnético também serão menores [66], [59].

Tabela 5.9 – Volume dos Núcleos Magnéticos.

	Estator (mm <sup>3</sup> )	Rotor (mm <sup>3</sup> )	Total (mm <sup>3</sup> )
<b>Gerador 1 (650 rpm)</b>	$775,512 \cdot 10^3$	$121,905 \cdot 10^3$	$897,417 \cdot 10^3$
<b>Gerador 2 (1000 rpm)</b>	$486,298 \cdot 10^3$	$72,557 \cdot 10^3$	$558,855 \cdot 10^3$
<b>Gerador 3 (1500 rpm)</b>	$322,742 \cdot 10^3$	$51,136 \cdot 10^3$	$373,878 \cdot 10^3$

A Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 apresentam o comportamento das forças instantâneas no eixo x, y e z dos Geradores 1, 2 e 3 respectivamente. Conforme discutido no Capítulo 3, o conjugado eletromagnético é produzido principalmente devido à força na direção tangencial (eixo y). As forças direção radial (eixo x) e na direção normal (eixo z) são inferiores a força que atuam na direção tangencial.

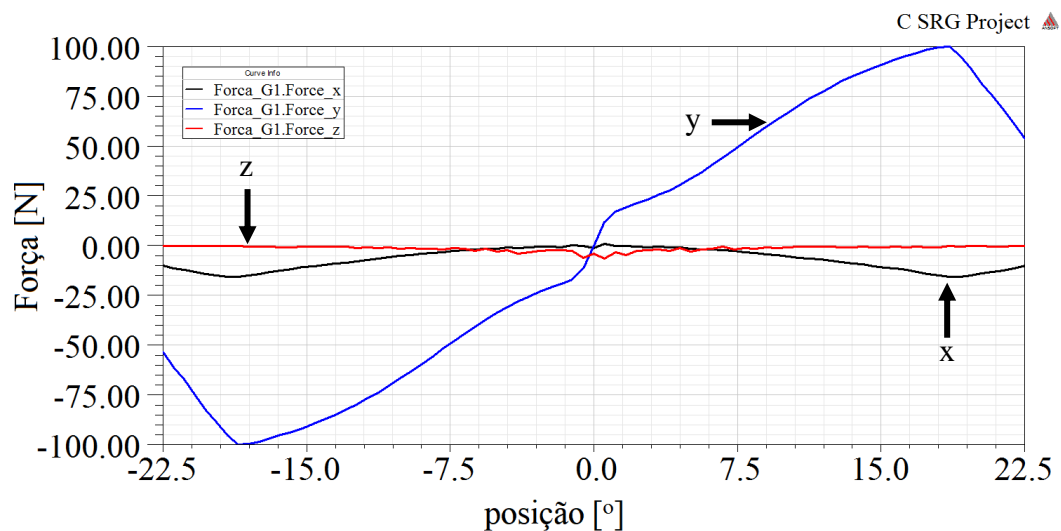
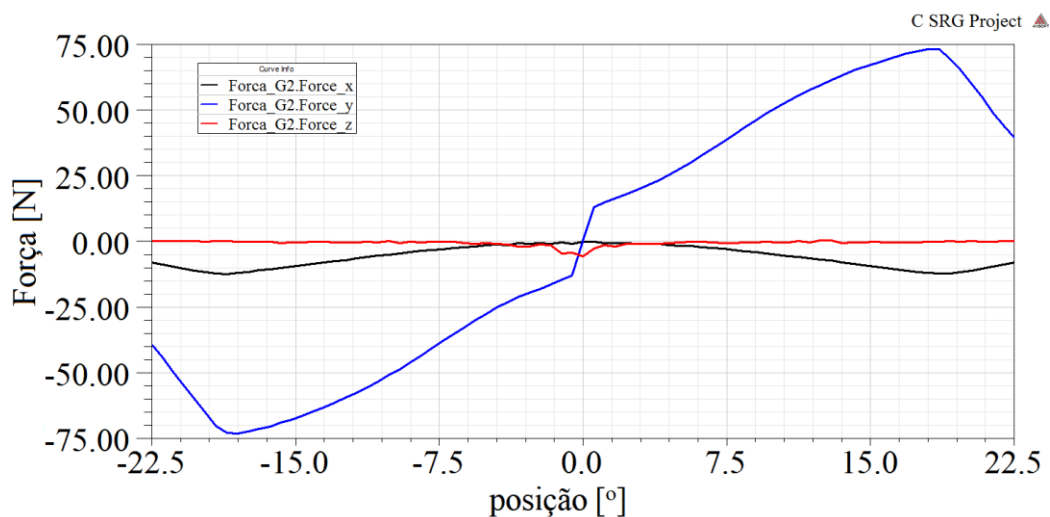
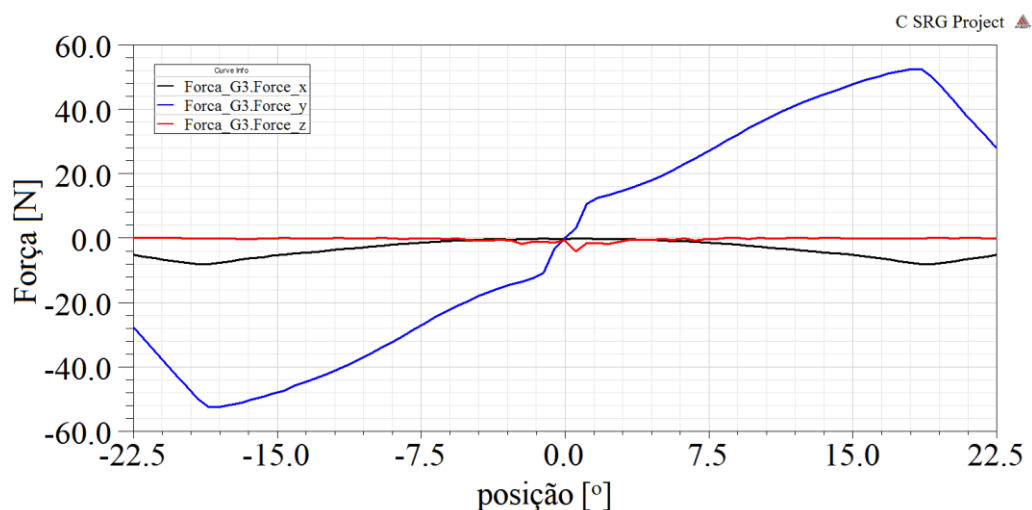


Figura 5.14 – Forças nos eixos x,y e z do Gerador 1 (650 rpm).



**Figura 5.15** – Forças nos eixos x,y e z do Gerador 2 (1000 rpm).



**Figura 5.16** – Forças nos eixos x,y e z do Gerador 3 (1500 rpm).

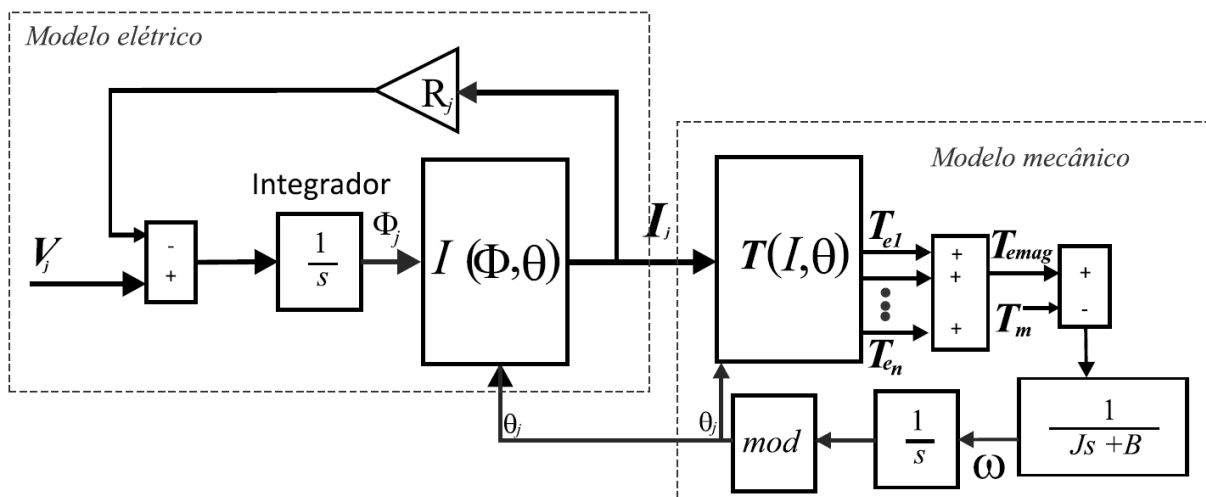
### 5.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DINÂMICA

O modelo dinâmico do GRV-C é desenvolvido a partir das curvas de magnetização de cada gerador elétrico adquiridas nos ensaios estáticos. A simulação dinâmica apresenta o desempenho das correntes elétricas nas fases, tensão e potência elétrica gerada no barramento dos GRVs-C sob condição de carga em função do tempo. A análise desses comportamentos permite saber se os projetos dos geradores atendem as normas exigidas e possibilita que ajustes possam ser realizados antes da fabricação do protótipo.

Os procedimentos para a obtenção desses modelos foram descritos com detalhes em [3], [5] e [73]. Os principais fundamentos dessa técnica de modelagem serão apresentados, de forma resumida, no presente capítulo.

### 5.3.1 Modelo do GRV-C baseado nas curvas de magnetização

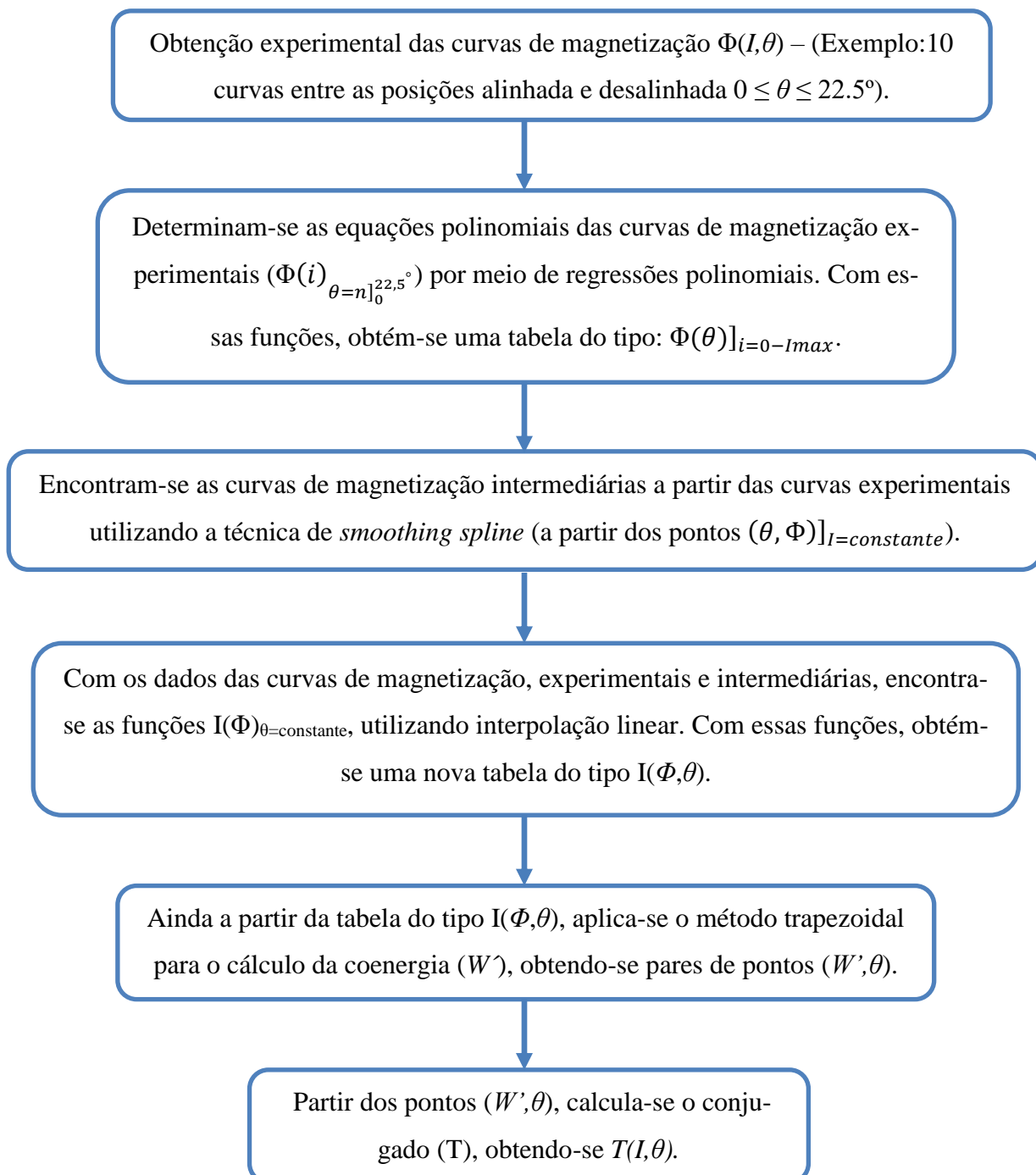
A representação por fase do GRV-C é dada pelo modelo indicado na Figura 5.17. As relações  $I(\Phi, \theta)$  e  $T(I, \theta)$  representam, respectivamente, a matriz contendo os valores das correntes elétrica de fase em função da curva de magnetização e posição e a matriz do conjugado eletromagnético em função da corrente e posição angular. Observa-se que esse modelo utiliza  $I(\Phi, \theta)$  e  $T(I, \theta)$  na representação do comportamento elétrico e mecânico respectivamente.



**Figura 5.17** – Representação por fase do GRV-C – Fonte: T. A. S. Barros, Propostas de Controles de Potência e Otimização do Desempenho do Gerador de Relutância Variável Aplicado em Geração Eólica Conectada à rede Elétrica de Baixa Tensão, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 2015 [5].

Essas duas relações podem ser encontradas a partir das curvas de magnetização do gerador utilizando: (1) equações analíticas [74]; (2) algoritmos inteligentes que utilizam lógica fuzzy ou redes neurais [75], [76] e (3) ou por meio de tabelas geradas a partir dos pontos das curvas de magnetização (metodologia adotada no presente trabalho).

O fluxograma da Figura 5.18 ilustra as etapas adotadas neste trabalho para a obtenção das relações  $I(\Phi, \theta)$  e  $T(I, \theta)$ . Neste método, quanto maior for o número de curvas de magnetização conhecidas, melhor é a precisão do modelo do GRV-C.



**Figura 5.18** – Etapas para a obtenção de  $I(\Phi, \theta)$  e  $T(I, \theta)$ .

### 5.3.2 Respostas Dinâmicas

As respostas dinâmicas dos geradores elétricos do tipo C foram obtidas implementando o modelo baseado nas curvas de magnetização no software Matlab® e, utilizando o *toolbox* Simulink®, foi acoplado o sistema de controle de tensão elétrica conforme mostra a Figura 5.19.

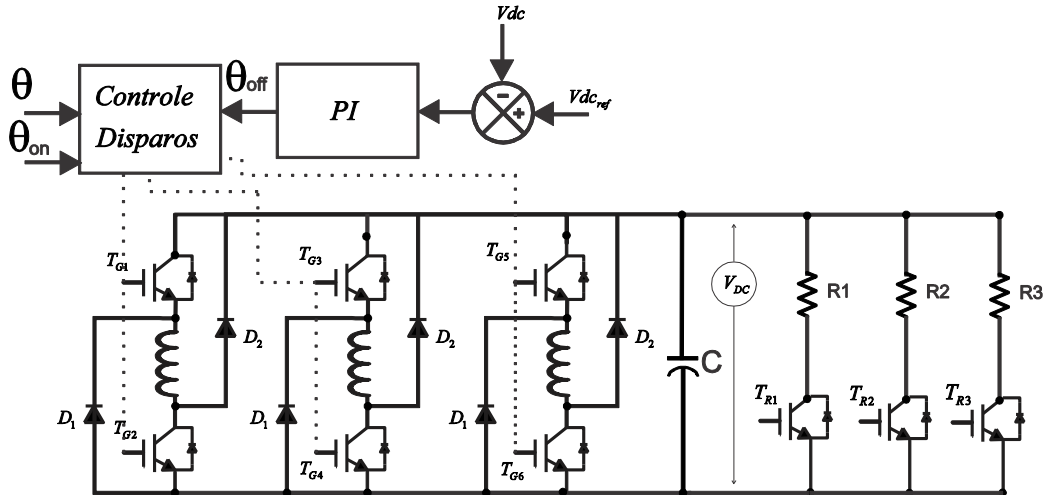


Figura 5.19 – Conversor eletrônico de potência e o sistema de controle para acionamento do GRV-C.

O sistema de controle de tensão foi desenvolvido para manter a tensão elétrica no barramento CC constante mesmo após a inserção de carga. Utiliza-se um compensador proporcional integral que ajusta o ângulo de desligamento ( $\theta_{off}$ ) a partir do erro entre a tensão de referência e o valor medido da tensão do barramento CC.

Os GRVs-C operam autoexcitados, ou seja, não necessitam de outra fonte para magnetização. A tensão inicial no capacitor do elo CC é de 180V. Durante o ensaio, são inseridas gradativamente três cargas (R1, R2, R3) de 500W. O sistema é iniciado com a carga R1 conectada no barramento CC. As cargas R2 e R3 são conectadas nos instantes 1,4s e 2,5s respectivamente.

De acordo com as Figuras 5.20, 5.21 e 5.22 observam-se que os GRVs-C projetados geraram a potência de 1,5kW nas velocidades nominais de operação.

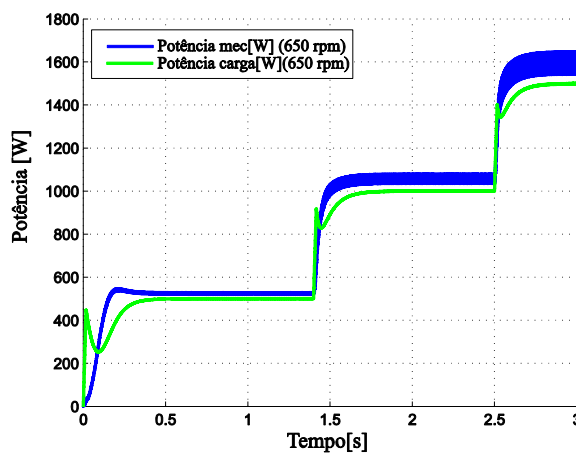


Figura 5.20 – Potência mecânica e potência nas cargas para o Gerador 1.

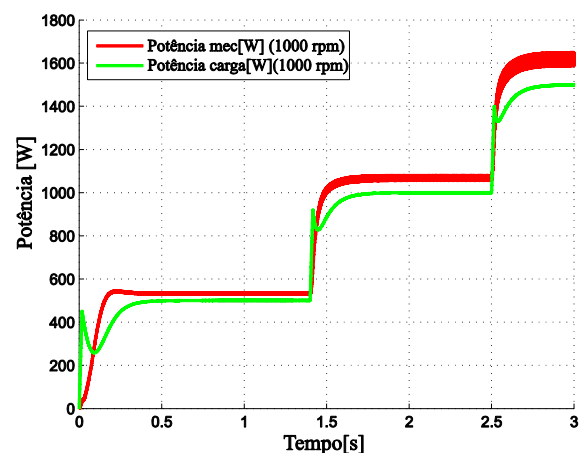


Figura 5.21 – Potência mecânica e potência nas cargas para o Gerador 2.

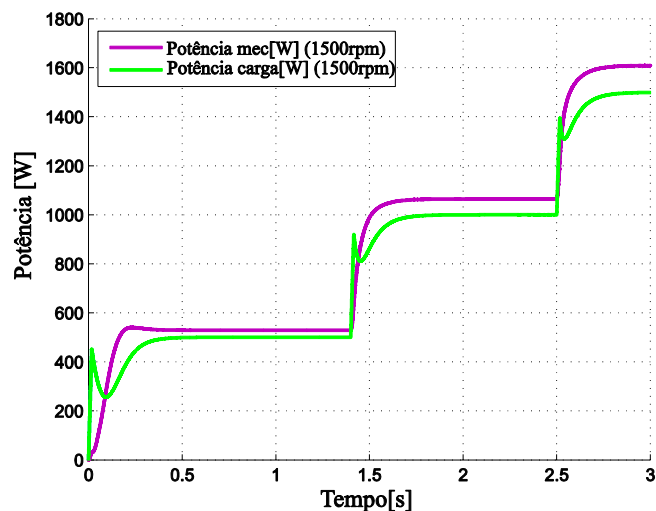


Figura 5.22 – Potência mecânica e potência nas cargas para o Gerador 3.

Além disso, o sistema de controle manteve a tensão em 180V para os três geradores elétricos simulados após a inserção das cargas – Figura 5.23.

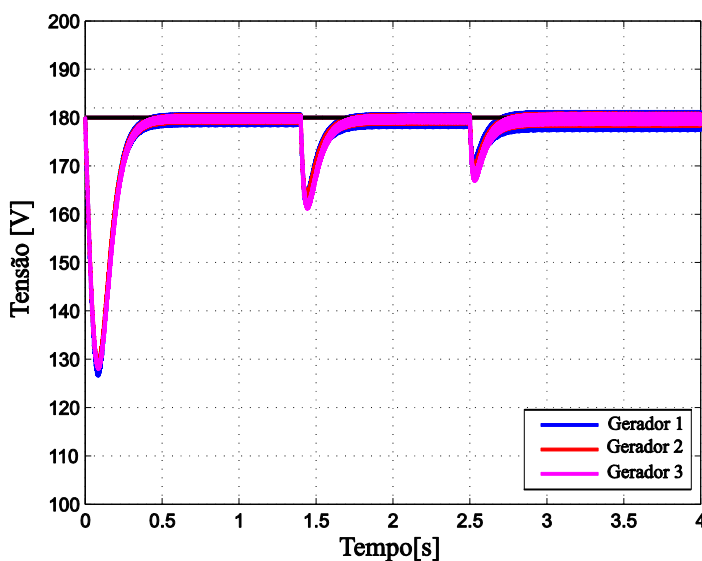


Figura 5.23 – Tensão no barramento CC para os três GRVs-C projetados.

Na Fig. 5.24, observam-se os valores das correntes elétricas da Fase A de cada GRV-C no período em que a potência gerada é de 1500W. A corrente total de fase é composta pela soma das correntes dos quatro polos ativos a cada ciclo, conforme mostrado na Figura 3.8. Nota-se que a corrente cresce no período de geração nos três GRVs-C projetados. Deste modo, o fator de penalidade de excitação e, conseqüentemente, as perdas elétricas são menores [66], [59].

Define-se como fator de penalidade de excitação a relação entre a corrente de magnetização (durante o período de excitação) e a corrente total de saída do gerador elétrico. Quanto

menor for essa relação, melhor é o rendimento do sistema. Segundo [5], para uma boa magnetização de um gerador de relutância, essa relação deve estar abaixo de 0,4.

A forma de onda da corrente elétrica total de saída do GRV-C possui relação direta com a tensão de excitação dos enrolamentos (durante a fase de excitação) e da força contra-eletromotriz gerada (durante a fase de geração). Quando a força contra-eletromotriz gerada é maior do que a tensão de excitação, a corrente elétrica de saída aumenta durante a fase de geração. Esse comportamento reduz o fator de penalidade de excitação do sistema, melhorando, assim, o seu rendimento.

Desconsiderando as perdas magnéticas, as potências elétricas totais e mecânicas ( $P_{mec}$ ) foram obtidas para cada simulação e o rendimento foi calculado – Tabela 5.7. Os três geradores elétricos projetados apresentaram um rendimento acima de 92%, valor considerado de alto desempenho em máquinas elétricas desse porte [77].

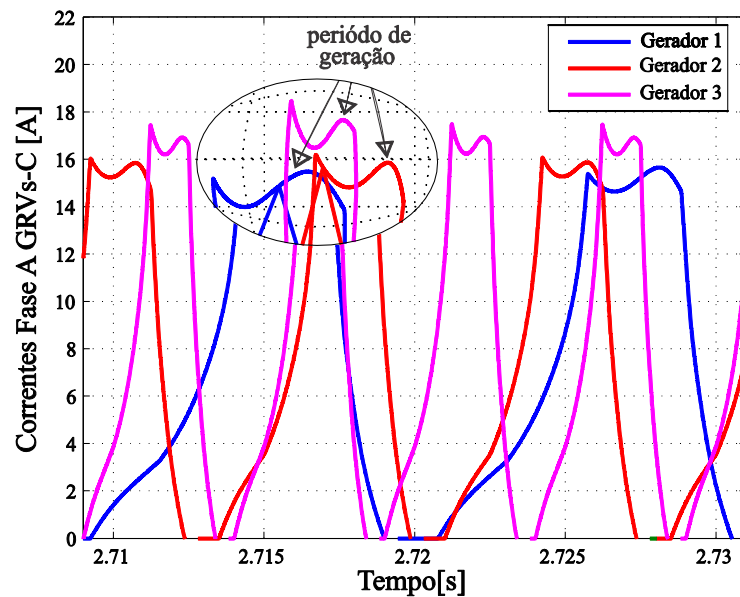


Figura 5.24 – Correntes nas Fases A dos GRVs-C projetados.

Tabela 5.10 – Comparação dos Resultados: Potências e Rendimento.

	$P_{ele}$ (kW)	$P_{mec}$ (kW)	Rendimento
<b>Gerador 1 (650 rpm)</b>	1,500	1612	0,93
<b>Gerador 2 (1000 rpm)</b>	1,500	1621	0,925
<b>Gerador 3 (1500 rpm)</b>	1,500	1595	0,94

## 5.4 CONCLUSÃO

Nesse capítulo são apresentados os resultados de simulação dos geradores elétricos projetados no capítulo 4 a partir da metodologia proposta. Foi discutido, em linhas gerais, como são determinadas as soluções de problemas eletromagnéticos com do Método dos Elementos Finito para a realização da simulação estática e com o modelo implementado no Matlab/Simulink para a realização da simulação dinâmica. Na sequência, foram apresentados os resultados estáticos e dinâmicos obtidos para cada GRV-C com o objetivo de comprovar a viabilidade e eficiência da metodologia de projeto desenvolvida. No próximo capítulo serão mostrados os resultados estáticos experimentais de um dos núcleos C do GRV-C. O Gerador 3 foi escolhido para a construção do protótipo do núcleo C, contudo, as suas dimensões e o número de espiras foram reajustados devido a necessidade de alteração do material magnético utilizado durante o seu processo de fabricação.



---

## CAPÍTULO 6

---

### **VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DA METODOLOGIA PROPOSTA**

Um protótipo do GRV-C foi construído a fim de validar a metodologia proposta. Nesta fase do projeto, foi implementado apenas um núcleo C do GRV-C. Devido à estrutura modular e simétrica do GRV-C, um único núcleo C é suficiente para a obtenção das características estáticas conforme ressaltado previamente. Foi escolhido para fabricação o Gerador 3 apresentado no Capítulo 4. Durante o processo de construção do protótipo, foi necessário modificar o material magnético do núcleo, adequando-se ao material que estava disponível na empresa de fabricação. Desta forma, as dimensões e o número de espiras do núcleo C do Gerador 3 foram reajustados, dando origem ao projeto de um quarto GRV-C.

Neste capítulo são apresentados os resultados de simulação computacional e experimentais do protótipo do núcleo C construído.

#### 6.1 CARACTERÍSTICAS DO PROTÓTIPO

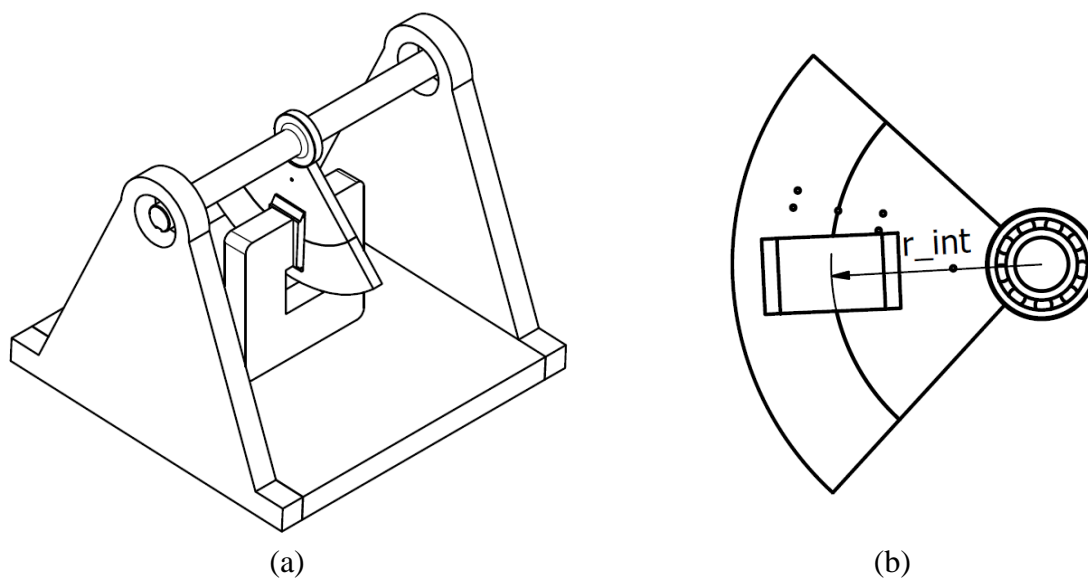
O ajuste nas dimensões do núcleo magnético C e da bobina de fase foi realizado seguindo a sistemática apresentada no Capítulo 4. Também, foi projetado o modelo da base de sustentação do núcleo para a realização do ensaio, conforme ilustra a Figura 6.1.

A Figura 6.2 apresenta as vistas do núcleo magnético. Os valores dos parâmetros construtivos do núcleo C são apresentados na Tabela 6.1.

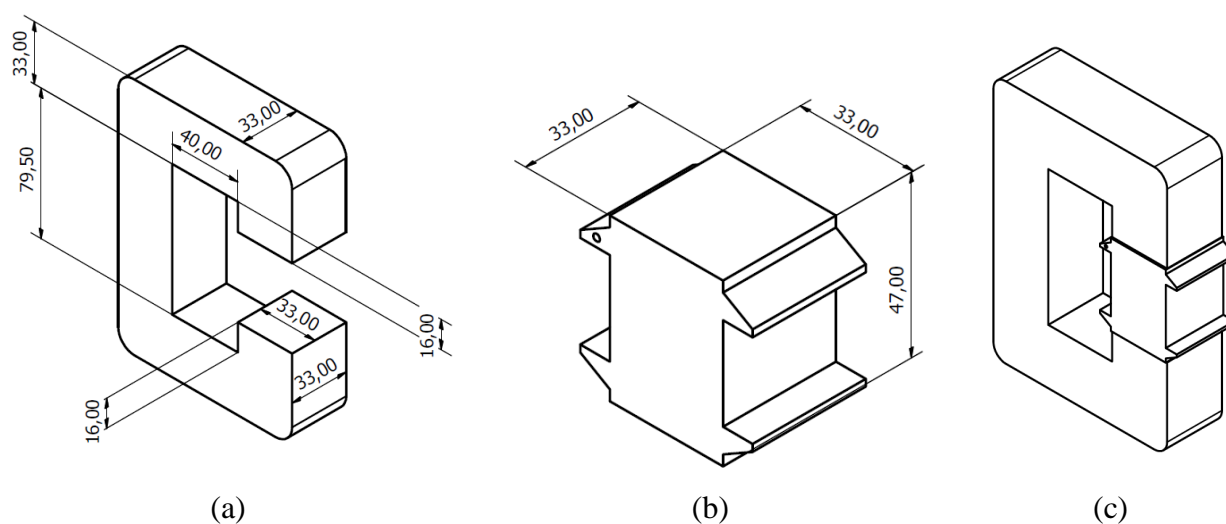
Para a construção do protótipo foram estabelecidos os seguintes critérios de montagem:

- estator (núcleo C) e rotor (bloco magnético) deve ser do mesmo material magnético;
- a seção de disco, onde o bloco magnético do rotor está inserido, deve ser de material não magnético (ou seja, possui apenas a função de sustentação do bloco do rotor);
- o conjunto rotor e seção de disco funciona como um pêndulo mecânico, cujo deslocamento em relação ao eixo deve variar entre  $-22,5^\circ$  a  $22,5^\circ$ ;
- a base de sustentação deve garantir a manutenção do entreferro durante o ensaio.

Após essas definições, o projeto foi enviado para a empresa Equacional S.A.® que foi responsável pela confecção do protótipo.



**Figura 6.1** – Modelo do protótipo: (a) vista completa do protótipo; (b) vista superior da parte móvel.



**Figura 6.2** – Vistas em perspectiva do protótipo com as dimensões: (a) estator; (b) rotor; (c) estator e rotor.

**Tabela 6.1** – Parâmetros do protótipo do GRV-C

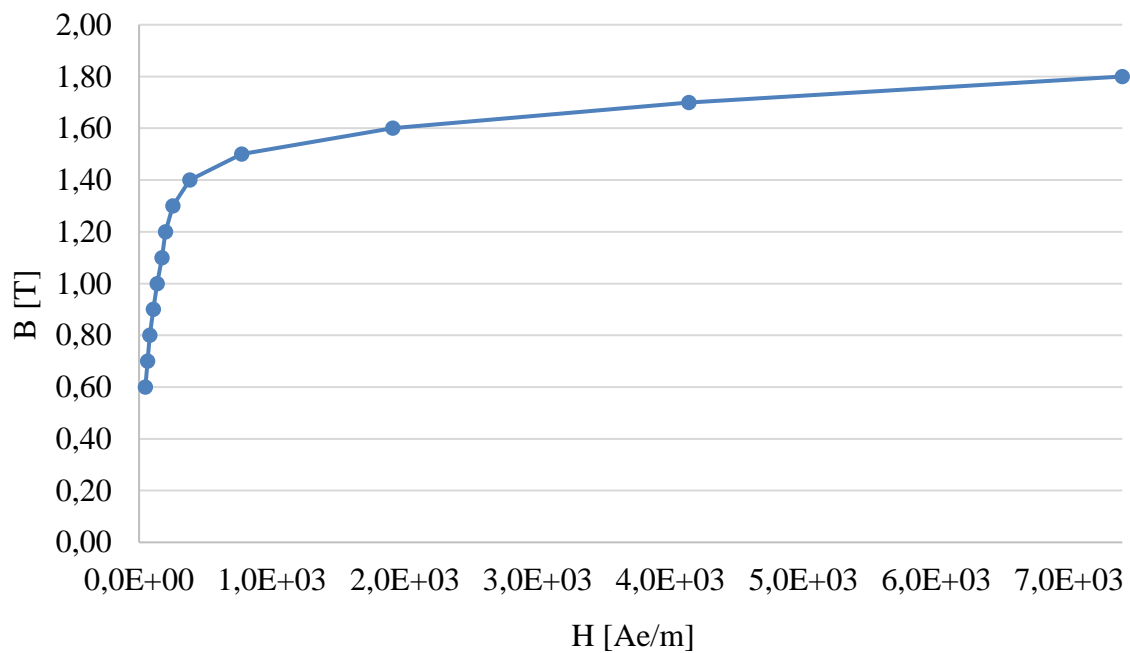
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Número de polos do estator ( $N_{es}$ )	12	Número de polos do rotor ( $N_{ro}$ )	8
Arco polar do estator ( $\beta_{es}$ )	0,387	Arco polar do rotor ( $\beta_{ro}$ )	0,387
Largura do polo do estator ( $l_{es}$ )	33 mm	Largura do polo do rotor ( $l_{ro}$ )	33 mm
Altura do polo do estator ( $h_{es}$ )	16 mm	Altura do polo do rotor ( $h_{ro}$ )	47 mm
Comprimento da ranhura ( $l_{slot}$ )	40 mm	Altura da ranhura ( $h_{slot}$ )	79,5 mm
Comprimento polo do estator ( $l_{ce}=l_r$ )	33 mm	Comprimento polo do rotor ( $l_{cr}=l_r$ )	33 mm
Raio interno do rotor ( $r_{int}$ )	84 mm	Entreferro ( $l_{gap}$ )	0,25 mm
Número de espiras por núcleo C ( $N_{esp}$ )	295	Corrente máxima ( $I_{max}$ )	5 A
Material magnético do estator e rotor	E 230	Material da seção de disco do rotor	AISI 304

O material magnético utilizado na fabricação do núcleo foi o aço-silício E230. A curva de magnetização, fornecida pelo fabricante, é dada na Figura 6.3.

As principais características elétricas da bobina são:

- Fio de cobre esmaltado da bobina: AWG 18
- Resistência da bobina: 1,07  $\Omega$

Resistência de isolamento: > 200 G $\Omega$

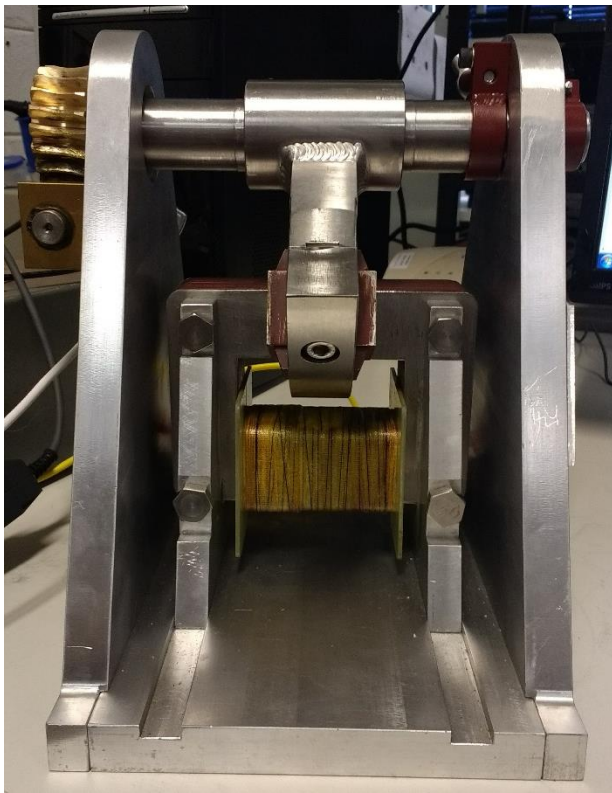


**Figura 6.3** – Curva de magnetização do aço-silício E 230.

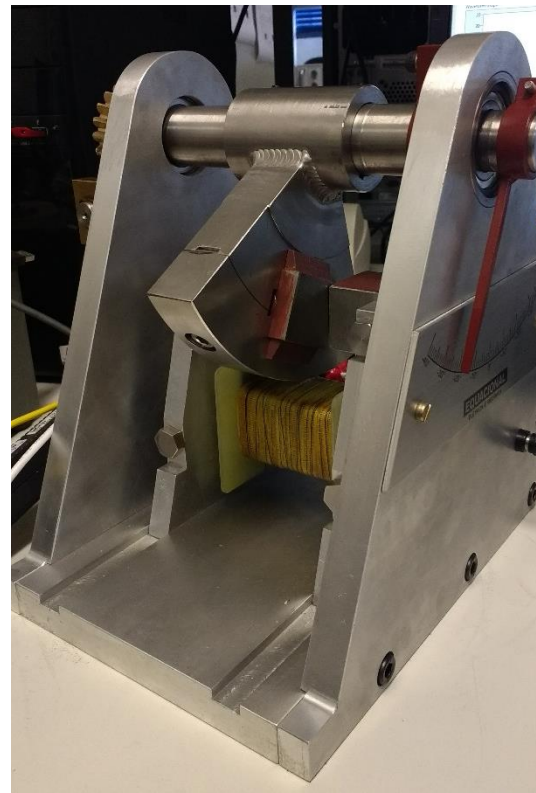
Outras características do protótipo relacionadas as partes mecânicas de sustentação são mostradas na Tabela 6.2. As fotos do protótipo são ilustradas na Figuras 6.4.

**Tabela 6.2** – Parâmetros do protótipo do GRV-C

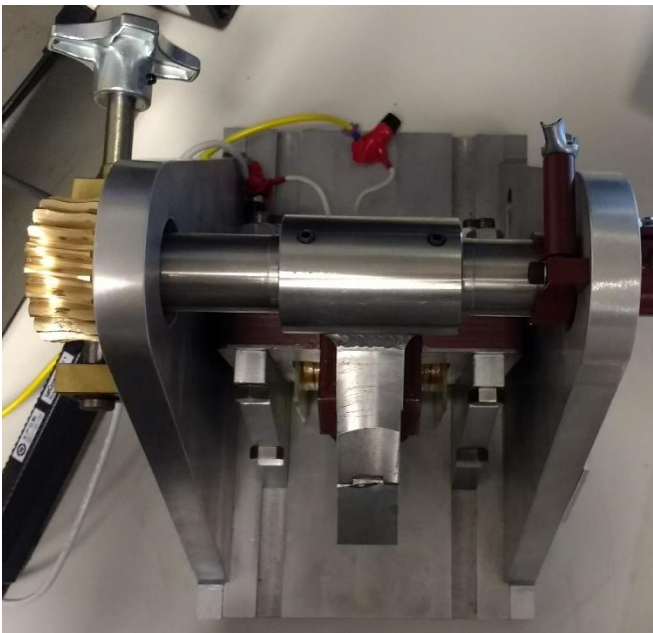
Peça	Material	Peça	Material
Suporte e Base do núcleo C	Liga 1060	Eixo	AISI 304
Rolamento 16005	Aço fundido	Anél Elástico	SAE 1070
Chaveta	AISI 304	Pinos Guia do Núcleo C	AISI 304
Porca Sextavada M10	-	Arruela DIN 128 – A10	-
Arruela DIN 128 – A8	-	Parafuso Allen 4762 M8 x 25 – 25 C	Classe 12.9



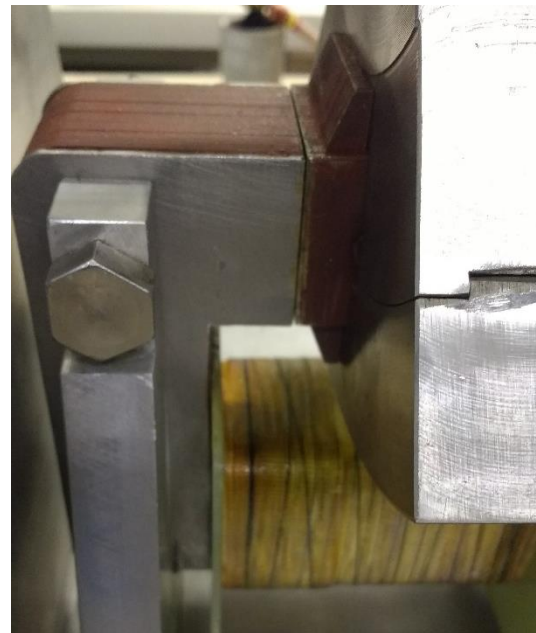
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 6.4** – Fotos do protótipo desenvolvido: (a) vista lateral; (b) perspectiva isométrica; (c) vista superior; (d) detalhes do entreferro.

## 6.2 RESULTADOS ESTÁTICOS DE SIMULAÇÃO

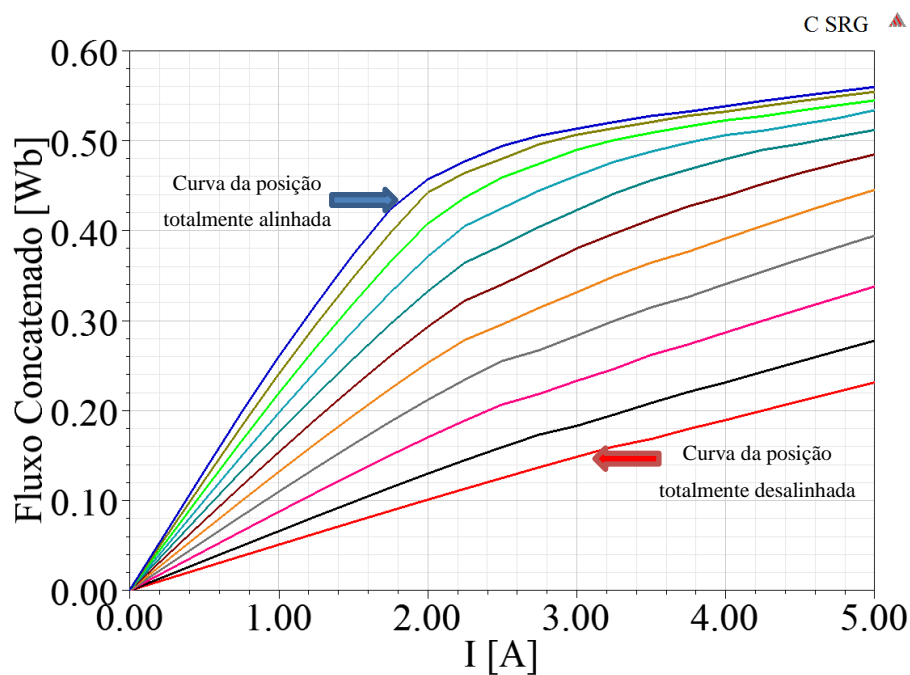
Similar aos testes realizados no capítulo 5, as simulações estáticas foram desenvolvidas no *software* Maxwell 3D (Ansys). Os resultados das magnitudes das densidades de campo no polo do estator para essas posições são mostrados na Tabela 6.3.

**Tabela 6.3 – Magnitude do Campo Magnético no Polo do Estator.**

	<b>Protótipo</b>
Posição Alinhada	1,41 T
Posição Desalinhada	0,17 T

Conforme esperado, a densidades de campo na posição alinhada encontra-se em torno de 1,4T, ou seja, na região do joelho da curva de magnetização do material magnético como pode ser observado na Figura 6.3.

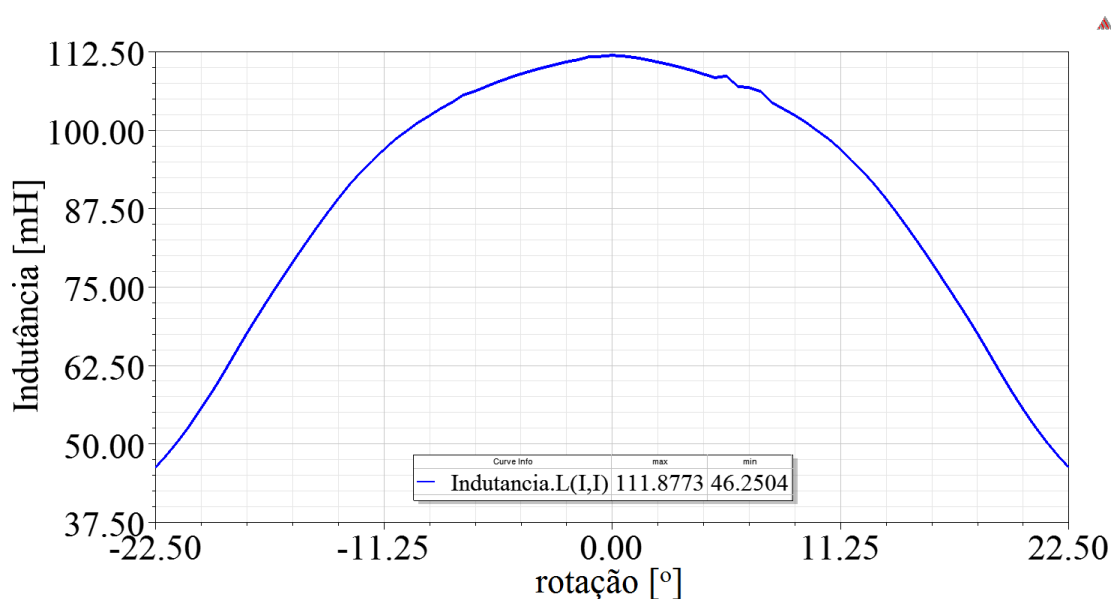
As curvas de magnetização são mostradas na Figura 6.5. A partir das curvas nas posições alinhada ( $0^\circ$ ) e desalinhada ( $22,5^\circ$ ), é calculada a potência elétrica estática máxima ( $P_{max\_est}$ ) utilizando a equação 5.1. A potência elétrica máxima do protótipo calculada utilizando a equação (5.4) é igual a 3,50 kW.



**Figura 6.5 – Resultados simulados: curvas de magnetização do protótipo.**

A Figura 6.6 ilustra a curva de indutância versus posição do polo do rotor em relação ao polo do estator. Os valores da indutância máxima ( $L_a$ ) e mínima ( $L_u$ ) são mostrados na legenda.

Calculando a tensão média induzida em cada enrolamento e a potência elétrica (conforme apresentado na seção 5.1 do capítulo anterior) obtém-se  $P_{ele}=1,65$  kW e  $E_{ind}=136,72$  V.



**Figura 6.6** – Resultados simulados: curvas de indutância do protótipo.

### 6.3 RESULTADOS ESTÁTICOS EXPERIMENTAIS

As curvas experimentais de magnetização do protótipo podem ser obtidas aplicando procedimentos de medição direta ou indireta.

A medição indireta consiste em determinar as curvas de magnetização por meio das características do torque eletromagnético estático. Embora não seja um método complicado de ser implementado, este procedimento possui uma limitação em relação à precisão. De acordo com [5], pequenos desvios mecânicos durante a leitura dos dados, pode gerar grandes erros.

Na medição direta, as curvas de magnetização são encontradas a partir da medição de tensão e corrente elétrica nas fases do gerador. Neste trabalho, foi adotado um método direto para a obtenção das curvas experimentais.

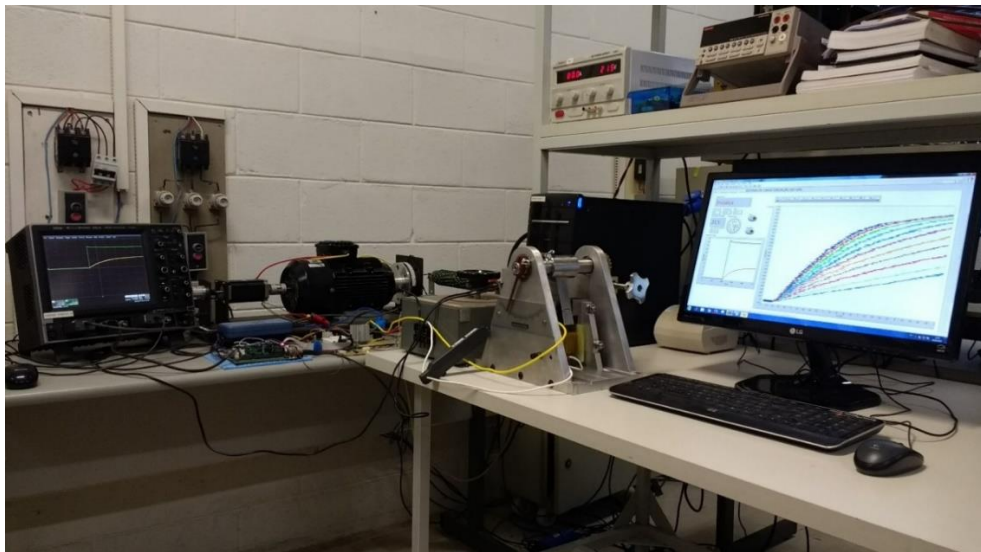
O método mais simples consiste em aplicar uma tensão senoidal no enrolamento de fase do gerador para diferentes posições dos polos da máquina. Desta forma, o fluxo magnético pode ser calculado a partir do valor da tensão eficaz aplicada, corrente eficaz medida e ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente [78]. Esse método apresenta erros consideráveis quando o material magnético opera na região de saturação, logo, torna-se inadequado para as máquinas de relutância variável, uma vez que operam constantemente na região de saturação.

De acordo com [79], o método direto para a obtenção das curvas de magnetização que apresenta melhor resultado em motores ou geradores de relutância variável consiste em aplicar um degrau de tensão no enrolamento de fase da máquina para uma determinada posição de rotor bloqueado e armazenar as respostas da corrente ( $i$ ) e tensão ( $V$ ). Esse procedimento é realizado para várias posições do polo rotor entre a região de total alinhamento e desalinhamento. Conhecendo a resistência do enrolamento de fase  $R$ , o fluxo magnético é calculado a partir de (6.1):

$$\phi(t) = \int_0^t (V - Ri) dt \quad (6.1)$$

sendo  $t$  o tempo total de amostragem de dados do degrau aplicado.

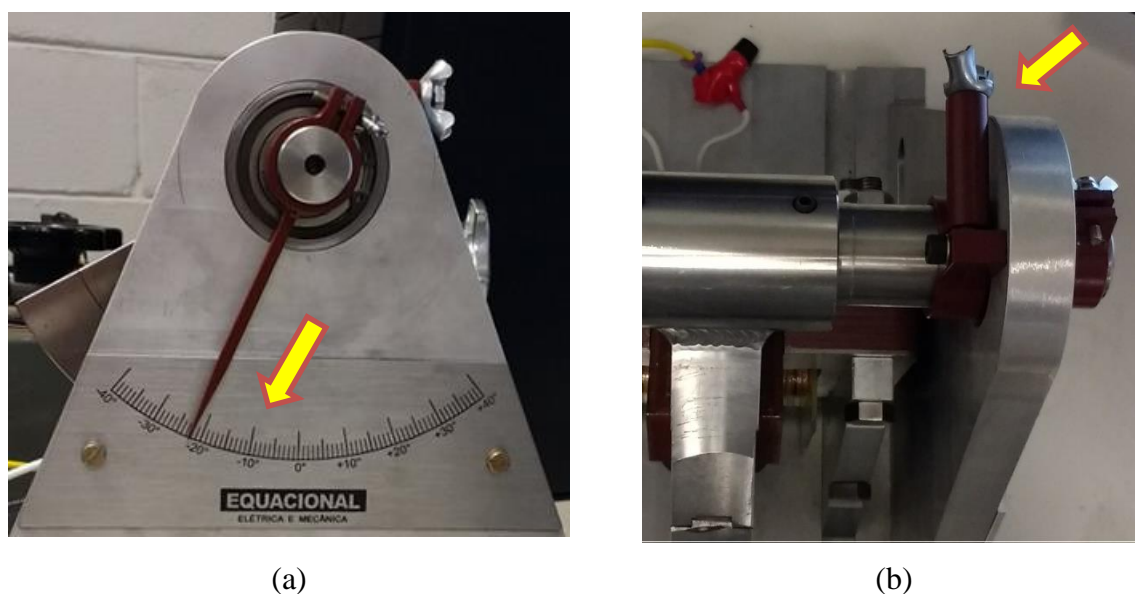
As Figura 6.7 ilustra a bancada experimental que foi utilizada na obtenção das curvas de magnetização do protótipo. Em linhas gerais, a metodologia do ensaio consiste em variar a posição relativa entre os polos do estator e rotor e, para cada posição, aplicar um degrau de tensão elétrica a fim de encontrar a resposta transitória da corrente elétrica na bobina do núcleo C.



**Figura 6.7** – Resultados Experimentais: Bancada.

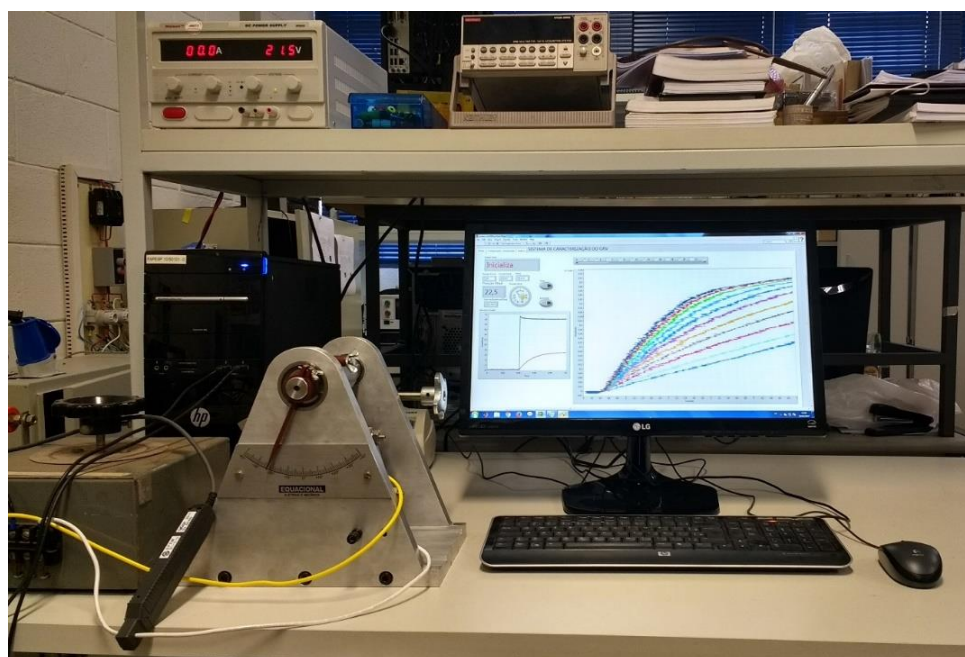
O rotor é deslocado manualmente para a posição angular desejada e bloqueado com o auxílio de uma trava mecânica inserida na base de sustentação, conforme mostra a Figura 6.8.

Foram obtidas 11 curvas entre as posições de total alinhamento ( $0^\circ$ ) total desalinhamento ( $22,5^\circ$ ). Utilizando um circuito de acionamento e controle desenvolvido por [5] no Laboratório de Eletrônica de Potência da Universidade Estadual de Campinas, um degrau de tensão elétrica é aplicado nos terminais da bobina, e por meio de ponteiros de medição conectadas a um osciloscópio, as respostas transientes da tensão e da corrente elétrica foram obtidas em cada posição.



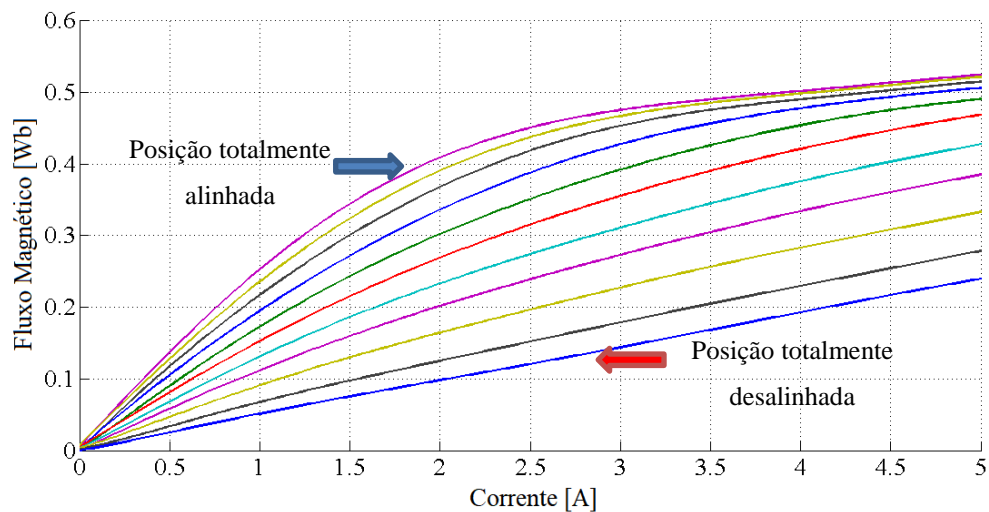
**Figura 6.8** – Fotos do protótipo desenvolvido: (a) detalhe mecanismo de posicionamento dos polos; (b) detalhe da trava mecânica.

Um software para a aquisição de dados, desenvolvido na plataforma Labview®, foi utilizado para extrair os dados do osciloscópio (via *Ethernet*) e calcular o fluxo magnético concatenado, conforme mostra a equação (6.1), para valores de corrente elétrica variando entre 0 a 5A (máxima corrente de projeto). Desta forma, são traçadas curvas do fluxo concatenado em função da corrente elétrica e da posição angular do rotor ( $\Phi(I, \theta)$ ) ou seja, as curvas de magnetização, dadas nas Figura 6.9 e 6.10.



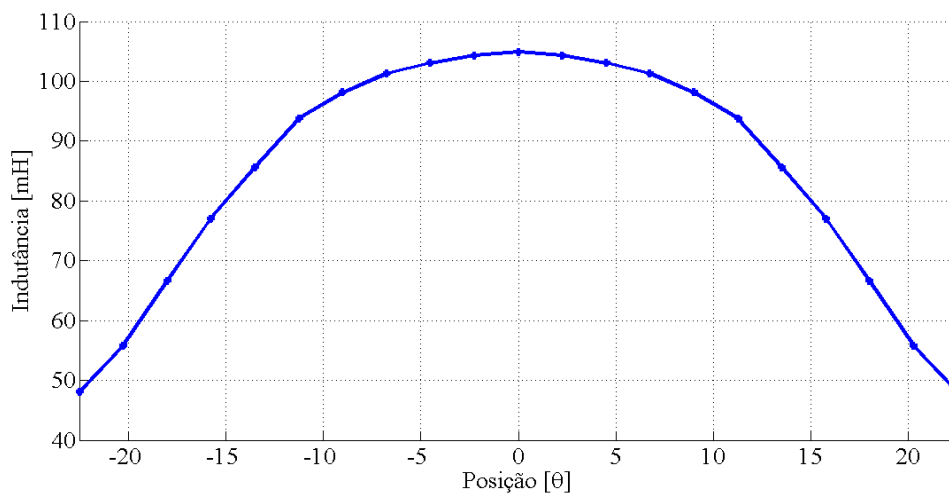
**Figura 6.9** – Resultados experimentais: Ensaio.





**Figura 6.10** – Resultados experimentais: Curva de Magnetização.

O comportamento da indutância para as diversas posições e valores de corrente podem ser determinadas pela relação  $\lambda = L \cdot i$ . Desta forma, o valor do fluxo magnético obtido experimentalmente foi dividido pela respectiva corrente de ensaio, determina o valor da indutância. Para a corrente máxima, o perfil de indutância do protótipo versus posição do polo do rotor em relação ao polo do estator é mostrado na Figura 6.11.

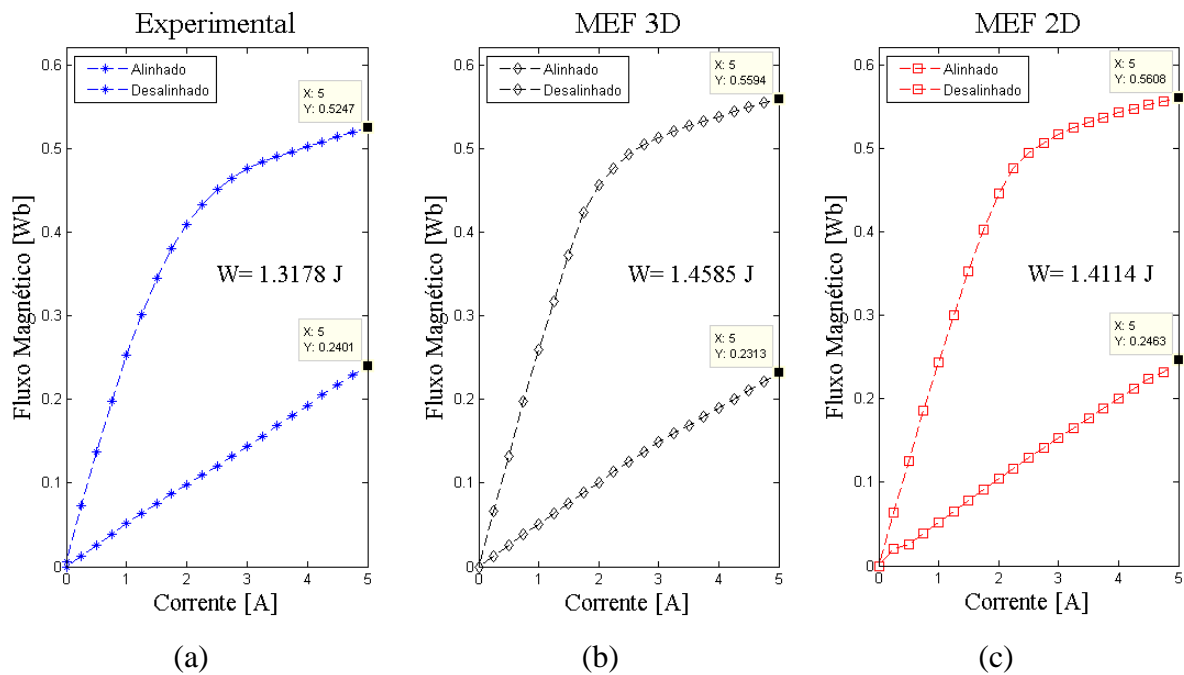


**Figura 6.11** – Resultados experimentais: Curva da Indutância.

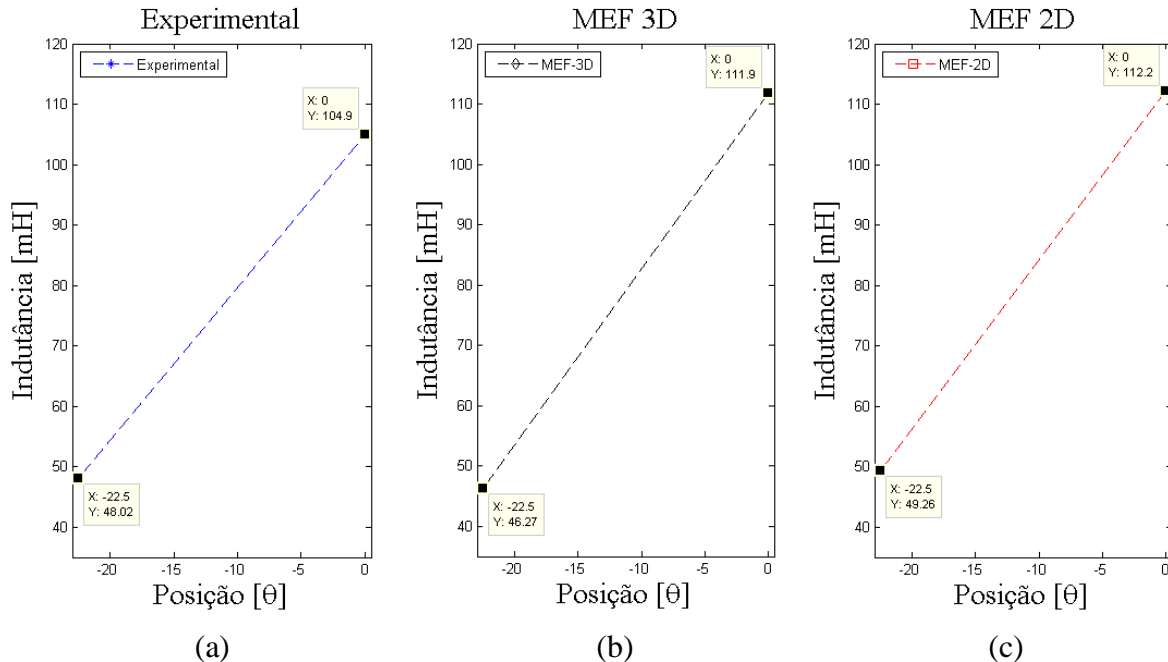
#### 6.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A fim de confrontar os resultados para a validação da metodologia de projeto, os resultados das curvas de magnetização e indutância experimentais e simulados foram novamente representados nas Figuras 6.12 e 6.13. Foram analisados apenas os valores nas posições alinhada

e desalinhada, uma vez que, são dados de maior relevância para a validação da metodologia de projeto.



**Figura 6.12** – Comparação das Curvas de Magnetização: (a) experimental; (b) MEF-3D; (c) MEF-2D.



**Figura 6.13** – Comparação das Curvas de Indutância: (a) experimental; (b) MEF-3D; (c) MEF-2D.

A Tabela 6.4 apresenta, com detalhes, a comparação entre os resultados experimentais e de simulação dos seguintes valores: fluxo magnético na posição alinhada ( $\lambda_a$ ), fluxo magnético

na posição desalinhada ( $\lambda_u$ ), indutância na posição alinhada, indutância na posição desalinhada, potência estática máxima e potência elétrica total.

**Tabela 6.4 – Comparação dos Resultados Estáticos**

GRV - C	Indutância		Fluxo Concatenado		Potências	
	$L_a$ (mH)	$L_u$ (mH)	$\lambda_a$ (Wb)	$\lambda_u$ (Wb)	$P_{max\_est}$ (kW)	$P_{ele}$ (kW)
<b>Experimentais</b>	104,9	48,02	0,520	0,240	3,16	1,52
<b>MEF – 3D</b>	111,9	46,27	0,559	0,230	3,50	1,65
<b>MEF – 2D (corrigido)</b>	112,2	49,29	0,5608	0,246	3,38	1,58

## 6.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS ESTÁTICOS

A metodologia de projeto utilizada demonstrou-se adequada no projeto de geradores de relutância variável com núcleos do tipo C. Utilizou-se uma técnica de otimização clássica em conjunto com o método dos elementos finitos em duas dimensões. Conforme dito anteriormente, a escolha do uso do MEF-2D foi dada por ser mais simples e requerer um menor tempo de processamento quando comparada a uma técnica de simulação em três dimensões.

Os fatores de correção incluídos no cálculo das indutâncias ( $L_a$  e  $L_u$ ) e, conseqüentemente, nos fluxos magnéticos concatenados ( $\lambda_a$  e  $\lambda_u$ ) no MEF-2D são bastante satisfatórios e próximos aos valores experimentais – Tabela 6.4. O erro percentual relativo aos valores experimentais para cada variável é mostrado na Tabela 6.5. Nota-se que eles foram abaixo de 8%, o que torna satisfatório no projeto de máquinas elétricas.

**Tabela 6.5 – Erros percentuais relativos: Indutância e Fluxo Concatenado**

GRV – C	Indutância		Fluxo Concatenado	
	$L_a$ (mH)	$L_u$ (mH)	$\lambda_a$ (Wb)	$\lambda_u$ (Wb)
<b>Experimentais</b>	104,9	48,02	0,520	0,240
<b>MEF – 3D</b>	111,9 (6,7%)	46,27 (3,6%)	0,559 (7,5%)	0,230 (4,2%)
<b>MEF – 2D (corrigido)</b>	112,2 (6,9%)	49,29 (2,6%)	0,5608 (7,8%)	0,246 (2,5%)

Caso não fossem aplicados os fatores de correção no MEF-2D, os valores das indutâncias e dos fluxos magnéticos mostrados na Tabela 6.5 teriam seus valores alterados para os da Tabela 6.6.

Neste caso, observa-se que os valores de  $L_a$  e  $\lambda_a$  estão bem próximos aos valores experimentais, porém apresenta erros acima de 50% em  $L_u$  e  $\lambda_u$ . Esse resultado era esperado uma vez

que, na posição de total alinhamento, o espraçamento do fluxo magnético (ou efeito de borda) é pequeno em relação a posição desalinhada. Desta forma, o projetista pode optar pela não utilização do fator de correção na posição alinhada (ou seja,  $k_a = 1$ ), simplificando a metodologia do projeto do GRV-C apresentada.

**Tabela 6.6 – Erros percentuais relativos: Indutância e Fluxo Concatenado sem fator de correção**

GRV – C	Indutância		Fluxo Concatenado	
	$L_a$ (mH)	$L_u$ (mH)	$\lambda_a$ (Wb)	$\lambda_u$ (Wb)
<b>Experimentais</b>	104,9	48,02	0,520	0,240
<b>MEF – 2D (não corrigido)</b>	106,4 (1,4%)	22,9 (52,3%)	0,532 (2,3%)	0,115 (52,1%)

Contudo, é também objetivo dessa pesquisa verificar se o fator de correção proposto apresenta resultados satisfatórios, assim optou-se por utilizá-lo para as duas posições. Ressalta-se ainda que era esperado que os valores as indutâncias e fluxos calculados pelo MEF–2D ficassem próximos aos obtidos pelo MEF–3D uma vez que foram estimados durante a fase de pré-projeto, com base em um cálculo que visa reduzir a diferença entre as indutâncias obtidas por meio dessas duas técnicas computacionais; conforme foi explicado no Capítulo 3 deste trabalho.

Já na posição desalinhada, a utilização do fator de correção no MEF – 2D torna-se necessário, uma vez que apresenta erros percentuais acima de 50% no cálculo da indutância e fluxo magnético concatenado conforme mostrado na Tabela 6.6. Esse erro no cálculo da indutância na posição desalinhada quando se utiliza uma análise com o MEF bidimensional também é apresentado e discutido em alguns estudos da literatura conforme pode ser observado em [44] e [47].

Calculando ainda o erro percentual para as potências estática máxima e elétrica total, observa-se que os erros permanecem dentro do esperado e dos limites aceitáveis – Tabela 6.7. Ressalta-se que essas potências não são medidas diretamente, mas calculadas indiretamente por meios dos valores de fluxo magnético concatenado e indutâncias (medidos ou simulados) e das dimensões do núcleo C.

**Tabela 6.7 – Erros percentuais relativos: Potência estática e elétrica**

GRV – C	Potências	
	$P_{max\_est}$ (kW)	$P_{ele}$ (kW)
<b>Experimentais</b>	3,16	1,52
<b>MEF – 3D</b>	3,50 (10,7 %)	1,65 (8,5 %)
<b>MEF – 2D</b>	3,38 (6,9 %)	1,58 (3,9 %)

O confronto dos resultados (simulados e experimentais) comprovou que a metodologia de projeto proposta é adequada para o projeto do GRV-C. Os resultados estáticos simulados apresentam erros máximos abaixo de 10% em relação aos valores experimentais que é aceitável para projetos projeto de máquinas elétricas de relutância variável [47].

## 6.6 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foram detalhadas as características físicas do protótipo do núcleo C utilizado na validação da metodologia de projeto proposta. São mostradas as dimensões do núcleo C, as características da bobina do núcleo magnético e o comportamento das curvas de fluxo magnético concatenado em diferentes posições entre os polos do rotor e do estator. Descreve-se também a plataforma utilizada para a aquisição dos dados experimentais e, ao final do capítulo, é realizada uma discussão comparativa entre os dados obtidos por meio da simulação computacional e do ensaio prático.

---

## CAPÍTULO 7

---

### CONCLUSÃO

O Gerador de Relutância Variável com núcleo do tipo C é atrativo para a aplicação em geração eólica devido a sua robustez e alta eficiência. O GRV-C possui uma estrutura modular e de rotor leve que somada à sua natureza comutada, que exige necessariamente a presença de um conversor eletrônico para o seu funcionamento, as tornam compatíveis e atrativas para aplicações de velocidade variável. Nesta tese foi apresentada uma proposta de metodologia para o projeto eletromagnético, otimização e análise de Geradores de Relutância Variável com núcleo do tipo C com o uso do método dos elementos finitos. Foram projetados e estudados três geradores com potência e tensão elétrica de saída de 1500 W e 180 V, respectivamente, mas com três diferentes velocidades nominais de operação e, em seguida, foi projetado e construído um protótipo de núcleo C a fim de validar a metodologia proposta.

Um modelo em método dos elementos finitos de duas dimensões foi utilizado para a obtenção das dimensões finais dos geradores elétricos, com o objetivo de reduzir o tempo de processamento durante o processo de otimização em relação ao método dos elementos finitos em três dimensões. A inclusão dos fatores de correção  $k_a$  e  $k_u$  no modelo foi necessária para ajustar as respostas obtidas por meio do MEF-2D.

Comparando os resultados estáticos obtidos no método dos elementos finitos em duas e três dimensões, foi observado que a metodologia aplicada é apropriada para a obtenção das dimensões finais do GRV-C. Também, por meio simulações dinâmicas, foi comprovada a viabilidade e a eficiência da metodologia proposta no projeto de GRV-C que poderá ser utilizado para a geração eólica. Os três geradores projetados (Gerador 1, Gerador 2 e Gerador 3) atendem as especificações requeridas. O sistema de controle manteve a tensão desejada para os três geradores simulados mesmo após a inserção das cargas. O rendimento do sistema manteve-se acima de 92% para as potências nominais nos três ensaios.

Ainda, os resultados de simulação indicam que, para as mesmas características de saída (potência elétrica e tensão), quanto maior a velocidade nominal de operação da máquina menores são as dimensões do núcleo magnético e do número de espiras do GRV-C. As simulações auxiliam na compreensão do comportamento dos GRVs-C antes da construção dos protótipos, permitindo ajustes nas dimensões da máquina bem como no sistema de acionamento e controle.

A metodologia também foi validada comparando os resultados estáticos obtidos por meio do método dos elementos finitos e experimentais para o protótipo do núcleo C construído. A comparação demonstra a eficácia da metodologia proposta para a determinação das dimensões do núcleo magnético C do gerador.

## 7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentre as sugestões de trabalhos futuros estão:

- Estudar/Analisar/Comparar diferentes métodos de otimização para o núcleo magnético, investigando mudanças na sua estrutura que reduzam as perdas por dispersão;
- Construir um protótipo completo do GRV-C e realizar testes sob condição de carga e em conexão com a rede elétrica;
- Desenvolver e estudar desenvolver estratégias de controle para a o GRV-C autoexcitado para conexão com a rede elétrica;

## 7.2 PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTA PESQUISA

### 7.2.1 Artigos completos publicados em periódicos

V. S. C. Teixeira, T. A. d. S. Barros, A. B. Moreira e E. Ruppert, “Geradores de Relutância Axial com Núcleo do Tipo C: Projeto e Acionamento”, *Eletrônica de Potência* (Impresso), 2017 (aprovado para publicação 16/01/2017).

T. A. d. S. Barros, P. S. F. Nascimento, A. B. Moreira, V. S. C. Teixeira, M. G. Villalva e E. Ruppert, “Sistema automático de caracterização de máquinas a relutância variável e modelagem não linear por interpolações utilizando smoothing splines,” *Eletrônica de Potência*, vol. 20, nº 2, pp. 140-150, 2015.

### **7.2.2 Trabalhos publicados em anais de congressos**

V. S. C. Teixeira, E. R. Filho. A, B. Moreira, and T. A. S. Barros, “Projeto eletromagnético para gerador a relutância variável com núcleo C de baixa potência,” em Proc. 16º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 11º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (MOMAG 2014), Curitiba, Brasil, p. 535 - 540, 2014.

V. S. C. Teixeira, E. Ruppert, T. A. d. S. Barros e A. B. Moreira, “Design, optimization and analysis of the axial C-core Switched Reluctance Generator for wind power application,” em Proc. Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Palermo, 2015.



## REFERÊNCIAS

- [1] S. M. Lukic e A. Emadi, “State Switching Digital Control Technique for Switched Reluctance Motor Drives,” *em Proc. International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC 2007)*, pp. 1332-1337, 2007.
- [2] S. Méndez, . A. Martínez, W. Millán, C. E. Montaña e F. Pérez-Cebolla, “Design, Characterization, and Validation of a 1-kW AC Self-Excited Switched Reluctance Generator,” vol. 61, nº 2, pp. 846-855, 2014.
- [3] T. A. d. S. Barros, Uma contribuição ao estudo e desenvolvimento de técnicas de controle de potências ativa e reativa do gerador de relutância variável para aplicação em sistemas de geração eólica de pequena potência, Campinas: Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2012.
- [4] D. A. Torrey, “Switched Reluctance Generators and Their Control,” *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 49, nº 1, pp. 3-14, Fevereiro 2002.
- [5] T. A. S. Barros, Propostas de Controles de Potência e Otimização do Desempenho do Gerador de Relutância Variável Aplicado em Geração Eólica Conectada à rede Elétrica de Baixa Tensão, Campinas: Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 2015.
- [6] Y. -C. Chang e C. -M. Liaw, “Establishment of a Switched-Reluctance Generator-Based Common DC Microgrid System,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, nº 9, pp. 2512-2527, Setembro 2011.
- [7] K. Park, Power Electronic Systems for Switched Reluctance Generator Based Wind Farm and DC Networks, Thesis, Department of Energy Technology of Aalborg University, 2014.
- [8] Empresa de Pesquisa Energética - EPE, “Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 5 anos (2016-2020),” Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, 2015.
- [9] Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, “Resenha Energética Brasileira,” Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2016.
- [10] Ministério de Minas e Energia, “Matriz Energética Nacional 2030,” MME: EPE, Brasília, 2007.
- [11] Grupo de Estudos do Setor Elétrico, “Expansão do Sistema Elétrico Brasileiro e do Potencial Hidroelétrico da Região Amazônica,” UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.
- [12] C. A. C. Neto, “Matriz de energia elétrica e a geração nuclear (2010/2030),” *IPEA*, vol. Ano 8, nº 66, 2011.

- [13] E. A. E. Jebaseeli e D. Susitra, "Performance Analysis of various configurations of Switched Reluctance Machine for Wind Energy," em *Recent Advances in Space Technology Services and Climate Change*, Chennai, 2010.
- [14] R. Cardenas, R. Pena e M. Perez, "Control of a switched reluctance generator for variable-speed wind energy applications," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, n° 4, pp. 781-791, Dezembro 2005.
- [15] D.-W. Choi, S.-I. Byun e Y.-H. Cho, "A Study on the Maximum Power Control Method of Switched Reluctance Generator for Wind Turbine," *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 50, n° 1, Janeiro 2014.
- [16] A. F. V. Silveira, Modelagem, construção, testes e análise de desempenho de um gerador a relutância chaveado, Uberlândia: Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- [17] G. P. Viajante, Gerador a relutância variável em conexão com a rede elétrica para injeção de potência ativa, Uberlândia: Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2013.
- [18] V. R. Bernadeli, Estudo sobre o comportamento do gerador a relutância variável operando no modo autoexcitado, Uberlândia: Tese, Universidade Federal de Uberlândia , 2014.
- [19] Y. J. Bao e K. W. Cheng, "Research on a novel switched reluctance generator for wind power generation," em *Proc. of Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, Hong Kong, 2011.
- [20] X. D. Xue, K. W. E. Cheng, Y. J. Bao e J. Leung, "Design Consideration of C-core Switched Reluctance Generators for Wind Energy," em *in Proc. of Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, Hong Kong, 2011.
- [21] X. Liu, K. Park e Z. Chen, "A Novel Excitation Assistance Switched Reluctance Wind Power Generator," *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 50, n° 11, 2014.
- [22] P. .. Lawrenson, J. M. Stephenson, P. T. Blenkinsop, J. Corda e N. N. Fulton, "Variable-speed switched reluctance motors," *IEE Proceedings B - Electric Power Applications*, vol. 127, n° 4, pp. 253-265, 1980.
- [23] R. Krishnan, R. Arumugan e J. F. Lindsay, "Design procedure for switched-reluctance motors," *IEEE Transactions on Industry Applications* , vol. 24, n° 3, pp. 456-461, 1988.
- [24] C. A. Ferreira, S. R. Jones, B. T. Drager e W. S. Heglund, "Design and implementation of a five-hp, switched reluctance, fuel-lube, pump motor drive for a gas turbine engine," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 10, n° 1, pp. 55-61, 1995.
- [25] A. V. Radun, "Design Considerations for the Switched Reluctance Motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, n° 5, pp. 1079-1087, 1995.

- [26] S. I. Nabeta, I. E. Chabu, L. Lebensztajn, J. R. Cardoso, D. A. P. Correa, W. M. da Silva, M. C. Costa e K. Hameyer, "Kriging Models and Torque Improvements of a Special Switched Reluctance Motor," em *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, Antalya, 2007.
- [27] D. A. Torrey, "Variable-reluctance generators in wind-energy systems," em *Power Electronics Specialists Conference, 1993. PESC '93 Record., 24th Annual IEEE*, Seattle, 1993.
- [28] T. Matsuo, J. Luo, E. P. Hoffman e T. A. Lipo, "Self excited variable reluctance generator," em *IEEE Industry Applications Conference*, New Orleans, 1997.
- [29] M. V. Zaharia, A. A. Laczko, A. A. Pop, M. M. Radulescu e F. Gillon, "Optimal commutation angles of a switched reluctance motor/generator," em *Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies*, Monte Carlo, 2015.
- [30] K. Park, X. Liu e Z. Chen, "A non-unity torque sharing function for torque ripple minimization of switched reluctance generators," em *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille, 2013.
- [31] K. Kannan e S. Sutha, "PI-CCC based minimization of torque ripple in Switched Reluctance Generator using MATLAB/SIMULINK," em *4th International Power Engineering and Optimization Conference*, Shah Alam, 2010.
- [32] P. Lobato, J. Martins e A. J. Pires, "A Design Criteria for Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Generators," em *Proc. of the International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Torremolinos, 2011.
- [33] A. Salimi, G. Rezazadeh, S. Nourollah, N. Niassati e A. Hajihosseini, "A novel four layer switch reluctance generator," em *15th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Novi Sad, 2012.
- [34] D. Scharfenstein, B. Burkhart e R. W. De Doncker, "Influence of an FPGA-based switching angle dithering on acoustics in single-pulse controlled switched reluctance machines," em *IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Sydney, 2015.
- [35] A. H. Isfahani e B. Fahimi, "Multi-physics analysis of double stator switched reluctance machines," em *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Denver, 2013.
- [36] P. P. d. Paula, Análise e projeto de um motor de relutância chaveado com o auxílio do método dos elementos finitos, São Paulo: Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 1993.
- [37] A. C. F. Mamede, Projeto Iterativo, Simulação, Análise e Otimização de Máquina a Relutância Variável Monofásica, Uberlândia: Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

- [38] M. N. Anwar, I. Husain e A. V. Radun, "A comprehensive design methodology for switched reluctance machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 6, n° 37, pp. 1684-1692, 2001.
- [39] H.-U. Shin e K.-B. Lee, "Optimal design of a 1 kW switched reluctance generator for wind power systems using a genetic algorithm," *IET Electric Power Applications*, vol. 10, n° 8, pp. 807-817, 2016.
- [40] P. P. De Paula, Aspectos de projeto, simulação e operação de geradores e motores de relutância chaveados., São Paulo: Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2000.
- [41] R. J. Dias, C. R. Silva, B. R. Dos Santos, C. d. S. Costa, A. F. V. Da Silveira e D. A. De Andrade, "Innovations on Design of 6x4 and 6x6 Switched Reluctance Generators for Increasing the Efficiency," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, n° 4, pp. 646-655, 2017.
- [42] R. Krishnan, M. Abouzeid e X. Mang, "A design procedure for axial field switched reluctance motors," em *Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Seattle, 1990.
- [43] S.-H. Mao e M.-C. Tsai, "A Novel Switched Reluctance Motor With C-Core Stators," *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 41, n° 12, pp. 4413-4420, 2005.
- [44] A. Labak e N. C. Kar, "Designing and prototyping a novel fivephase pancake-shaped axial-flux SRM for electric vehicle application through dynamic FEA incorporating flux-tube modeling," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, n° 3, pp. 1276-1288, 2013.
- [45] A. Labak e N. C. Kar, "Novel Approaches Towards Leakage Flux Reduction in Axial Flux Switched Reluctance Machines," *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 49, n° 8, pp. 4738-4741, 2013.
- [46] N. R. Patel, V. A. Shah e M. M. Lokhande, "Design and performance analysis of radial flux C-core switched reluctance motor for in-wheel electrical vehicle application," em *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Dearborn, 2016.
- [47] K. Ramu, Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications, Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [48] A. Labak e N. C. Kar, "A novel five-phase pancake shaped switched reluctance motor for hybrid electric vehicles," em *Proc. Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC 2009)*, Dearborn, 2009.
- [49] N. Sadowski, Y. Lefevre, C. G. Neves e R. Carlson, "Finite elements coupled to electrical circuit equations in the simulation of switched reluctance drives: attention to mechanical behaviour," *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 32, n° 3, p. 1086-1089, 1996.

- [50] V. S. C. Teixeira, T. A. d. S. Barros, A. B. Moreira e E. Ruppert, “GERADORES DE RELUTÂNCIA AXIAL COM NÚCLEO DO TIPO C: PROJETO E ACIONAMENTO,” *Eletrônica Potência*, vol. 22, nº 3, pp. 225-236, 2017.
- [51] G. Viajante, D. A. Andrade, A. W. F. V. Silveira, V. R. Bernadelli, L. C. Gomes, J. L. Domingos e A. V. Fleury, “Estratégia para Melhoria da Eficiência da Conversão Eletromecânica de Energia do GRV,” *Eletrônica de Potência*, vol. 16, nº 4, p. 367–375, 2011.
- [52] V. S. C. Teixeira, T. A. d. S. Barros, A. B. Moreira e E. Ruppert, “Geradores de Relutância Axial com Núcleo do Tipo C: Projeto e Acionamento,” *Eletrônica de Potência (Impresso)*, 2017 (aprovado para publicação).
- [53] P. C. Desai, The novel concept os switched reluctance machines with higher number os rotor poles, Chicago: Thesis, Illinois Institute of Technology, Department of Electrical and Computer Engineering, 2009.
- [54] S. Smaka, Š. Mašić, N. Hadžimejlc e M. Cosovic, “Design Considerations for Novel 8/14 and Comparison with Conventional 8/6 and 8/10 Switched Reluctance Machines,” em *Proc. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Sorrento, 2012.
- [55] R. Vandana, S. Nikam e B. G. Fernandes, “Criteria for Design of High Performance Switched Reluctance Motor,” em *Proc. of the 2012 XXth International Conference on Electric Machines (ICEM2012)*, Marseille, 2012.
- [56] T. J. E. Miller, *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*, Oxford: Newnes, 2001.
- [57] C. Y. Wu e C. Pollock, “Analysis and reduction of vibration and acoustic noise in the switched reluctance drive,” em *Industry Applications Society Annual Meeting*, Toronto, 1993.
- [58] N. Sadowski, Y. Lefevre, C. G. C. Neves e R. Carlson, “Finite elements coupled to electrical circuit equations in the simulation of switched reluctance drives: attention to mechanical behaviour,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 32, nº 3, pp. 1086-1089, 1996.
- [59] T. A. Barros, P. J. S. Neto, P. S. Filho, A. B. Moreira e E. Ruppert, “Approach for Performance Optimization of Switched Reluctance Generator in Variable-speed Wind Generation System,” *Renewable Energy*, vol. 97, pp. 114-128, 2016.
- [60] S. Yan, Q. Wang e H. Chen, “Switched reluctance generator control for wind power system,” em *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*, Trivandrum, India, 2016.

- [61] H. K. Karegar, M. Yazdi e A. Siadatan, “New structure for high speed and variable speed wind turbine based switched reluctance generator,” em *IEEE International Conference on Power and Energy*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010.
- [62] J. Pyrhonen, T. Jokinen e V. Hrabovcova, Design of rotating electrical machines, e-book: Wiley, 2008.
- [63] T. N. A. Veiga, Projeto de geradores síncronos ímã permanentes para aplicações em sistemas eólicos, Florianópolis: Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.
- [64] I. Boldea, Variable Speed Generators, Portland: CRC Press, 2005.
- [65] R. Yang e L. Wang, “Multi-objective optimization for decision-making of energy and comfort management in building automation and control,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 2, nº 1, p. 1–7, 2012.
- [66] C. Mademlis e I. Kioskeridis, “Optimizing performance in current-controlled switched reluctance generators,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, nº 3, p. 556–565, 2005.
- [67] P. R. Sampaio, Teoria, método e aplicação de otimização multiobjetivo, São Paulo: Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de São Paulo, 2011.
- [68] K. Deb, Multi-objective optimization using evolutionary algorithms, Chichester: Wiley-Interscience Series in Systems and Optimization John Wiley & Sons, 2001.
- [69] H. O. C. Ramos, Um algoritmo para otimização restrita com aproximação de derivadas, Rio de Janeiro: Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- [70] C. Audet e J. E. Dennis Jr, “A pattern search filter for nonlinear programming without derivatives,” *SIAM J. OPTIM*, vol. 14, nº 4, pp. 980-1010, 2004.
- [71] R. S. Ferreira, Uma abordagem multiescalar, multicritério para a segmentação de imagens, Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.
- [72] N. Bianchi, Electrical Machine Analysis Using Finite Elements, CRC Press Taylor&France Group, 2005.
- [73] T. A. d. S. Barros, P. S. F. Nascimento, A. B. Moreira, V. S. C. Teixeira, M. G. Villalva e E. Ruppert, “Sistema automático de caracterização de máquinas a relutância variável e modelagem não linear por interpolações utilizando smoothing splines,” *Eletrônica de Potência*, vol. 20, nº 2, pp. 140-150, 2015.
- [74] D. A. Andrade e R. Krishnan, “Characterization of switched reluctance machines using Fourier series approach,” em *Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference, 36th IAS Annual Meeting*, Chicago, 2001.

- [75] W. Ding e D. Liang, "Modeling of a 6/4 Switched Reluctance Motor Using Adaptive Neural Fuzzy Inference System," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, n° 7, pp. 1796 - 1804, 2008.
- [76] T. Lachman, T. R. Mohamad e C. H. Fong, "Nonlinear modelling of switched reluctance motors using artificial intelligence techniques," *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 151, n° 1, pp. 53-60, 2004.
- [77] IMETRO, "Informação ao Consumidor," IMETRO, 2012. [Online]. Available: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/pbetab11.asp>. [Acesso em 05 10 2017].
- [78] E. S. L. Oliveira, Projeto, construção, simulação, implementação e testes de um gerador a relutância chaveada monofásico, São Carlos: Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 2011.
- [79] W. Ding e D. Liang, "A Fast Analytical Model for an Integrated Switched Reluctance Starter/Generator," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, n° 4, pp. 948-956, 2010.
- [80] V. S. C. Teixeira, E. Ruppert, T. A. d. S. Barros e A. B. Moreira, "Design, optimization and analysis of the axial C-core Switched Reluctance Generator for wind power application," em *Proc. Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Palermo, 2015.