

ESTRATÉGIA PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA DA CONVERSÃO ELETROMECHANICA DE ENERGIA DO GRV

*G.P.Viajante, D.A.Andrade, A. W. F. V. Silveira, V. R. Bernardeli, L.C.Coutinho,*M.A.A.Freitas,
*J.L.Domingos e **A. Fleury.

Universidade Federal de Uberlândia

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

**Pontificia Universidade Católica de Goiás/Universidade Estadual de Goiás

ghunterp@gmail.com, darizon@ufu.br

Resumo – O objetivo deste artigo é propor uma estratégia de melhoria da conversão eletromecânica de energia do Gerador a Relutância Variável (GRV). Esta estratégia é implementada através do controle da magnetização de cada fase do GRV. Para isto, foi utilizado um compensador do tipo PI para controlar a tensão na carga atuando no ângulo de abertura da chave superior do conversor em ponte assimétrica, *half-bridge* (HB), o que adiciona uma etapa de roda-livre às etapas de operação do conversor. No sentido de verificar a eficiência da estratégia proposta, foram desenvolvidas duas ações de trabalho. A primeira foi o desenvolvimento da simulação matemática do GRV no ambiente Matlab/Simulink®, acionado pela estratégia proposta. Na modelagem do GRV utilizou-se a abordagem não-linear, que inclui a representação da saturação do circuito magnético através do conceito de indutância incremental modelada através da Série de Fourier. Toda a estratégia de controle, o compensador PI, o conversor e os demais circuitos foram também simulados. A segunda foi o desenvolvimento de uma bancada experimental contendo um GRV de 5,0 kW, uma máquina primária, o conversor HB, circuitos de controle e uma carga resistiva. Foram realizados testes para diversos pontos de operação, tanto no modo de operação tradicional como para a estratégia proposta. Os resultados, de simulação e experimentais, apontam para melhoria advinda da estratégia proposta. Convém ressaltar ainda, que, para este experimento, foram utilizados apenas componentes analógicos, o que reduziu significativamente o custo total do sistema de acionamento.

Palavras-Chave – Gerador à Relutância Variável, Conversão Eletromecânica de Energia, Controle de Tensão na Carga, Eficiência e Roda-livre.

STRATEGY FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE ELETROMECHANICAL ENERGY CONVERSION OF SRG

Abstract – The aim of this work is to propose a strategy for improving the electromechanical energy conversion of the Switched Reluctance Generator (SRG). This strategy is implemented by controlling the magnetization of each

phase of the GRV. To achieve this, it is used a PI compensator to control the load voltage by driving the top switch of the half bridge (HB) converter, which adds a free-wheeling stage to the stages of the converter operation. In order to verify the efficiency of the proposed strategy, the work was divided in two areas of interest. At first, it was developed the mathematical simulation of SRG, in Matlab/Simulink® blocksets, driven by the proposed strategy. In GRV modeling it was used the non-linear approach, which includes the representation of the magnetic circuit saturation through the concept of incremental inductance modeled by Fourier series. The control strategy, the PI compensator, the HB converter and all the other circuits were also simulated. The second, it was the development of a experimental setup containing a 5.0 kW GRV, a primary machine, the HB converter, control circuit and a resistive load. Some tests were performed for various operating points, both in traditional operation mode as in the proposed strategy one. The results, simulated and the experimental ones, depict the improvement arising from the proposed strategy. It should be emphasized that, in this experimental setup, it was used only analog components, which reduced drastically the overall cost of the driving system.

Keywords - Switched Reluctance Generator, Electromechanical Energy Conversion, Load Voltage Control, Efficiency and Freewheeling.

I. INTRODUÇÃO

O gerador a relutância variável (GRV) tem sido alvo de estudos para aplicações que requerem velocidade variável, onde suas características construtivas o tornam competitivo em relação a outros tipos de máquinas [1]. São diversas as aplicações onde o seu uso tem sido explorado: geração de energia elétrica em aeronaves [2], automóveis [3-4] e energia eólica [5]. No caso das aplicações aeronáuticas e automotivas a operação em velocidade variável é requisito de compatibilidade com a máquina mecânica primária e que normalmente trabalha em altas velocidades. Nestas aplicações, a demanda por potência gerada tende a oscilar bruscamente com a entrada e saída de cargas que proporcionalmente representam grandes transitórios para o sistema de eletrificação. Já as aplicações em energia eólica, pesquisas têm sido realizadas para adequação do GRV em velocidade variável em baixa e média rotação. O objetivo do

¹ Artigo submetido em 07/10/2011. Revisado em 10/11/2011. Aceito para publicação em 17/11/2011 por recomendação do editor João Onofre P. Pinto.

controle nesta aplicação é otimizar a energia captada para produzir potência máxima de saída [6-7].

Algumas técnicas para o controle da tensão gerada pelo GRV têm sido propostas recentemente. Por exemplo, em [8] os autores apresentam três técnicas: PWM com ângulos de disparo fixo, controle da tensão de excitação com conversor *Buck* e uma técnica de variação do ângulo de abertura das chaves θ_{off} das chaves inferiores e superiores simultaneamente. Em [9] a tensão gerada é regulada mantendo θ_{off} fixo e θ_{on} é variado através de um algoritmo baseado em lógica *fuzzy*, mostrando que a eficiência aumenta com o aumento da velocidade do rotor.

Basicamente são três os parâmetros geralmente utilizados para o controle da geração de energia elétrica do GRV: ângulos de magnetização das fases (θ_{on} e θ_{off}) e a corrente de excitação. A potência de saída entregue à carga pelo GRV depende de duas fontes de energia: uma elétrica, para a excitação dos enrolamentos de fase e outra mecânica vinda da máquina primária. A dependência da potência de saída em função da potência de excitação se dá pelo fato que a excitação e a energia resultante entregue estarem no mesmo barramento. Assim a potência de excitação é uma parcela significativa da potência de saída e o tamanho e peso resultantes de uma fonte capaz de fornecer a potência de excitação, podem ser proibitivos no caso de máquinas de potências elevadas [10].

Desta forma uma estratégia para melhor aproveitamento da energia mecânica e uma diminuição da dependência da energia de excitação do GRV é desejável. Assim, diante destas informações, este artigo apresenta uma proposta para melhoria da eficiência da conversão eletromecânica do GRV. A estratégia baseia-se no controle de tensão gerada através da variação do ângulo de magnetização (θ_{off}) atuando apenas nas chaves superiores do conversor HB. Uma etapa de roda livre intermediária é acrescentada à estratégia de controle para diminuir a quantidade de energia fornecida pela fonte de excitação e obter melhor aproveitamento da energia mecânica. Uma descrição detalhada desta etapa é comentada para fundamentar a sua importância na estratégia de controle proposta. O GRV foi simulado a partir de um modelo não linear baseado na representação da indutância de fase pela Série de Fourier [11]. O modelo e a estratégia de controle foram validados através de resultados experimentais.

II. MODELO NÃO-LINEAR PARA ANÁLISE DINÂMICA DO GRV

A modelagem matemática para análise dinâmica do GRV é descrita tendo-se por referência uma fase da máquina de modo que a mesma é descrita como

$$v = Ri + \frac{\partial \lambda(i, \theta)}{\partial t} \quad (1)$$

A uma velocidade constante, a equação de tensão da fase é dada por

$$v = Ri + l \frac{di}{dt} + e \quad (2)$$

Onde v é a tensão aplicada, i é a corrente da fase, R é a resistência da fase, $e = \omega_r \partial \lambda(i, \theta) / \partial \theta$ é a força contraeletromotriz, $l = \partial \lambda(i, \theta) / \partial i$ é a indutância incremental da fase, θ é a posição do rotor.

Os efeitos de saturação são considerados no modelo através da representação da variação da indutância de fase em função da corrente e posição do rotor usando uma aproximação por Série de Fourier. A representação do perfil de indutância para diferentes valores de correntes e posições do rotor é baseada em uma aproximação utilizando segmentos de linhas retas conforme as Figuras 2 e 3. Na Figura 2 foi utilizada esta representação por conveniência matemática. Assim função de indutância para o protótipo testado neste trabalho foi determinada como

$$L(i, \theta) = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^m (l_{(j+1)}(i, \alpha_j) + l_j(i, \alpha_j)) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m (l_{(j+1)}(i) A_{(j,n)} - l_j(i) B_{(j,n)}) \right) \cos(nP_r \theta) \quad (3)$$

Onde:

$$A_{(j,n)} = \frac{2}{n\pi} \left(\sin(nP_r \alpha_{(j+1)}) + \frac{\cos(nP_r \alpha_{(j+1)}) - \cos(nP_r \alpha_j)}{nP_r (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j)} \right)$$

$$B_{(j,n)} = \frac{2}{n\pi} \left(\sin(nP_r \alpha_j) + \frac{\cos(nP_r \alpha_{(j+1)}) - \cos(nP_r \alpha_j)}{nP_r (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j)} \right)$$

m é o número de segmentos de retas, n é a ordem harmônica, P_r é o número de pólos do rotor, $G = 2\pi/P_r$ é o passo polar do rotor, θ é a posição do rotor, l_j é a indutância para o j 'ésimo segmento, α_j é a posição associada a esta indutância.

Um ajuste polinomial foi utilizado para representar a função $l_j(i, \alpha_j)$. A expressão para $l_j(i, \alpha_j)$ é dada como

$$l_j(i, \alpha_j) = C_{3j} i^3 + C_{2j} i^2 + C_{1j} i + C_{0j} \quad (4)$$

A expressão de fluxo pode ser escrita a partir de (3) como

$$\lambda(i, \theta) = L(i, \theta) i = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^m \left(\frac{(C_{3(j+1)} + C_{3j}) i^4 + \dots + (C_{0(j+1)} + C_{0j}) i}{(C_{0(j+1)} + C_{0j}) i} \right) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m (C_{3(j+1)} i^4 + \dots + C_{0(j+1)} i) A_{(j,n)} - (C_{3j} i^4 + \dots + C_{0j} i) B_{(j,n)} \right) \cos(nP_r \theta) \quad (5)$$

As expressões de co-energia e conjugado podem ser escritas como

$$W'(i, \theta) = \int_0^i \lambda(i, \theta) di = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^m \left(\left(\frac{C_{3(j+1)} + C_{3j}}{5} \right) i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0(j+1)} + C_{0j}}{2} \right) i^2 \right) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m \left(\left(\frac{C_{3(j+1)}}{5} \right) i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0(j+1)}}{2} \right) i^2 \right) A_{(j,n)} - \left(\left(\frac{C_{3j}}{5} \right) i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0j}}{2} \right) i^2 \right) B_{(j,n)} \right) \cos(nP_r \theta) \quad (6)$$

$$T_{emag} = \frac{\partial W'(i, \theta)}{\partial(\theta)} = -nP_r \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m \left(\left(\frac{C_{3(j+1)}}{5} \right) i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0(j+1)}}{2} \right) i^2 \right) A_{(j,n)} - \left(\left(\frac{C_{3j}}{5} \right) i^5 + \dots + \left(\frac{C_{0j}}{2} \right) i^2 \right) B_{(j,n)} \right) \sin(nP_r \theta) \quad (7)$$

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

Neste momento é oportuno observar que as expressões (3) até (7) são em função da posição e da corrente. Para qualquer valor de corrente dentro da faixa operacional em qualquer posição dada, os valores instantâneos da indutância de fase, co-energia e conjugado são obtidos, tornando o modelo matemático muito adequado para cálculos dinâmicos.

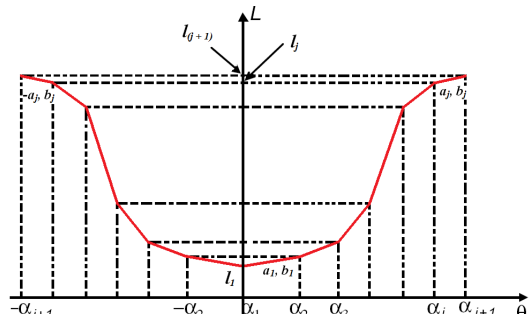


Fig. 2. Representação aproximada do perfil de indutância usando "j" segmentos de linhas retas.

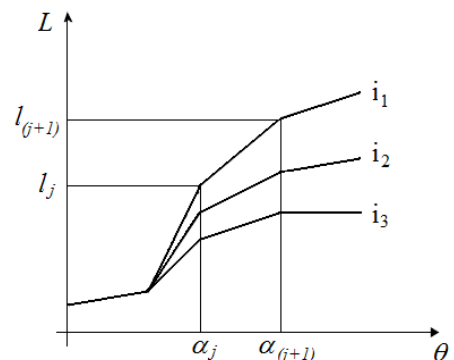


Fig. 3. Segmentos de linha de indutância versus posição do rotor.

Levando-se em conta as perdas por atrito visco D e o momento de inércia J , o conjugado mecânico produzido pela máquina foi calculado como

$$T_m = T_{emag} - J \frac{d\omega}{dt} - D\omega \quad (8)$$

A partir das equações apresentadas, o modelo matemático que descreve a dinâmica do GRV pode ser apresentado na forma de matriz de estados por meio de

$$[v] = [X][i] + [Y] \begin{bmatrix} \dot{i} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \quad (9)$$

Onde X e Y são matrizes que dependem de parâmetros construtivos da máquina. A solução do sistema permite assim uma análise completa do GRV [8] [12][13].

III. ESTRATÉGIA DE CHAVEAMENTO

Neste trabalho é proposta uma estratégia de chaveamento para o conversor HB, o qual é conectado as fases do GRV de modo que possibilita um incremento da energia elétrica gerada quando comparado com a estratégia de chaveamento clássica. O conversor HB é apresentado na Figura 4 e foi assumido que $\theta_{off} = \theta_{off1}$ durante um ciclo de variação de indutância em uma fase conforme Figura 5.

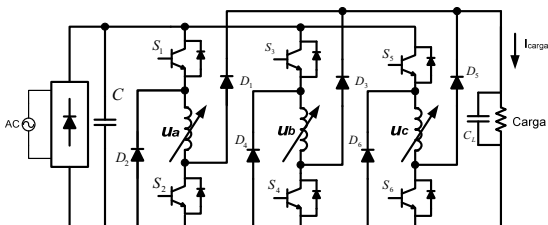


Fig. 4. Diagrama esquemático do conversor HB.

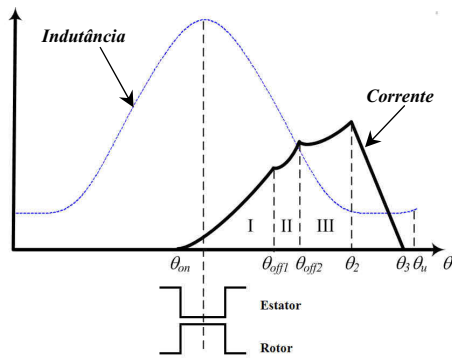


Fig. 5. Indutância e corrente de uma fase em função da posição do rotor.

A função clássica de chaveamento do conversor HB para acionamento de um GRV é normalmente dada por

$$S(S_1, S_2) = \begin{cases} 1 & S_1, S_2 : on (\theta_{on} < \theta \leq \theta_{off1}) \\ -1 & S_1, S_2 : off (0 < \theta \leq \theta_{on}, \theta_{off1} < \theta \leq \theta_3) \end{cases} \quad (10)$$

A função da tensão na fase pode ser escrita como

$$u(S) = \begin{cases} u_a & S = 1 \\ -u_a & S = -1 \end{cases} \quad (11)$$

Uma etapa intermediária de roda livre foi acrescentada para comparação com o método clássico. A função de chaveamento para uma fase é dada por

$$S(S_1, S_2) = \begin{cases} 1 & S_1, S_2 : on (\theta_{on} < \theta \leq \theta_{off1}) \\ 0 & S_1 : off, S_2 : on (\theta_{off1} < \theta \leq \theta_{off2}) \\ -1 & S_1, S_2 : off (0 < \theta \leq \theta_{on}, \theta_{off2} < \theta \leq \theta_3) \end{cases} \quad (12)$$

A função da tensão na fase pode ser escrita como

$$u(S) = \begin{cases} u_a & S = 1 \\ 0 & S = 0 \\ -u_a & S = -1 \end{cases} \quad (13)$$

Como pode ser notado em (13), a estratégia apresentada fornece três níveis de tensões diferentes para o enrolamento de fase do estator: 1, 0 e -1 que equivalem a u_a , 0 e $-u_a$. Neste caso o processo de funcionamento do GRV passa a ser realizado em três etapas: região de excitação, região de roda livre intermediária e região de roda livre de geração, entretanto não é necessária nenhuma alteração no projeto do conversor HB. Estas etapas (I, II e III) estão em destaque na Figura 5 e serão descritas a seguir para o ciclo de uma fase.

Etapa I - Excitação ($\theta_{on} < \theta \leq \theta_{off1}$)

Inicialmente a corrente de magnetização é estabelecida através do fechamento das chaves S_1 e S_2 do conversor HB, conforme Figura 6(a). Esta corrente é responsável pelo fluxo de magnetização no núcleo, que produz um conjugado restaurador que resulta em uma força contra eletromotriz aditiva à tensão de excitação. Nesta etapa, ambas as fontes de tensão contribuem para o crescimento da corrente. A energização de cada fase é usualmente iniciada

antes de atingir o alinhamento, para que durante o período de decréscimo de indutância, quando é produzido conjugado gerador, a corrente já tenha atingido certa intensidade.

Etapa II – Roda livre intermediária ($\theta_{off1} < \theta \leq \theta_{off2}$)

A etapa intermediária de roda livre origina-se com a abertura da chave S_1 . Nesta etapa o fluxo de energia circula através do diodo D_2 e da chave S_2 de acordo com a Figura 6(b). A corrente na fase continua sendo incrementada através da força contra eletromotriz. Assim, nenhuma corrente é solicitada da fonte de excitação e a energia acrescida ao indutor é proveniente apenas da conversão eletromecânica.

Etapa III – Roda livre na geração ($\theta_{off2} < \theta \leq \theta_3$)

Esta etapa acontece com a abertura da chave S_2 . A tensão no enrolamento do estator inverte seu sentido, iniciando o processo de transferência de energia para a carga, conforme Figura 6(c). Nessa região, devido à força contra-eletromotriz, a corrente na fase continua a aumentar e atinge o seu valor de pico em θ_2 .

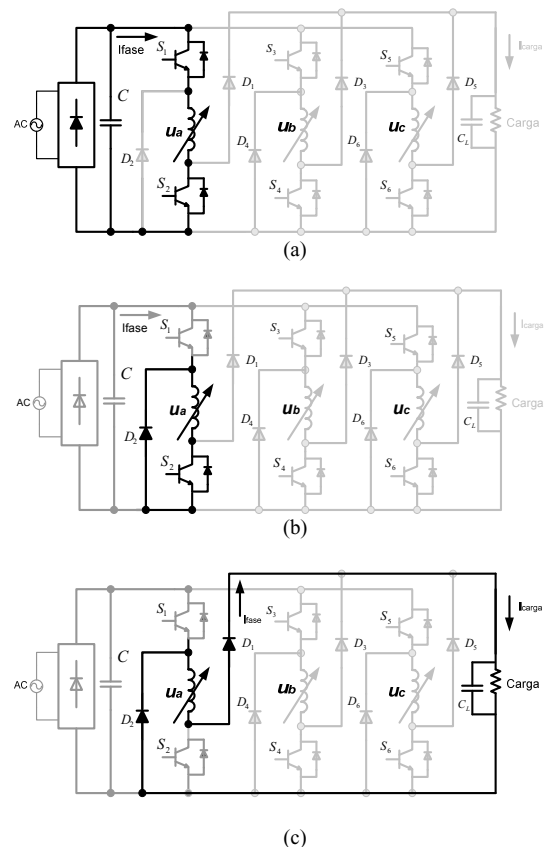


Fig. 6. Região de excitação (a), Região de roda livre intermediária (b) Região de roda livre de geração (c).

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A. Operação do GRV em malha aberta

Para ilustrar a praticidade da estratégia de chaveamento com roda livre intermediária, foram realizadas simulações do GRV com o conversor HB operando com chaveamento

clássico e com a estratégia proposta para diversos valores de θ_{off} . Em ambas as situações o GRV operou com a velocidade de 1500rpm, θ_{on} (ângulo de fechamento das chaves) fixo em -3° em relação a posição de alinhamento, carga de 25Ω e tensão de excitação fixa em 80V. Definimos como uma medida de produtividade do GRV a proporção entre energia elétrica dissipada na carga pela energia elétrica usada na magnetização. Assim, a Figura 7 ilustra a produção de eletricidade em função de θ_{off} para as duas situações. Observa-se uma forte influência da variação do ângulo θ_{off} na produção de eletricidade e que durante toda faixa de varredura de θ_{off} a produção é maior quando utiliza-se a estratégia intermediária de roda livre.

Na seqüência da simulação foi escolhido e fixado o valor de θ_{off} em 22° que corresponde a um valor onde a produção de eletricidade é maior que 100% para ambas as estratégias. O GRV operou na mesma condição descrita anteriormente. As Figuras 8 e 9 apresentam as formas de ondas da corrente na fase A do estator, bem como os pulsos de chaveamento das chaves inferiores e superiores do conversor HB.

Observa-se que a corrente na etapa de excitação é a mesma nas duas situações, porém a magnitude máxima da corrente de fase na estratégia apresentada é maior que no modo clássico. Isto evidencia um melhor aproveitamento da conversão eletromecânica do GRV, uma vez que este acréscimo de corrente é devido à atuação da força contra eletromotriz na etapa intermediária de roda livre.

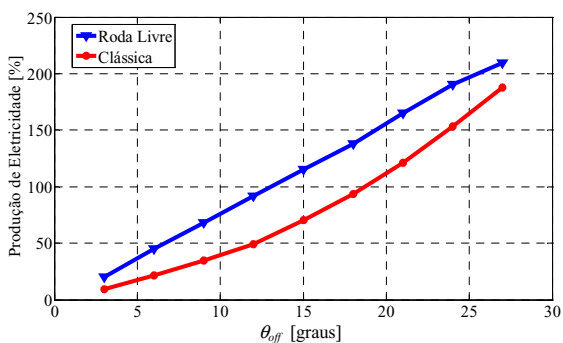


Fig. 7. Produção de eletricidade em função de θ_{off} para as estratégias clássica e com a roda livre intermediária.

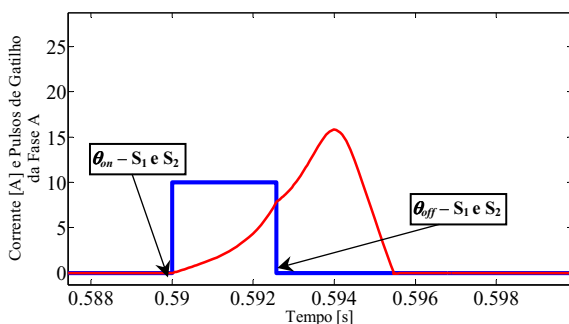


Fig. 8. Operação sem roda livre intermediária. Corrente da Fase A e Pulsos S_1 e S_2 .

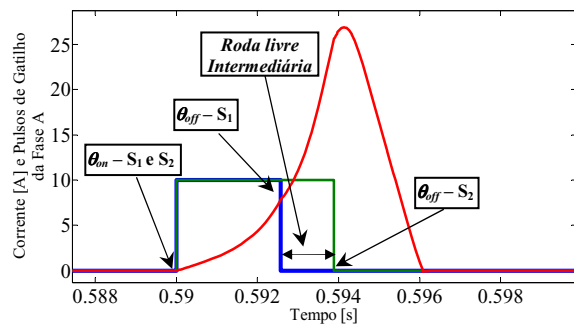


Fig. 9. Operação com roda livre intermediária. Corrente da Fase A e Pulsos S_1 e S_2 .

B. Operação do GRV em Malha fechada: Estratégia de Controle Baseada na Variação do Ângulo de Magnetização

Para operação em malha fechada com controle da tensão gerada, foi desenvolvida uma estratégia que consiste na variação da largura do período de magnetização das fases, mantendo θ_{on} fixo em -3° e alterando o valor de θ_{off} (ângulo de abertura das chaves) através de um controlador PI. O diferencial da estratégia é que a atuação do controlador se faz apenas na chave superior do conversor. A chave inferior é mantida em condução até que os 30° sejam completados para permitir que a etapa intermediária de roda livre ocorra entre as etapas de magnetização e desmagnetização das fases. Em seguida a chave inferior do conversor é aberta, fazendo que a energia armazenada na bobina da fase seja entregue à carga. Vale destacar que essa variação ocorre da mesma forma para as outras fases da máquina, já que o controlador PI altera o valor da θ_{off} para todas as (três) fases. O diagrama em blocos da simulação é apresentado na Figura 10.

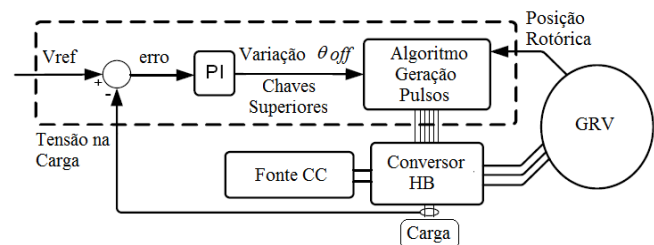


Fig. 10. Diagrama em blocos da simulação.

Os testes de simulação foram realizados com os seguintes critérios: o gerador a relutância operou em malha fechada utilizando a estratégia descrita acima, tensão de excitação fixa em 80V, tensão de referência do controlador em 110V e velocidade rotórica em 1500rpm. A máquina foi simulada durante 6 segundos. Foi submetida a um transitório de carga, onde a resistência da mesma foi reduzida de 25Ω para 11Ω com 1,5 s de simulação e, quando o tempo atingiu 4,5s, a resistência de carga retornou para seu valor inicial.

A Figura 11 mostra o comportamento da tensão gerada aplicada à carga durante o transitório de carga. Observa-se que o valor de referência (110 V) foi devidamente mantido. Este teste demonstrou que o controle foi capaz de manter

com precisão a tensão gerada em torno do valor de referência, mesmo durante transitórios de carga. Para a mesma situação, a Figura 11 apresenta a corrente em uma das fases da máquina.

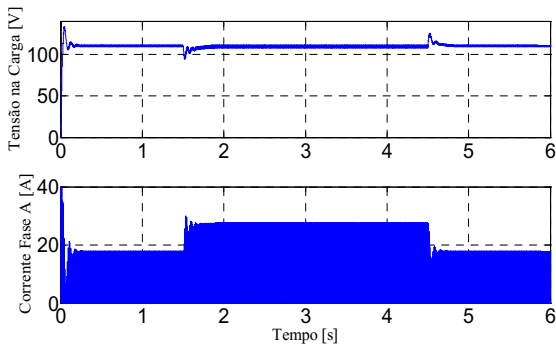


Fig. 11. Comportamento da tensão gerada (superior) e corrente de fase (abaixo) durante transatório de carga.

Um zoom na corrente de fase da Figura 11 e os pulsos das chaves S_1 e S_2 do conversor nos instantes em que o GRV opera com carga de 25Ω e 11Ω são mostrados nas Figuras 12 e 13 respectivamente. Nota-se que com o aumento de carga o controlador atua na largura do ângulo θ_{off} da chave S_1 . Desta forma, a corrente de fase aumenta e a tensão gerada pode ser mantida próxima ao valor de referência.

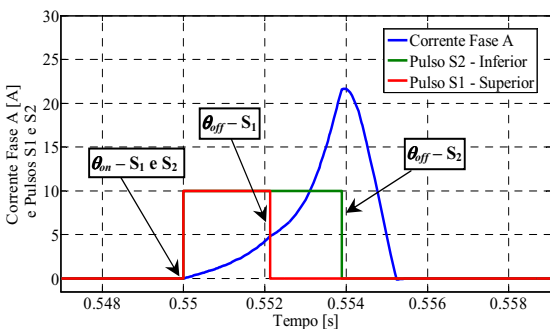


Fig. 12. Corrente na Fase A e Pulsos S_1 e S_2 para carga de 25Ω .

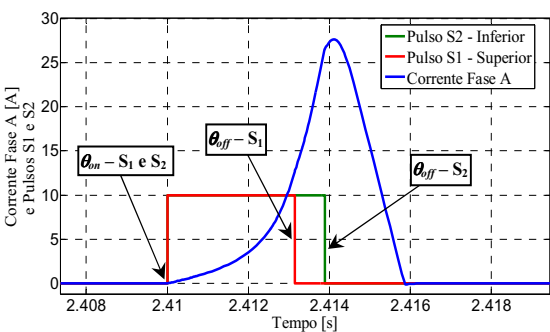


Fig. 13. Corrente na Fase A e Pulsos S_1 e S_2 para carga de 11Ω .

As curvas de potências de entrada (excitação), mecânica, perdas e de saída do GRV, durante a atuação do controle de tensão gerada, podem ser observadas na Figura 14. Quando o mesmo teste é realizado com a atuação do controle de tensão, mas sem a etapa intermediária de roda livre, as curvas de potência ficam conforme a Figura 15. A Tabela I apresenta o rendimento e os valores de potência do GRV

para as duas situações. Os rendimentos são similares, entretanto, a adição da etapa de roda livre intermediária aproveita mais a energia mecânica e utiliza menos energia elétrica da fonte de excitação. Isto pode possibilitar a utilização de fontes menores em caso de excitação de GRV de potência elevada.

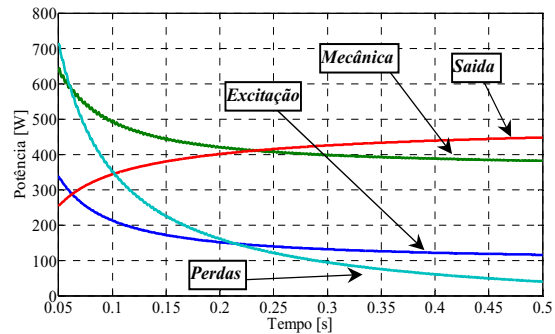


Fig. 14. Potências de excitação, mecânica, perda e saída com roda livre intermediária.

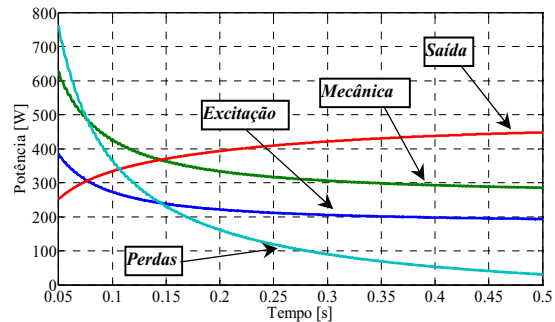


Fig. 15. Potências de excitação, mecânica, perda e saída sem roda livre intermediária.

TABELA I
Rendimento do GRV

Estratégia	Com Roda Livre	Sem Roda Livre
$P_{Excitação}$ (W)	113,4	198,9
$P_{Mecânica}$ (W)	381,8	291,8
$P_{Saída}$ (W)	447,1	447,3
Perdas (W)	48,1	43,0
η (%)	90,3	91,1

V. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Para validar a estratégia proposta e simulada, foi desenvolvida com sucesso uma plataforma experimental. A Figura 16 apresenta o diagrama em blocos da montagem realizada. A plataforma consiste de um GRV de 5,0KW 6/4 acoplado em motor trifásico acionado com conversor de frequência. Uma ponte retificadora não controlada com um capacitor de 20mF foi usado para fornecer a potência de entrada da rede AC. A fonte de tensão variável foi utilizada para ajustar a tensão de excitação. O conversor HB foi montado com os módulos de IGBT's de 1200V/50A. Um controlador PI foi projetado com circuitos analógicos.

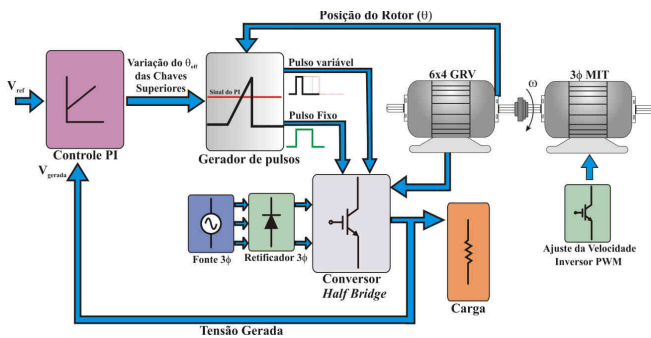


Fig. 16. Diagrama em blocos da plataforma experimental.

Três transdutores fotoelétricos devidamente instalados no GRV (θ_{on} fixo em -3° em relação à posição de alinhamento) fornecem sinais em onda quadrada com intervalos de 30° que representam as informações da posição do rotor. Estes sinais entram no circuito gerador de pulsos que os transforma em uma rampa correspondente ao mesmo intervalo para cada fase. Assim, a variação da largura dos pulsos de gatilhos das chaves superiores ocorre com a comparação do sinal de saída do controlador PI com as três rampas geradas. As chaves inferiores têm intervalo de condução fixo em 30° e não sofrem atuação do controlador. A Figura 17 ilustra a estratégia utilizada.

Em malha aberta, no lugar do sinal de saída do controlador PI é utilizado um sinal de tensão em corrente contínua (cc) cuja amplitude pode ser alterada até o valor de pico do sinal em rampa. Dessa forma é possível ajustar o ângulo de magnetização ajustando o nível do sinal de tensão cc que é comparado com a rampa gerada no circuito gerador de pulsos. Uma foto da plataforma experimental é apresentada na Figura 18.

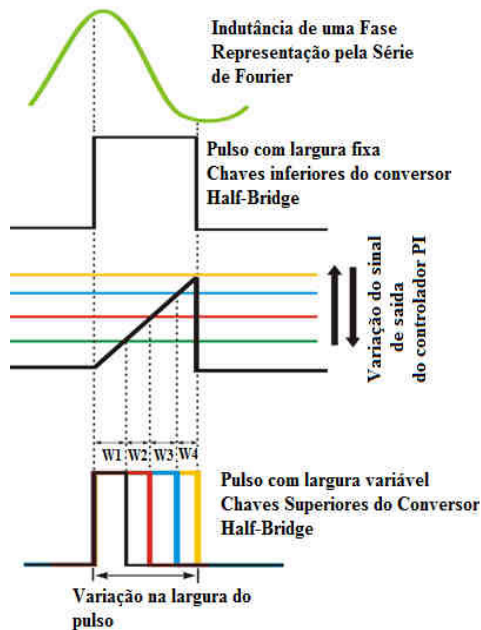


Fig. 17. Estratégia experimental para variação do ângulo de magnetização das chaves superiores.

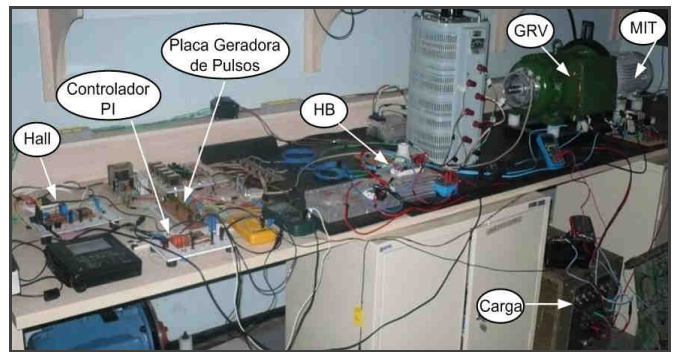


Fig. 18. Plataforma Experimental.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Inicialmente testes foram realizados com o GRV operando em malha aberta sem a estratégia de roda livre intermediária e posteriormente acrescentou-se a etapa para fins de comparação.

Assim, sem a etapa de roda livre intermediária, foi ajustado o ângulo de abertura das chaves (θ_{off}) em 22° . A Figura 19 apresenta as formas de onda dos pulsos aplicados nas chaves S_1 e S_2 , corrente e tensão de fase A e a tensão na carga resistiva. Nesta situação o GRV operou com tensão de excitação em 80V, velocidade de 1500rpm e carga de 25Ω . Nestas condições de operação, a tensão gerada ficou em torno de 100V enquanto que o pico de corrente na fase atingiu o valor de 12 A.

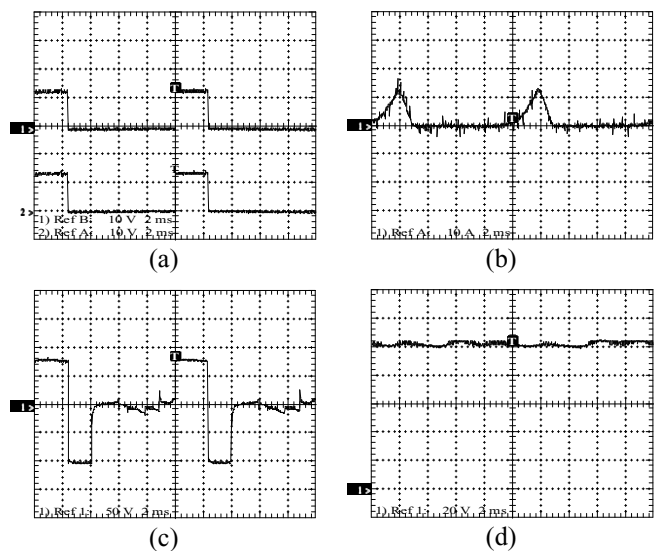


Fig. 19. Operação sem a estratégia de roda livre intermediária. Pulsos S_1 e S_2 (a) – Corrente na Fase A (b) – Tensão na fase A (c) – Tensão na carga (d)

Na seqüência, os ensaios foram realizados acrescentando a etapa de roda livre intermediária para as mesmas condições descritas anteriormente. Pode ser observado na Figura 20(d) que a tensão gerada chegou ao valor de aproximadamente 132 V e que o pico de corrente de fase a 30A, conforme Figura 20(b). Ou seja, com a etapa de roda intermediária de roda livre, houve um aumento de 32% na tensão gerada.

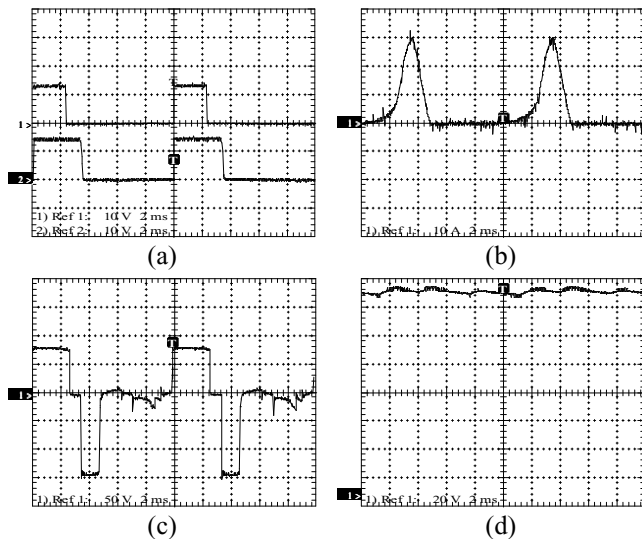


Fig.20. Operação com a estratégia de roda livre intermediária. Pulsos S_1 e S_2 (a) – Corrente na Fase A (b) – Tensão na fase A (c) – Tensão na Carga (d).

Para a operação do GRV em malha fechada, um teste de transitório de carga foi realizado. A resistência de carga foi reduzida de 25Ω para 11Ω , conforme teste de simulação. Para esta situação, a tensão gerada de referência foi configurada em $110V$ e a velocidade em $1500rpm$. A Figura 21(a) mostra o comportamento da tensão gerada aplicada à carga durante o transitório de carga. Observa-se que o valor de referência ($110V$) foi devidamente mantido demonstrando que o controle foi capaz de manter a tensão gerada em torno do valor de referência, mesmo durante transitórios de carga. Para a mesma situação, a Figura 21(a) apresenta a corrente em uma das fases da máquina. A Figura 21(b) mostra a tensão e corrente para uma das fases.

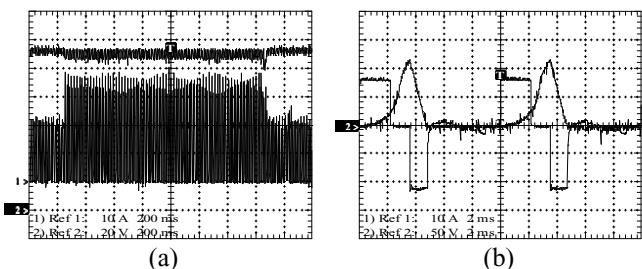


Fig. 21. Operação em malha fechada durante transitório de carga. Tensão na carga e corrente na fase A (a) – Tensão e corrente na fase A (b).

Outro teste foi realizado, agora com transitório de velocidade. O GRV controlado em malha fechada com referência de $110V$ foi acelerado de 800 a $2000rpm$. Na Figura 22 nota-se que a tensão gerada permaneceu com valor em torno da referência. Percebe-se ainda que a amplitude da oscilação presente na tensão da carga reduz com o aumento da velocidade, o que é característico deste tipo de máquina, por apresentar grandes oscilações de conjugado eletromagnético em baixas velocidades de operação. Existem trabalhos na literatura para minimizar estas oscilações [9].

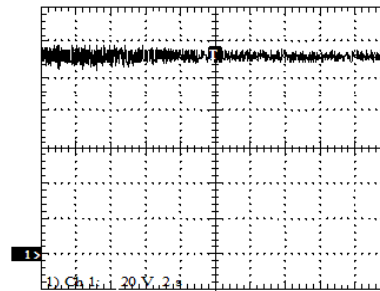


Fig. 22. Tensão na carga com GRV em velocidade variável.

VII. CONCLUSÕES

Uma estratégia para a melhoria da eficiência da conversão eletromecânica do Gerador à Relutância Variável foi apresentada e discutida. Também foi proposta uma técnica de controle de tensão na carga de um GRV, baseada na variação do ângulo de magnetização, utilizando uma etapa intermediária de roda livre. Esta técnica varia apenas o ângulo de fechamento das chaves superiores do conversor HB, permitindo que a conversão eletromecânica de energia continue sendo aproveitada através das chaves inferiores que são abertas com ângulo fixo. A estratégia de controle proposta foi implementada na forma de simulação e validada experimentalmente. Os resultados apresentados mostram que esta técnica controla bem a tensão na carga com o GRV operando em diferentes situações de transitório. Além disso, foi comprovada a importância de incluir a etapa intermediária de roda livre, uma vez que ela permite converter mais da energia mecânica para a elétrica do que se tivesse usando outras estratégias, nas mesmas condições de operação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG pelo financiamento deste projeto.

ANEXOS

TABELA A1
Dados do Protótipo do GRV

Características	Valores
Potência de Saída	5,0 KW
Atrito Viscoso	0.006 N.m.s
Indutância (Posição Alinhada)	0.02748 H
Indutância (Posição Desalinhada)	0.00262 H
Momento de Inércia	0.04806 kg.m ²
Resistência do enrolamento de fase	0.5 Ω

REFERÊNCIAS

- [1] Y.C. Chang, C.M. Liaw. "Establishment of a Switched-Reluctance Generator-Based Common DC Microgrid System" *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 26, No. 9, September 2011, pp. 2512-2527.
- [2] S. R. MacMinn, W. D. Jones, "A Very High Speed Switched-Reluctance Starter-Generator For Aircraft Engine Applications" in Proc. *IEEE Aerosp. And Electron. Conf.*, 1989, vol. 4, pp. 1758-1764.
- [3] B. Fahimi, et. al., "A Switched Reluctance Machine-Based Starter/Alternator For More Electric Cars" *IEEE Transactions on Energy Conversion.*, vol. 19, nº1, Março 2004.
- [4] W. Cai., "Comparison And Review Of Electric Machines For Integrated Starter Alternator Applications," *IEEE - IAS*, 2004. Vol. 1, Outubro de 2004
- [5] R. Cardenas, at. al. "Control Of A Switched Reluctance Generator For Variable-Speed Wind Energy Applications" *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 20, 2005.
- [6] Y. Chang, C.M. Liaw, "On The Design Of Power Circuit And Control Scheme For Switched Reluctance Generator" *Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 1, 2008.
- [7] D.A. Torrey, "Switched Reluctance Generators And Their Control", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume 49, Issue 1, Feb. 2002, pp. 3-14.
- [8] A. W. F. V. Silveira, D. A. Andrade, A. Fleury, L. C. Gomes, C. A. Bissochi Jr, H. de Paula "Generated Voltage Control In A Switched Reluctance Motor/Generator" *Eletrônica de Potência*, v. 15, n. 3, p. 203-212, jun./ago. 2010.
- [9] H. Chen, J.Jason. "Implementation of the Three-Phase Switched Reluctance Machine System for Motors and Generators" *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 15, No. 3, June 2010.
- [10] Y. Sozer, D. A. Torrey "Closed Loop Control of Excitation Parameters for High Speed Switched-Reluctance Generators", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 19, No. 2, March 2004.
- [11] D. A. Andrade, R. Krishnan, "Characterization of Switched Reluctance Machines Using Fourier Series Approach" in Proc. *36th IEEE Ind. Appl. Annu. Meeting*, Sep. 2001, pp. 48-54.
- [12] A. V. S. Fleury, F. S. Silva; W. R. H. Araújo, D.A. Andrade, A. W. F. V. Silveira "Reduced Switch Count Converter For Switched Reluctance Generators" *Eletrônica de Potência*, Vol. 13, no. 3, Agosto 2008.
- [13] I. Kioskeridis, C. Mademlis "Optimal Efficiency Control of Switched Reluctance Generators" *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 21, No. 4, July 2006.

DADOS BIOGRÁFICOS

Ghunter Paulo Viajante: Possui graduação em Engenharia de Computação pela PUC-Goiás (2006), mestrado em Engenharia Elétrica pela UFG- Goiás (2009). Atualmente é professor efetivo do IFG-Campus Itumbiara e aluno de

doutorado em Engenharia Elétrica pela UFU-Uberlândia. Trabalha nas seguintes áreas: Sistemas Microcontrolados, Acionamentos e Controle de Máquinas Elétricas.

Darizon Alves de Andrade: É bacharel (1984) e mestre em engenharia (1987) pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, Brasil, e Ph.D. (1994) pela Universidade de Leeds, Leeds, Reino Unido, Durante o ano 2000 foi professor visitante com o Grupo de Controle de Máquinas Elétricas, VTEC, Blacksburg, VA, EUA, onde realizou pesquisas sobre novas estratégias para modelagem de máquinas a relutância variável. Sua pesquisa e áreas de interesses estão relacionadas com a simulação e técnicas de controle associadas a máquinas elétricas.

A. W. F. V. Silveira: Graduou-se em Engenharia de Computação pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Obteve os títulos de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia (UFU) na área de acionamentos de máquinas elétricas. Leciona na faculdade de engenharia elétrica (FEELT) da UFU, onde realiza pesquisa para o desenvolvimento das estratégias de controle e acionamento de máquinas elétricas.

Marcos Antônio Arantes de Freitas: Engenheiro eletricitista (1991), mestre (1994) e doutor (2002) pela Universidade Federal de Uberlândia. Atualmente é professor efetivo do IFG-Campus Itumbiara. Trabalha nas seguintes áreas: Acionamentos e Controle de Máquinas Elétricas.

Victor Régis Berladelli: É engenheiro de telecomunicações pela UNIMINAS (2005), mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia. É aluno de doutorado na Universidade Federal de Uberlândia. Trabalha nas seguintes áreas: Acionamentos e Controle de Máquinas Elétricas.

Luciano Coutinho Gomes: Bacharel, Mestre e Doutor pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, em 1995, 2002 e 2008, respectivamente, todos em engenharia elétrica. Em 2008, ele ingressou na Faculdade de Engenharia Elétrica, UFU, onde atualmente é Professor Assistente. Suas áreas de interesse são relacionadas à simulação e técnicas de controle digital de máquinas elétricas.

José Luis Domingos: Possui mestrado (1998) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (2003). Professor no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG desde 1992. Atua na área de Redes Industriais, Sistemas Inteligentes e Acionamento de Máquinas Elétricas.

Augusto Fleury Veloso da Silveira: Graduado em Física e Engenharia Elétrica (1977), mestrado em Física pela Universidade Federal de Goiás (2001) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (2008). Professor da Pontifícia Universidade Católica de Goiás e Universidade Estadual de Goiás. Trabalha nas áreas de Acionamentos e Conversão de Energia.