

GERADORES DE RELUTÂNCIA AXIAL COM NÚCLEO DO TIPO C: PROJETO E ACIONAMENTO

Vanessa S. de C. Teixeira^{1,2}, Tarcio A. dos S. Barros², Adson B. Moreira^{1,2}, Ernesto Ruppert Filho²

¹Universidade Federal do Ceará, Sobral – CE, Brasil

²Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, Brasil

e-mail: vanessasct@gmail, tarcioandre@hotmail.com, adsonbmoreira@gmail.com, ruppert@fee.unicamp.br

Resumo – Esse artigo tem como objetivos principais: apresentar uma proposta de metodologia para o projeto eletromagnético de geradores a relutância variável de fluxo axial com núcleo do tipo C; e o seu acionamento em operação auto excitada. Além disso, não foi encontrada na literatura pesquisas sobre a utilização do gerador de relutância axial com núcleo do tipo C em operação auto excitada. Logo, o artigo possui também um caráter tutorial e aborda esse tema pouco difundido no âmbito científico nacional e internacional, auxiliando no desenvolvimento de novas pesquisas. É realizada uma análise estática do gerador, bem como estudos do comportamento dinâmico do sistema de acionamento por meio de simulações. A análise estática do gerador foi realizada com o auxílio do método dos elementos finitos em três dimensões. Já o estudo dinâmico do sistema foi realizado no Matlab/Simulink, utilizando um modelo do gerador desenvolvido a partir das curvas de magnetização. Com base na análise das respostas dinâmicas, os resultados das simulações indicam que a metodologia utilizada foi adequada para a determinação das dimensões finais do núcleo dos geradores de relutância axial com núcleo do tipo C.

Palavras-Chave – Fluxo Axial, Gerador de Relutância Variável, Método dos Elementos Finitos, Projeto Eletromagnético de Máquinas Elétricas.

AXIAL C-CORE SWITCHED RELUCTANCE GENERATORS: DESIGN AND DRIVE SYSTEM

Abstract – This paper aims to present a proposal of the electromagnetic design methodology of the Axial Switched Reluctance Generators with C core (C-SRG) and its drive system in self-exciting operation. In addition, it was found no research in the literature addressing the use of the self-excited C-SRG. Thus, this paper has a tutorial feature, addressing this poorly investigated subject and assisting in the development of new researches. A static analysis of the generator is also carried out, as well as studies on the dynamic behavior of the drive system using computational simulations. The three-dimensional finite element method was used in the static analysis of the generator. The study of the dynamic

behavior of the drive system of the generator was carried out using the model developed in the Matlab/Simulink based on the magnetization curves of the C-SRG. From the dynamic results of the generators, it is concluded that the methodology applied is suitable to obtain the final dimensions of the C-SRG core.

Keywords – Axial Flux, Electromagnetic Machine Design, Finite Element Method, Switched Reluctance Generator.

I. INTRODUÇÃO

As máquinas de relutância variáveis (MRV) vem ganhando espaço em pesquisas aplicadas a sistemas que requerem alta densidade de potência, simplicidade de construção e baixo custo de fabricação.

As MRV têm sido tema de estudos na área de veículos elétricos e geração eólica, principalmente devido à ausência de elementos magnéticos permanentes e presença de bobinas apenas no estator [1], [2]. Logo, são máquinas que possuem um rotor mais leve que, somada a sua natureza intrinsecamente comutada, as tornam compatíveis e atrativas para aplicações em geração eólica [3], bem como em veículos elétricos.

O gerador de relutância variável (GRV) é uma alternativa competitiva às tradicionais máquinas utilizadas na área de geração eólica (geradores de indução e os síncronos) em aplicações de pequena e média potência. Isso se deve principalmente às suas características de funcionamento que permitem a operação em uma ampla faixa de velocidade com alto rendimento [4].

O uso do GRV para sistemas eólicos tem sido abordado em várias pesquisas na última década [5]-[7]. A maioria das pesquisas concentra-se na estrutura tradicional do gerador de relutância variável de fluxo radial e, embora outras topologias venham sendo estudadas [8], [9], poucos são os estudos que abordam a aplicação e projeto do gerador de relutância de fluxo axial para geração eólica [10]. Os principais estudos aproveitam procedimentos já existentes para o projeto de motores de relutância. Desta forma, há uma lacuna quanto aos procedimentos para o projeto eletromagnético de geradores a relutância variável axial, principalmente para aplicações em geração a velocidade variável.

Entre as novas topologias estudadas, destaca-se a de fluxo axial com núcleo do tipo C (GRV-C). O GRV-C possui como principal característica um estator modular composto por vários núcleos em formato de C independentes entre si.

Estudos do GRV-C em aplicações eólicas foram realizados em [11]-[13]. A referência [11] apresenta o

Artigo submetido em 12/09/2016. Primeira revisão em 08/11/2016. Aceito para publicação em 16/01/2017 por recomendação do Editor Marcelo Cabral Cavalcanti.

projeto do conversor assimétrico meia ponte (*Asymmetric Half Bridge*) para o GRV-C e propõe um método de controle de potência ajustado para sistemas de geração eólica. Em [12], são descritas as etapas de funcionamento do GRV-C e apresentados os modelos de circuitos magnéticos equivalentes para as posições alinhadas e desalinhadas semelhante ao desenvolvido por [14] em motores de relutância de fluxo radial. Embora [12] 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 foi analisado em [13]. A alta indutância nos enrolamentos dos geradores de relutância evita que a magnetização seja estabelecida rapidamente comprometendo os limites da potência de saída em determinadas condições de operação. No estudo, foi proposta a utilização de um enrolamento auxiliar a fim de solucionar esse tipo de problema.

Esse artigo tem como principais contribuições apresentar uma metodologia de projeto eletromagnético e o acionamento para geradores do tipo GRV-C. Além disso, não foram encontradas na literatura pesquisas sobre a utilização do GRV-C em operação auto excitada. Logo, esse artigo possui também um caráter tutorial, abordando esse tema pouco difundido e auxiliando no desenvolvimento de novas pesquisas.

Descreve-se a metodologia de projeto, bem como o processo de otimização do núcleo magnético. Inicialmente, são calculadas as dimensões de um projeto inicial de acordo com [15]. Em seguida, utiliza-se uma técnica de otimização em conjunto com o método dos elementos finitos em duas dimensões (MEF-2D) para a obtenção das dimensões finais do núcleo magnético e enrolamentos. A análise estática dos geradores foi realizada com o auxílio do método dos elementos finitos em três dimensões (MEF-3D). Além disso, tendo em vista que o conhecimento prévio da resposta dinâmica do gerador é decisivo para a validação final das dimensões do projeto, foi utilizado um modelo baseado nas curvas de magnetização do núcleo, com o uso do Matlab/Simulink de acordo com [16] para a obtenção dessas características e validação das dimensões finais dos GRVs-C.

II. GRV-C: CARACTERÍSTICAS E OPERAÇÃO

A. Estrutura e Características Gerais

O gerador de relutância variável de fluxo axial com núcleo do tipo C possui uma alta densidade de potência, simplicidade de construção, manutenção e reparo. Sua estrutura com núcleos modulares e independentes – Figura 1 e Figura 2 – permite que cada núcleo C possa ser enrolado e transportado para manutenção separadamente dos demais. 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.

No aspecto construtivo, a principal diferença do GRV-C em relação ao gerador de relutância de fluxo radial é que a sua estrutura une tecnologia das máquinas de relutância lineares e rotativas [11]. Além disso, essa topologia possibilita a existência de núcleos C enrolados sobressalentes

para instalação imediata em caso de enrolamentos danificados ou fadiga de materiais.

Em relação aos aspectos de projetos elétricos e magnéticos, cita-se como vantagens mais relevantes do GRV-C:

- Núcleos C eletricamente e magneticamente isolados;
- Possui caminhos de fluxo magnético curtos, unidirecionais e independentes;
- Baixas perdas por histerese magnética.

As perdas por histerese em máquinas de relutância estão relacionadas à frequência do fluxo reverso nas partes do núcleo do estator [14], [17]. Contudo, o GRV-C possui caminhos de fluxo unidirecionais, logo as perdas por histerese são menores quando comparadas as estruturas tradicionais de geradores de relutância variável.

Quanto características de projeto físico e mecânico, o GRV-C apresenta como vantagens:

- Amplo espaço para acomodação das bobinas;
- Rotor com baixa inércia, já que o disco de sustentação pode ser construído com material de menor densidade de massa do que os blocos de material magnético;
- Possibilidade de reduzir ainda mais a inércia inserindo aberturas no disco, sem exceder os limites físicos adequados.
- Permite o aumento do comprimento do raio do rotor, conseqüentemente o torque eletromagnético, sem alterar o caminho de fluxo magnético.

O torque eletromagnético do GRV-C pode ser obtido por meio do produto vetorial entre força tangencial (F) e o raio interno (r_{int}), como pode ser observado na Figura 2.

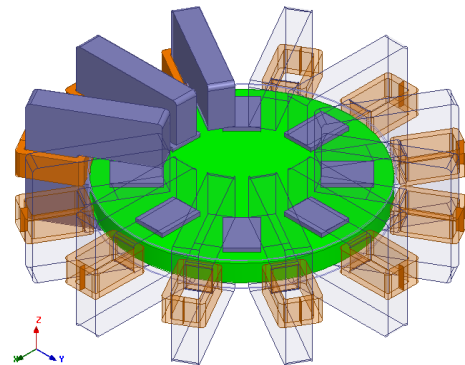


Fig. 1. GRV-C: vista em perspectiva.

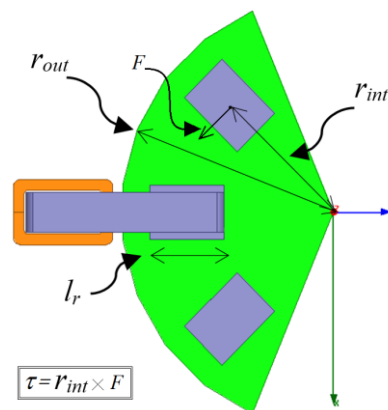


Fig. 2. GRV-C: vista superior.

Observa-se na Figura 1 que os caminhos de fluxo magnéticos no GRV-C são independentes do raio interno do rotor, logo, é possível elevar o torque eletromagnético aumentando o comprimento do raio interno, com a vantagem de não interferir no circuito magnético 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 a tangencial [18]. Segundo [19], a principal fonte de produção de ruído acústico em um motor de relutância variável é a componente de força radial.

No que diz respeito a dissipação térmica e geração de calor, o GRV-C apresenta como principais vantagens:

- Bom fator de dissipação térmica devido a estrutura fina, em forma de panqueca;
- As bobinas são alocadas na parte externa do núcleo magnético, facilitando tanto a passagem de ar como a troca de calor com o ambiente;
- Estrutura que permite adotar sistemas de arrefecimento em torno da caixa do gerador.

B. Princípio de Funcionamento

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 comportamento ideal da curva de indutância do GRV-C é ilustrado na Figura 3. Nota-se que a indutância é função da posição do rotor. Durante o processo de alinhamento dos polos, a indutância cresce e chega ao seu valor máximo 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.

Ainda na Figura 3, observam-se as etapas de operação do GRV-C: Excitação e Geração. Na etapa de excitação, o núcleo magnético do estator é magnetizado com a aplicação de uma corrente no enrolamento de fase. Nessa etapa, uma energia magnética é armazenada no núcleo. Já na etapa de geração, a energia magnética armazenada na etapa anterior é somada ao conjugado mecânico no eixo da máquina proveniente da máquina primária e transferida para a carga [2].

C. Equações de Saída: Tensão e Potência Elétrica

A potência elétrica de saída de um GRV-C (P_{ele}) é calculada por meio de:

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

em que:

- k_e - fator de eficiência;
- k_d - ciclo de operação da máquina;
- A_s - tensão de alimentação;
- ω_{rot} - velocidade do rotor em rad/s;
- B - densidade de campo no polo do estator;
- l_r - comprimento do polo do rotor (Figura 2);
- r_{int} - raio interno (Figura 2);
- L_u - indutância na posição desalinhada;
- L_a - indutância na posição alinhada.

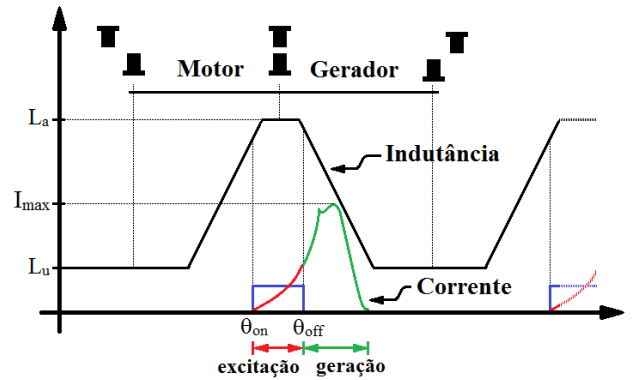


Fig. 3. Comportamento da indutância e etapas de funcionamento.

Em geral, a variável l_r é um submúltiplo do raio interno de acordo com [13]. Nessa pesquisa, foi adotado l_r igual a largura do polo do estator.

O fator de eficiência k_e está relacionado à conversão eletromecânica de energia e, de acordo com [17] está em uma faixa de 0,8 a 0,93.

A variável k_d representa o ciclo de operação da máquina e é definida por:

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

onde:

- θ_i - ângulo mecânico de condução de corrente;
- m - número de fases da máquina;
- N_{ro} - número de polos do rotor.

O carregamento elétrico específico, A_s , é a densidade de corrente linear ao longo do entreferro e pode ser calculado por meio de:

$$A_s = \left(\frac{2 N_{esp} I_{max} m' n'}{\pi D} \right) \quad (3)$$

sendo:

- N_{esp} - número de espiras por fase;
- I_{max} - corrente máxima de fase;
- m' - número de fases que conduzem simultaneamente;
- n' - número de polos ativos por fase;
- D - diâmetro interno do rotor ($D = 2 \cdot r_{int}$).

Em geral, A_s encontra-se em uma faixa de 20000 a 90000 ampere-espiras/metros [20].

A tensão por fase é determinada por:

$$v = Ri + \frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} \quad (4)$$

em que:

- v - tensão instantânea;
- R - resistência do enrolamento;
- I - corrente instantânea no enrolamento;
- θ - ângulo de posição do rotor;
- λ - fluxo concatenado;
- t - tempo.

Desconsiderando a resistência R e assumindo que a corrente de fase constante durante o período de condução de fase, (4) pode ser simplificada, e a tensão do enrolamento de fase torna-se igual a tensão induzida:

$$V = I \frac{(L_a - L_u)}{\Delta t} \quad (5)$$

onde:

V - tensão do enrolamento de fase;

I - corrente do enrolamento;

Δt - tempo em que o rotor sai da posição de total alinhamento para a de total desalinhamento.

III. PROJETO E OTIMIZAÇÃO DO GRV-C

A. Dimensões Iniciais do GRV-C

O projeto do núcleo magnético do GRV-C parte das equações de saída do gerador e das especificações básicas tais como: potência nominal, tensão de saída e velocidade nominal de operação. Nessa pesquisa, são projetados três geradores com potência elétrica e tensão de saída de 1500 W e 180 V, respectivamente, para as seguintes velocidades nominais: 650 rpm, 1000 rpm e 1500 rpm.

Após as definições básicas, é necessário selecionar a geometria do GRV-C, calcular as dimensões do núcleo magnético e determinar o projeto da bobina do estator. A determinação desses parâmetros tem sido documentada na literatura para máquinas de relutância de fluxo radial (tradicionais). Esses mesmos procedimentos podem ser adaptados para as máquinas de relutância de fluxo axiais, baseando-se em suas similaridades.

A metodologia proposta nessa pesquisa envolve a obtenção das dimensões do núcleo magnético a partir de um projeto inicial (pré-projeto). Em seguida, as dimensões finais do projeto são encontradas por meio da utilização de uma técnica de otimização multiobjetivo. O fluxograma da Figura 4 ilustra as etapas de projeto do GRV-C.

Observa-se que, na metodologia adotada, as dimensões do pré-projeto podem ser escolhidas de forma arbitrária. Contudo, é importante esclarecer que partir de um projeto inicial que atenda, ainda que parcialmente, as especificações do projeto é um bom ponto de início para técnica de otimização adotada, uma vez que torna o processo de busca mais rápido. Um exemplo de procedimento para determinar as dimensões iniciais do pré-projeto é apresentado em [16]. Por questões de simplificação, não é descrito nesse artigo.

As dimensões dos projetos iniciais dos geradores e as vistas dos núcleos são apresentadas na Tabela I e na Figura 5.

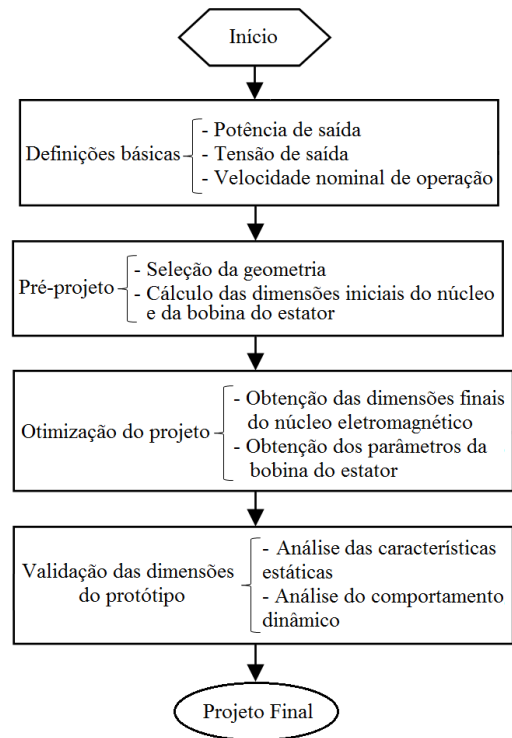


Fig. 4. Etapas do projeto do GRV-C.

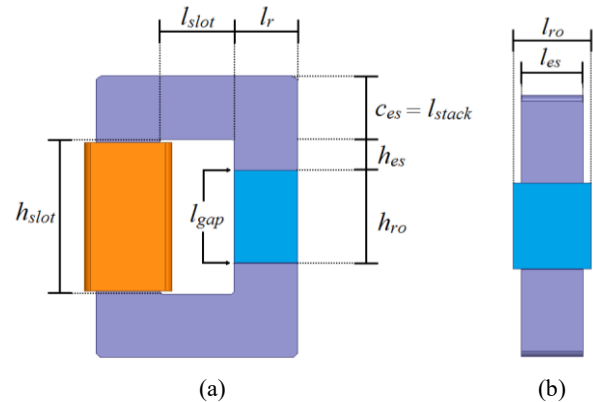


Fig. 5. Vistas do GRV-C: (a) frontal; (b) lateral.

TABELA I

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	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 (β_{es})	0,3054	0,3054	0,3054	Arco polar do rotor (β_{ro})	0,3927	0,3054	0,3054
Raio interno do rotor (r_{int})	114 mm	100 mm	86 mm	Entreferro (l_{gap})	0,25 mm	0,25 mm	0,25 mm
Largura do polo do estator (l_{es})	35 mm	31 mm	27 mm	Largura do polo do rotor (l_{ro})	45 mm	40 mm	35 mm
Altura do polo do estator (h_{es})	21 mm	19 mm	16 mm	Altura do polo do rotor (h_{ro})	63 mm	55 mm	48 mm
Comprimento da ranhura (l_{slot})	50 mm	44 mm	40 mm	Altura da ranhura (h_{slot})	105,5 mm	93,5 mm	80,5 mm
Comprimento dos polos (l_r)	45 mm	31 mm	27 mm	Corrente máxima (I_{max})	5 A	5 A	5 A
Número de espiras por núcleo C (N_{esp})	405	260	339	Carregamento elétrico (A_s)	22617 At/m	16552 At/m	25095 At/m

B. Projeto Final do GRV-C

O processo de otimização de qualquer dispositivo eletromagnético exige um compromisso entre o objetivo a ser atingido, as definições dos parâmetros de projeto e as restrições do sistema.

As dimensões finais do núcleo magnético C são calculadas por meio de um método de otimização multiobjetivo nessa pesquisa. Deseja-se obter geradores de relutância em que a potência elétrica de saída esteja entre 1,5 kW e 2,0 kW e tensão induzida no terminal entre 90 V e 180 V. Nota-se que há mais de um objetivo a ser atingido, caracterizando o problema como multiobjetivo.

Além disso, o método dos elementos finitos em duas dimensões (MEF-2D) é acoplado ao processo iterativo de otimização a fim de melhor representar as não linearidades das funções objetivos do sistema.

A formulação geral de um problema multiobjetivos é dada por [21]:

$$\text{minimizar: } OF = f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x) \quad (6)$$

$$\text{sujeito a: } g_1(x) \leq 0, g_2(x) \leq 0, \dots, g_h(x) \leq 0 \quad (7)$$

onde:

OF - função multiobjetivo;

$f_p(x)$ - funções objetivo;

$g_h(x)$ - restrições;

p - número de funções objetivo (p inteiro);

h - número de funções de restrição (h inteiro).

O processo de otimização busca um vetor solução dentro de um espaço euclidiano de quatro dimensões $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]$ que é a melhor solução para o vetor formado com as funções objetivos, $[f_1(x) \ f_2(x)]$, também definido dentro de um espaço euclidiano.

Observa-se que na otimização multiobjetivos, não há uma única solução ótima, e sim um conjunto de soluções possível e não dominadas conhecidas também por soluções ótimas de Pareto. Por definição, um vetor A é 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 [22].

Na otimização do núcleo do GRV-C, as variáveis do vetor solução $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]$ são, respectivamente: N_{esp} , r_{int} , β_{es} e β_{ro} . Os valores máximos e mínimos do vetor de variáveis são definidos na Tabela II.

A técnica de otimização adotada nessa pesquisa 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 [23]. Ele 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 dessa técnica de otimização uma vez que deseja-se encontrar as soluções mais próximas a Fronteira de Pareto que tenham a maior diversidade possível, como ilustrado na Figura 6.

O Método dos Pesos torna-se ineficiente quando o espaço de objetivos é não convexo, um vez que ele não consegue gerar todas as soluções de pareto ótimas [24]. Distribuir uniformemente os pesos, não garante que as soluções encontradas no espaço objetivo sejam uniformemente distribuídas, como mostrado na Figura 7.

Aplicando o Método dos Pesos, determina-se a função objetivo e as relações de restrição, respectivamente, por:

$$OF(x) = \min \sum w_i c_i f_i(x), i = 1,2 \quad (8)$$

$$\text{sujeito a: } x_3 - x_4 \leq 0 \text{ e } x_3 + x_4 \leq 0,78539. \quad (9)$$

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

$$c_i = \frac{1}{\max(f_i(x)) - \min(f_i(x))}, i = 1,2. \quad (10)$$

As funções objetivos f_1 e f_2 são, respectivamente, o quadrado do erro relativo da potência elétrica de saída e o quadrado do erro relativo da tensão induzida no enrolamento, E_{ind} :

$$f_1(x) = \left(\frac{P_{ele}(x) - P_{rel}}{P_{rel}} \right)^2 \quad (11)$$

$$f_2(x) = \left(\frac{E_{ind}(x) - E_{rel}}{E_{rel}} \right)^2 \quad (12)$$

onde:

P_{rel} - potência de saída relativa;

E_{rel} - tensão induzida relativa.

Os valores de P_{ele} e E_{ind} são determinados pelo método dos elementos finitos em duas dimensões (MEF-2D) com o auxílio do programa *Finite Element Method Magnetics* (FEMM).

TABELA II

Valores Máximos e Mínimos do Vetor X: Gerador 1, 2 e 3

Parâmetro	N_{esp}	r_{int}	β_{es}	β_{ro}
Mínimo	230	50	0,2618	0,2618
Máximo	700	150	0,39269	0,52359

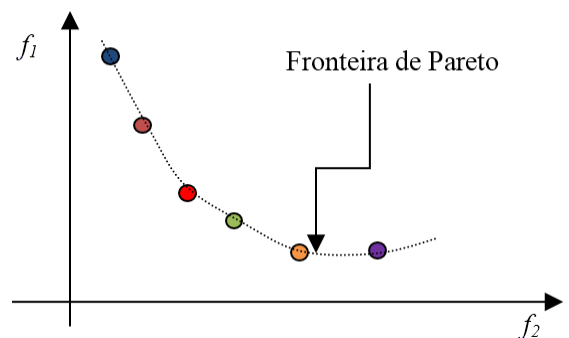


Fig. 6. Soluções de Pareto: diversidade de soluções satisfatória.

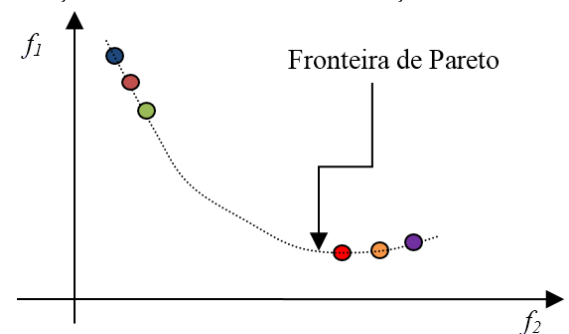


Fig. 7. Soluções de Pareto: diversidade de soluções precária.

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 multiobjetivo seja menor que a solução vigente [25]-[27].

A cada iteração, o algoritmo de otimização solicita os valores da indutância na posição alinhada e desalinhada dos polos. Devido a 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. Esses 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 ao baixo esforço computacional quando comparado ao MEF-3D.

Com o objetivo de reduzir essa diferença, foram incluídos fatores de correção nas indutâncias alinhada e desalinhada quando calculadas por meio do MEF-2D:

$$k_a = \left(\frac{1}{1 - erro_a} \right) = \left(\frac{1}{1 - \left(\frac{L_{a_3D} - L_{a_2D}}{L_{a_3D}} \right)} \right) \quad (13)$$

$$k_u = \left(\frac{1}{1 - erro_u} \right) = \left(\frac{1}{1 - \left(\frac{L_{u_3D} - L_{u_2D}}{L_{u_3D}} \right)} \right) \quad (14)$$

onde:

- L_{a_3D} - indutância alinhada calculada pelo MEF - 3D;
- L_{u_3D} - indutância desalinhada calculada pelo MEF - 3D;
- L_{a_2D} - indutância alinhada calculada pelo MEF - 2D;
- L_{u_2D} - indutância desalinhada calculada pelo MEF - 2D.

Os fatores de correção k_a e k_u são estimados de acordo o nível de saturação do material magnético. Para um grupo de pontos dentro do intervalo de busca do número de espiras (Tabela II), é verificada diferença entre os valores de indutância calculados por meio do MEF em duas e três dimensões (Figura 8). Os fatores k_a e k_u são calculados com base na interpolação do erro percentual entre essas duas indutâncias a partir de um número de espiras equivalente a saturação magnética do material.

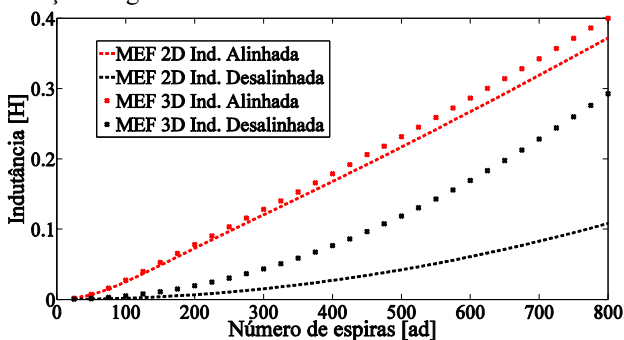


Fig. 8. Indutância versus número de espiras.

Aplicando o método dos pesos na minimização de *OF*, foi determinada a Distribuição de Pareto para cada projeto do gerador conforme ilustram as Figuras 9, 10 e 11. Após a determinação da curva de Pareto, é necessário utilizar procedimentos de tomada de decisão a fim de definir qual dos projetos ótimos será adotado.

Várias são as técnicas e algoritmos existentes na literatura que realizam a tomada de decisão. Em geral, eles estão relacionados com a redução do custo final do projeto e facilidade de fabricação. Como nesse projeto não há um compromisso entre custo e fabricação, o critério de decisão adotado para o protótipo foi o ponto mais próximo dos dois objetivos iniciais: f_1 e f_2 mais próximo de zero. Para isso, foi traçada uma circunferência com centro em (0,0). O ponto ótimo da curva de Pareto mais próximo da circunferência para cada gerador são mostrados nas Tabelas III à V e as dimensões finais na Tabela VI.

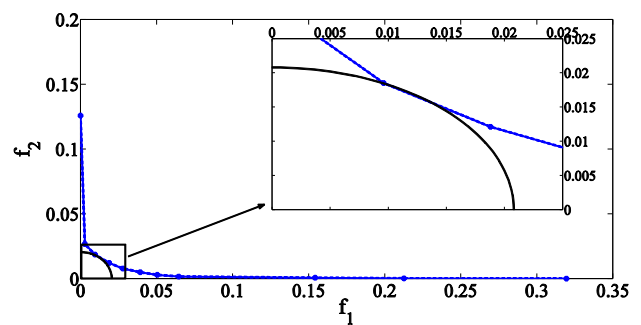


Fig. 9. Curva de Pareto: Gerador 1.

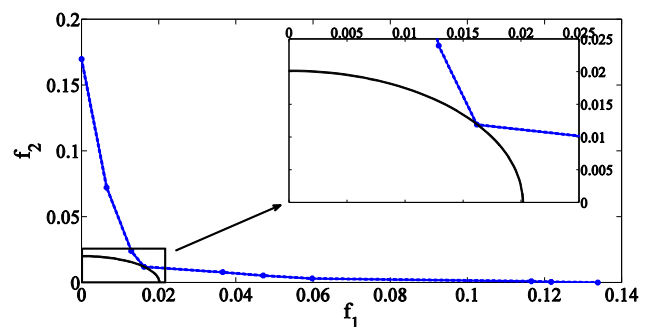


Fig. 10. Curva de Pareto: Gerador 2.

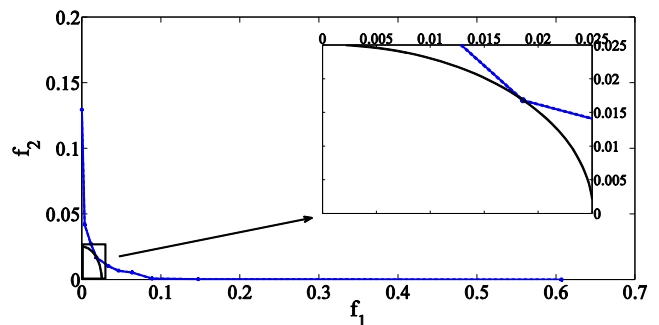


Fig. 11. Curva de Pareto: Gerador 3.

TABELA III
Resultados da Otimização: Gerador 1

Projeto ótimo escolhido	N_{esp}	r_{int}	β_{es}	β_{ro}
	P_{ete} (kW)	E_{ind} (V)	f_1	f_2
	350	114	0,373	0,390
	1,647	120,94	0,0159	0,0971

TABELA IV
Resultados da Otimização: Gerador 2

Projeto ótimo escolhido	N_{esp}	r_{int}	β_{es}	β_{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 V
Resultados da Otimização: Gerador 3

Projeto ótimo escolhido	N_{esp}	r_{int}	β_{es}	β_{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	

TABELA VI
Parâmetros Finais do GRV-C: Gerador 1 (650 rpm), Gerador 2 (1000 rpm) e Gerador 3 (1500 rpm)

Parâmetro	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3	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 (β_{es})	0,373	0,381	0,368	Arco polar do rotor (β_{ro})	0,390	0,381	0,391
Raio interno do rotor (r_{int})	114 mm	96 mm	86 mm	Entreferro (l_{gap})	0,25 mm	0,25 mm	0,25 mm
Largura do polo do estator (l_{es})	43 mm	37 mm	32 mm	Largura do polo do rotor (l_{ro})	45 mm	37 mm	34 mm
Altura do polo do estator (h_{es})	21 mm	18 mm	16 mm	Altura do polo do rotor (h_{ro})	63 mm	53 mm	47 mm
Comprimento da ranhura (l_{slot})	50 mm	41 mm	38 mm	Altura da ranhura (h_{slot})	105,5 mm	89,5 mm	79,5 mm
Comprimento dos polos (l_r)	43 mm	37 mm	32 mm	Corrente máxima (I_{max})	5 A	5 A	5 A
Número de espiras por núcleo C (N_{esp})	350	311	272	Carregamento elétrico (A_s)	19545 At/m	20624 At/m	20135 At/m

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações estáticas foram desenvolvidas nos programas Maxwell 3D (Ansys) e as simulações em transiente com o auxílio do programa Matlab e Simulink.

A. Resultado 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.

A distribuição da densidade de fluxo magnético na posição totalmente alinhada e desalinhada para o projeto final do Gerador 1 são apresentadas nas Figuras 12 e 13. Por questões de simplificação, é apresentada a distribuição do campo apenas para o GRV-C de 650 rpm.

Os resultados das magnitudes das densidades de campo no polo do estator para as posições alinhadas e desalinhadas dos três geradores são mostrados na Tabela VII.

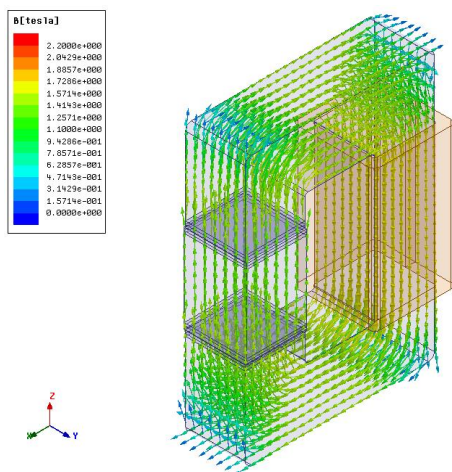


Fig. 12. Distribuição do campo magnético Gerador 1: alinhado.

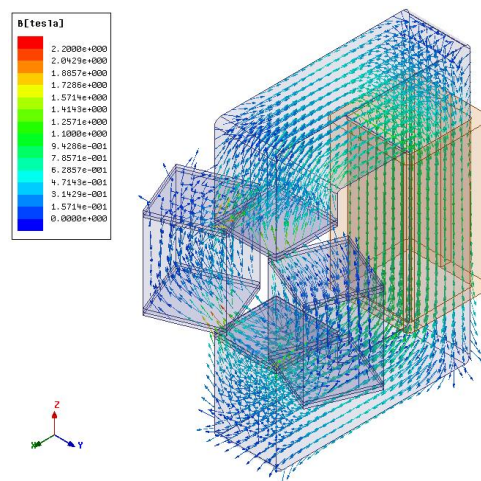


Fig. 13. Distribuição do campo magnético Gerador 1: desalinhado.

Conforme esperado, as densidades de campo nas posições alinhadas encontram-se em torno de 1,4 T, ou seja, na região do joelho da curva de magnetização do material magnético, conforme pode-se observar na Figura 14.

O trabalho por ciclo (W_m) realizado por cada núcleo do GRV-C é obtido calculando a área entre as curvas de fluxo concatenado nas posições alinhada (0°) e desalinhada ($22,5^\circ$) dos polos, dadas na Figura 15. Desta forma, a potência elétrica estática máxima (P_{max_est}) é obtida por:

$$P_{max_est} = \frac{n' W_m m N_{ro}}{2\pi} \omega_{rot} \quad (15)$$

TABELA VII
Magnitude do Campo Magnético no Polo do Estator

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

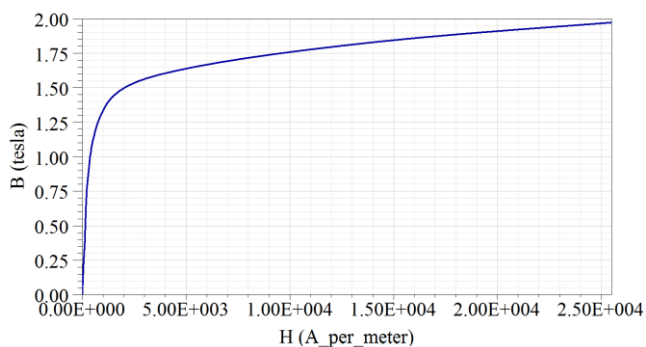


Fig. 14. Curva do material magnético: DR5 10-50.

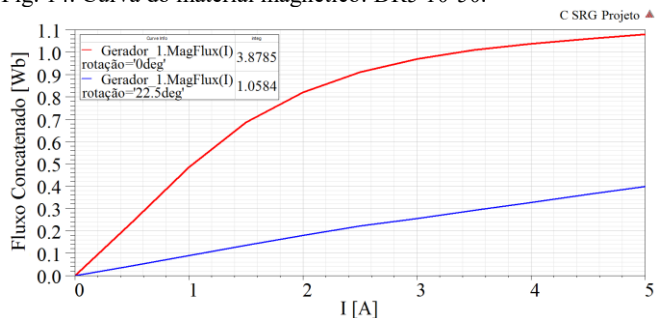


Fig. 15. Fluxo concatenado em um núcleo C nas posições alinhada e desalinhada – Gerador 1.

Observa-se que essa seria a potência elétrica caso a corrente elétrica permanecesse constante nos enrolamentos e se toda a curva de decrescimento da indutância fosse utilizada durante o estágio de geração. Durante a operação dinâmica esse fato não ocorre. As potências estáticas calculadas por meio de (15) para os três geradores são mostradas na Tabela VIII.

A Figura 16 ilustra o perfil de indutância para os Geradores 1, 2 e 3. Os valores das indutâncias L_a e L_u para cada gerador são mostrados na legenda. Aplicando esses valores em (5), determina-se a tensão induzida no enrolamento que é igual a tensão de fase (negligenciando R). A potência elétrica para cada gerador também pode ser determinada aplicando em (1) os valores de L_a e L_u , bem como demais parâmetros solicitados na equação apresentados nas Tabelas VI e VII.

Os valores obtidos de P_{ele} e E_{ind} para cada gerador são mostrados na Tabela IX. Conforme esperado, os valores das potências elétricas e tensões induzidas estão próximos aos valores calculados por meio do MEF-2D, como mostrado nas Tabelas X e XI.

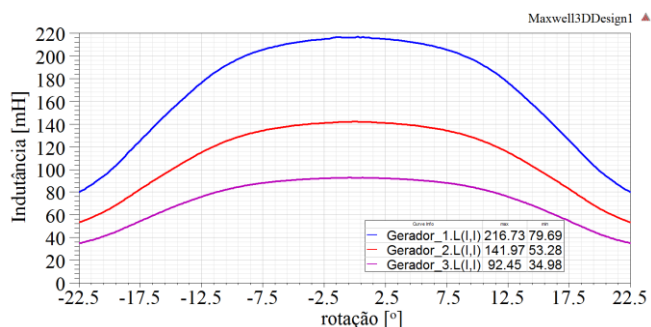


Fig. 16. Indutâncias: Gerador 1, Gerador 2 e Gerador 3.

Observa-se que o volume do núcleo magnético do GRV-C (estator + rotor) é inversamente proporcional a velocidade nominal de operação. O Gerador 3 cuja a velocidade nominal de operação é maior do que no Gerador 1 e 2, possui um volume menor em relação aos outros dois, como mostrado na Tabela XII. Conseqüentemente, as perdas no núcleo magnético também serão menores [28], [29].

TABELA VIII
Potência Estática Máxima: Gerador 1, 2 e 3

	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3
P_{max_est}	2,93 kW	2,89 kW	2,73 kW

TABELA IX
Potência Elétrica e Tensão Induzida

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

TABELA X
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)
MEF – 2D	216,5	73,5	141,8	48,5	92,3	30,5
MEF – 3D	216,73	79,69	141,97	53,36	92,45	34,98

TABELA XI
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)
MEF – 2D	1,65	120,94	1,69	124,71	1,70	121,87
MEF – 3D	1,64	124,1	1,58	121,8	1,58	122,4

TABELA XII
Volume dos Núcleos Magnéticos

	Estator (mm ³)	Rotor (mm ³)	Total (mm ³)
Gerador 1	775,512 · 10 ³	121,905 · 10 ³	897,417 · 10 ³
Gerador 2	486,298 · 10 ³	72,557 · 10 ³	558,855 · 10 ³
Gerador 3	322,742 · 10 ³	51,136 · 10 ³	373,878 · 10 ³

B. Resultado de Simulação Transiente (Dinâmica)

As respostas dinâmicas dos geradores foram determinadas por meio de simulações desenvolvidas no software Matlab/Simulink. Para cada gerador, foi implementado um modelo no Simulink acoplado a um sistema de controle e acionamento, mostrado na Figura 17. O modelo do GRV-C é desenvolvido a partir das curvas de magnetização de cada máquina adquiridas nos ensaios estáticos. Os procedimentos para a obtenção desses modelos foram descritos em [16].

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

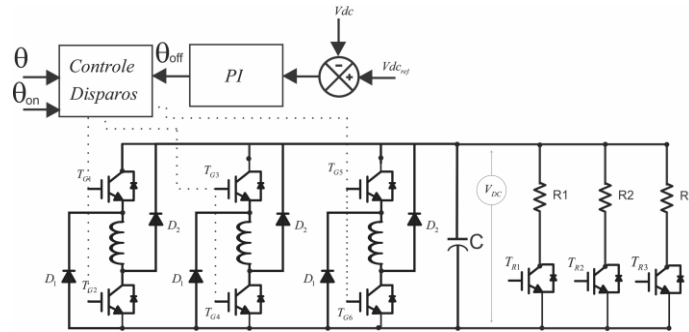


Fig. 17. Conversor eletrônico de potência e o sistema de controle para acionamento do GRV-C.

Os GRVs-C operam auto excitados, ou seja, não necessitam de outra fonte para magnetização. A tensão inicial no capacitor do elo CC é de 180 V.

Durante o ensaio, são inseridas gradativamente três cargas (R1, R2, R3) de 500 W. 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 18, 19 e 20 observa-se que os GRVs-C projetados geraram a potência de 1,5 kW nas velocidades nominais de operação. Além disso, o sistema de controle manteve a tensão em 180 V para os três geradores simulados após a inserção das cargas, como mostrado na Figura 21.

Na Figura 22 observam-se as correntes elétricas da Fase A de cada GRV-C no período em que a potência gerada é de 1500 W.

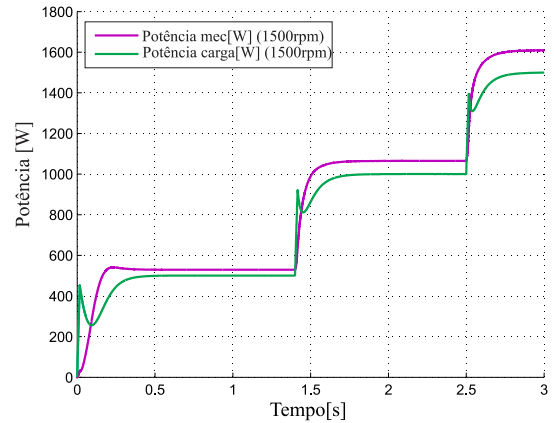


Fig 20. Potência mecânica e potência nas cargas para o Gerador 3.

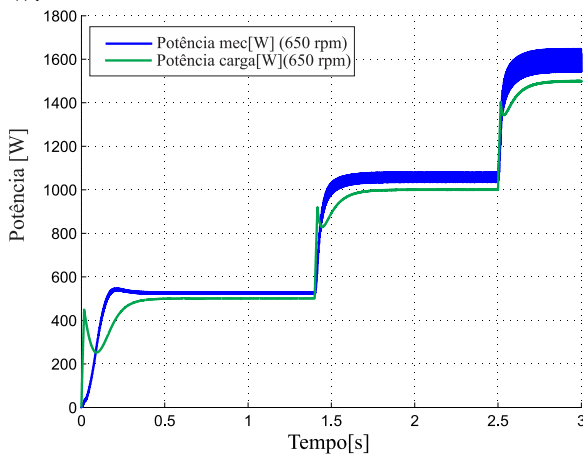


Fig 18. Potência mecânica e potência nas cargas para o Gerador 1.

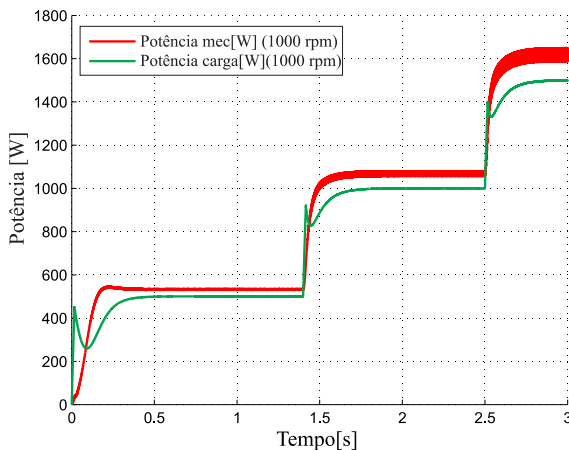


Fig 19. Potência mecânica e potência nas cargas para o Gerador 2.

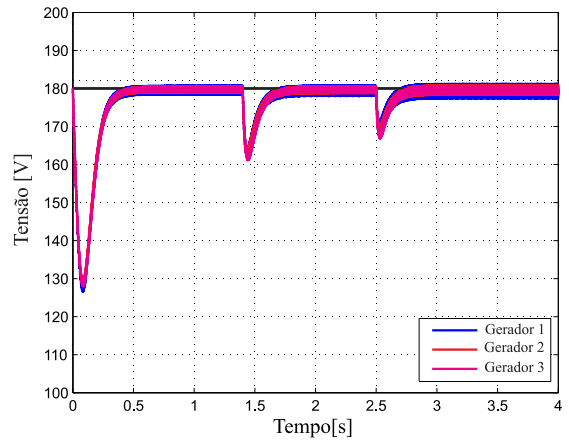


Fig. 21. Tensão no barramento CC para os três GRVs-C projetados.

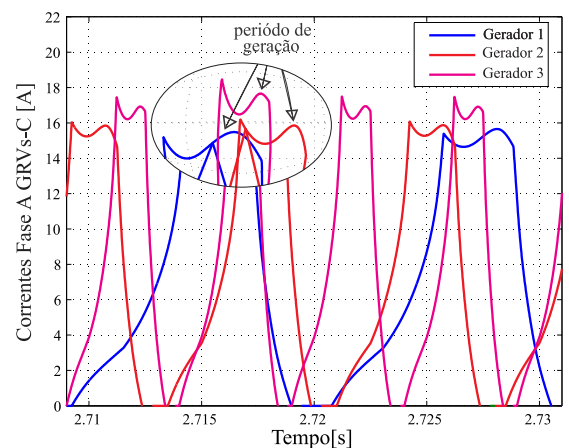


Fig. 22. Correntes nas fases A dos GRVs-C projetados.

Nota-se que nos três GRVs-C projetados, a corrente cresce no período de geração, deste modo o fator de excitação e consequentemente as perdas elétricas são menores [28], [29].

Desconsiderando as perdas magnéticas, as potências elétricas e mecânicas (P_{mec}) foram obtidas para cada simulação e o rendimento foi calculado, com os valores apresentados na Tabela XIII. Os três geradores projetados apresentaram um alto rendimento.

TABELA XIII
Comparação dos Resultados: Potências e Rendimento

	P_{ele} (kW)	P_{mec} (kW)	Rendimento
Gerador 1	1,500	1612	0,93
Gerador 2	1,500	1621	0,925
Gerador 3	1,500	1595	0,94

V. CONCLUSÕES

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. Sua estrutura modular de simples fabricação e a baixa inércia do rotor a sua natureza chaveada o torna bastante adequado para operações de velocidade variável.

As principais contribuições desse artigo são a apresentação de uma metodologia de projeto eletromagnético de geradores do tipo C e o seu acionamento em operação auto excitada para. Não foram encontradas na literatura pesquisas sobre a utilização do GRV-C em operação auto excitada. Logo, esse artigo também possui um caráter tutorial, abordando esse tema pouco difundido e auxiliando no desenvolvimento de novas pesquisas.

São projetados três geradores de 1,5 kW com velocidades nominais de 650 rpm, 1000 rpm e 1500 rpm. A metodologia de projeto utiliza uma técnica de otimização clássica em conjunto com o método dos elementos finitos em duas dimensões. Optou-se pelo uso do MEF-2D devido ao alto esforço computacional durante o processo de otimização quando comparado com o MEF em três dimensões, contudo foi necessário a inclusão de fatores de correção no cálculo das indutâncias do modelo do GRV-C.

Os resultados estáticos, obtidos com o uso do método dos elementos finitos em três dimensões, indicam que a metodologia utilizada é adequada para a determinação das dimensões finais de geradores do tipo GRV-C. Nota-se 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.

Os resultados dos ensaios dinâmicos comprovaram a viabilidade e a eficiência da metodologia proposta no projeto de GRV-C para geração eólica. Os três geradores projetados (Gerador 1, Gerador 2 e Gerador 3) atendem as especificações requeridas. Além disso, o sistema de controle manteve a tensão em 180 V para os três geradores simulados mesmo após a inserção das cargas. O rendimento do sistema manteve-se acima de 90% nos três ensaios.

As simulações estática e dinâmica 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.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Méndez, A. Martínez, W. Millán, C. E. Montaña, F. Pérez-Cebolla, "Design, Characterization, and Validation of a 1-kW AC Self-Excited Switched Reluctance Generator," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, n° 2, pp. 846-855, Fevereiro. 2014.
- [2] G. Viajante, D. A. Andrade, A. W. F. V. Silveira, V. R. Bernadelli, L. C. Gomes, J. L. Domingos, A. V. Fleury, "Estratégia para Melhoria da Eficiência da Conversão Eletromecânica de Energia do GRV", *Eletrônica de Potência*, vol. 16, n° 4, pp. 367-375, Dezembro, 2011.
- [3] D. A. Torrey, "Switched Reluctance Generators and Their Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, n° 1, pp. 3-14, Fevereiro, 2002.
- [4] 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, Brasil, 2015.
- [5] R. Cardenas, W. F. Ray, G.M. Asher, "Switched reluctance generators for wind energy applications", in *Proc. of IEEE PESC '95*, vol.1, pp. 559-564, 1995.
- [6] E. A. E. Jebaseeli, D. Susitra, "Performance Analysis of various configurations of Switched Reluctance Machine for Wind Energy Applications," in *Proc. of Recent Advances in Space Technology Services and Climate Change*, pp. 419-423, 2010.
- [7] D.-W. Choi, S.-I. Byun, Y.-H. Cho, "A Study on the Maximum Power Control Method of Switched Reluctance Generator for Wind Turbine," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, n° 1, pp. 1-4, Janeiro, 2014.
- [8] J. F. Pan, C. C. Sun, G.-Z. Cao, N. C. Cheung, "Design and simulation of a novel planar switched reluctance generator", in *Proc of 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, pp. 1-3, 2011.
- [9] J.-H. Oh, B.-I. Kwon, "Design, Optimization, and Prototyping of a Transverse Flux Type Switched Reluctance Generator with an Integrated Rotor", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, n° 4, pp. 1521 – 1529, Dezembro, 2016.
- [10] V. S. C. Teixeira, E. R. Filho, T. A. d. S. Barros, A. B. Moreira, "Design, Optimization and Analysis of the Axial C-core Switched Reluctance Generator for wind power application," in *Proc. of International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pp. 833 – 837, 2015.
- [11] Y.J. Bao, K.W.E. Cheng, "Research on a novel switched reluctance generator for wind power generation," in *Proc. of Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, pp. 1 – 6, 2011.
- [12] X. D. Xue, K. W. E. Cheng, Y. J. Bao, J. Leung, "Design Consideration of C-core Switched Reluctance

- Generators for Wind Energy,” in *Proc. of Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, pp. 1 – 6, 2011.
- [13] X. Liu, K. Park, Z. Chen, “A Novel Excitation Assistance Switched Reluctance Wind Power Generator”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, n° 11, Novembro, 2014.
- [14] K. Ramu, *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications*, CRC Press, 2011.
- [15] V. S. C. Teixeira, E. R. Filho, A. B. Moreira, T. A. S. Barros, “Projeto eletromagnético para gerador a relutância variável com núcleo C de baixa potência”, in *Proc. of 16º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 11º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (MOMAG)*, pp. 535 – 540, 2014.
- [16] B. T. A. Barros, P. S. Nascimento, A. B. Moreira, V. S. Teixeira, M. G. Villalva, E. Ruppert Filho, “Sistema automático de caracterização de máquinas a relutância variável e modelagem não linear por interpolações utilizando smoothing splines”, *Eletrônica de Potência*, vol. 20, n° 2, pp. 140-150, Maio, 2015.
- [17] A. Labak, N. C. Kar, “Designing and prototyping a novel five phase 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, Maio/Junho, 2013.
- [18] A. Labak, N. C. Kar, “A novel five-phase pancake shaped switched reluctance motor for hybrid electric vehicles,” in *Proc. of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 494–499, 2009.
- [19] N. Sadowski, Y. Lefevre, C.G.C. Neves, 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, n° 3, pp. 1086 – 1089, Maio, 1996.
- [20] R. Krishnan, M. Abouzeid, X. Mang, “A design procedure for axial field switched reluctance motors,” in *Proc. Industry Applications Society Annual Meeting, 1990, Conference Record of the 1990 IEEE*, vol. 1, pp. 241–246, 1990.
- [21] R. Yang, L. Wang, “Multi-objective optimization for decision-making of energy and comfort management in building automation and control” *Sustainable Cities and Society*, vol. 2, n° 1, pp. 1–7, Fevereiro, 2012.
- [22] G. P. Junior, *Método de Otimização Multiobjetivo e de Simulação Aplicados ao Problema de Planejamento Operacional de Lavra em Minas a Céu Aberto*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil, 2011.
- [23] P. R. Sampaio, *Teoria, método e aplicação de otimização multiobjetivo*, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de São Paulo, Brasil, 2011.
- [24] K. Deb, *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, Wiley-Interscience Series in Systems and Optimization. John Wiley & Sons, Chichester, 2001.
- [25] H. O. C. Ramos, *Um algoritmo para otimização restrita com aproximação de derivadas*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- [26] C. Audet, J. E. Dennis Jr, “A pattern search filter for nonlinear programming without derivatives”, *SIAM J. OPTIM*, vol. 14, n° 4, pp. 980-1010, Julho, 2004.
- [27] R. S. Ferreira, *Uma abordagem multiescalar, multicritério para a segmentação de imagens*, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- [28] C. Mademlis, I. Kioskeridis, “Optimizing performance in current-controlled switched reluctance generators”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, n° 3, pp. 556–565, Setembro, 2005.
- [29] T. A. S. Barros, P. J. S. Neto, P. S. N. Filho, A. B. Moreira, E. Ruppert, “Approach for Performance Optimization of Switched Reluctance Generator in Variable-speed Wind Generation System”, *Renewable Energy*, vol. 97, pp. 114-128, Novembro, 2016.

DADOS BIOGRÁFICOS

Vanessa Siqueira de Castro Teixeira, nascido em 17/02/1982 em Fortaleza, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará (2004) com habilitação em Sistemas Elétricos e Mestrado pela Universidade Federal do Ceará (2008) na área de Eletrônica de Potência e Acionamentos de Máquinas Elétricas.

Atualmente é professora Assistente do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará – Campus de Sobral e estudante de doutorado do programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Estadual de Campinas. Possui experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos, atuando principalmente nos seguintes temas: Projeto de Máquinas Elétricas de Relutância Rotativa, Motores de Relutância Linear, Técnicas de Modelagem de Máquinas Elétricas e Eficiência Energética em Máquinas Motrizes.

É membro da Sociedade Brasileira de Automática (SBA) e da Associação Brasileira de Ensino em Engenharia (ABENGE).

Tárcio André dos Santos Barros, nascido em 1987 em Petrolina-PE é engenheiro eletricista (2011) pela Universidade Federal do Vale do São Francisco, mestre (2012) e doutor (2015) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas.

Atualmente é pos-doutorando em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas UNICAMP com bolsa da FAPESP. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em máquinas elétricas, eletrônica industrial, sistemas de controles eletrônicos, instrumentação eletrônica.

É Membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP) e do IEEE.

Adson Bezerra Moreira, nasceu em Fortaleza em 1979, é engenheiro eletricista (2003) e mestre em Engenharia Elétrica (2006) pela Universidade Federal do Ceará (UFC). É professor adjunto do Curso de Engenharia Elétrica da UFC-Campus Sobral.

Atualmente é doutorando na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas. Tem experiência nas áreas de máquinas elétricas, eficiência energética, energia renovável, qualidade de energia, eletrônica de potência, filtragem ativa de potência, acionamentos de máquinas de elétricas.

É Membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP) e da Sociedade Brasileira de Automática (SBA).

Ernesto Ruppert Filho Gradou-se em engenharia elétrica em 1971, obteve o mestrado em 1974, e doutorado também

em engenharia elétrica pela FEEC/UNICAMP em 1983, realizou pós doutorado na GE Canadá na área de projeto de geradores síncronos e de sistemas de excitação estática de geradores síncronos nos anos de 1987 e 1988.

É Professor Titular da FEEC/UNICAMP desde 2000. Atua nas seguintes áreas de pesquisa: Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica, Limitadores de Corrente Elétrica Supercondutores, Máquinas Elétricas, Eletrônica de Potência, Acionamentos Elétricos com Velocidade Variável, Energias Renováveis, Qualidade de energia e Eficiência Energética.

É Membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência, SOBRAEP.