

GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL OPERANDO NO MODO AUTO EXCITADO

V. R. Bernardeli, D. A. Andrade, A. W. F. V. Silveira, L. C. Gomes, G. P. Viajante
Laboratório de Acionamentos Elétricos da Universidade Federal de Uberlândia
Campus Santa Mônica, Uberlândia – MG, Brasil
eng.vitao@gmail.com, darizon@ufu.br

Resumo - Neste artigo é apresentado um estudo sobre o comportamento do gerador a relutância variável operando no modo auto excitado (GRVA). É realizado um extenso levantamento bibliográfico sobre o GRVA, e apresentada modelagem matemática que inclui a saturação do circuito magnético para representar a máquina. Aspectos da operação dinâmica da máquina a relutância variável trabalhando como gerador auto excitado são explorados. Um capacitor carregado com uma tensão inicial, instalado em paralelo com a carga é utilizado como fonte de energia para a excitação da máquina. O gerador entrega à carga tensão e corrente CC. O conjunto completo é simulado utilizando o ambiente MatLab/Simulink® e resultados experimentais são incluídos para validar as discussões apresentadas.

Palavras-Chave – Gerador Auto-Excitado, Máquina a Relutância Variável.

SELF-EXCITED SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR

Abstract – This paper presents a study on the behavior of the self-excited switched reluctance generator (SSRG). Following an extensive bibliographic review about SSRGs, the mathematical model, principle of operation and simulation results of the generator dynamics is presented. A capacitor partially charged, placed in parallel with the load, is used for two tasks: to provide the required energy to establish magnetic flux and start the generator's voltage built up, and also to smooth the voltage delivered to the load. The arrangement is such that the generated voltage and current is delivered to the load in D.C. mode. To correctly represent the self excitation operation the mathematical model must take into account the core magnetic saturation, and that is observed here. Experimental results are included to validate the discussions presented.

Keywords – Self-Excited Generator, Switched Reluctance Machine.

NOMENCLATURA

v	Tensão aplicada (V)
i	Corrente de fase (A)
r	Resistência de Fase (Ω)
λ	Fluxo dispersão (Wb)

L	Indutância de fase (H)
e	Força contraeletromotriz
ω	Velocidade angular (rad/s)
T_e	Conjugado Eletromagnético (N.m)
T_m	Conjugado mecânico (N.m)
W	Co-Energia (joule)
t	Tempo (s)

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os sistemas de acionamento de máquinas elétricas evoluíram de forma rápida, apresentando significativos avanços em eficiência e controlabilidade. Neste contexto, novos tipos máquinas elétricas passaram a fazer parte do conjunto de alternativas disponíveis [6]. Neste meio se encontram as máquinas a relutância variável (MRV).

A exemplo de outros conversores eletromecânicos tradicionais, a máquina a relutância variável pode operar com fluxo bidirecional de energia, isto é, convertendo energia elétrica em mecânica (motor) ou convertendo energia mecânica em elétrica (gerador). O modo de operação é definido pelo sincronismo entre a corrente na fase e a taxa de variação da indutância respectiva com a posição do rotor. Quando há corrente na fase e a derivada da indutância em relação à posição do rotor é negativa, a máquina opera como gerador. Na presença de corrente quando a derivada é positiva opera como motor. O controle do modo de operação é simples, pois basta governar adequadamente os períodos de condução de cada fase da máquina. O gerador a relutância variável (GRV) destaca-se por sua robustez, baixo custo de produção e manutenção, alta confiabilidade [1][5], e inerente adequação a sistemas que operam com velocidades variáveis, se comparado a outros tipos de geradores como, por exemplo, o gerador síncrono ímã permanente (GSIP).

A MRV compete com as máquinas AC tradicionais em aplicações que envolvem velocidades variáveis, seja operando como motor ou como gerador[2],[3],[4].[19]. Por exemplo, a energização das fases da máquina a relutância variável é realizada por fase sucessivamente gerando assim mais confiabilidade no que diz respeito a tolerância a falta de fase, quando uma fase é desligada as outras continuam operando independentemente [7][17][18].

Esta característica oferece uma grande vantagem em relação às máquinas convencionais, quando usada como gerador [1]. No entanto, o primeiro problema encontrado para utilizar a máquina com gerador é que a máquina é inerentemente passiva e não tem a capacidade de auto excitação necessitando assim de uma fonte de potência para tal. Como consequência disso há um aumento da sua complexidade e diminuição da sua confiabilidade.

Artigo submetido em 05/10/2011. Primeira revisão em 09/11/2011, segunda revisão 24/11/2011. Aceito para publicação em 25/11/2011 por recomendação do editor João Onofre P. Pinto.

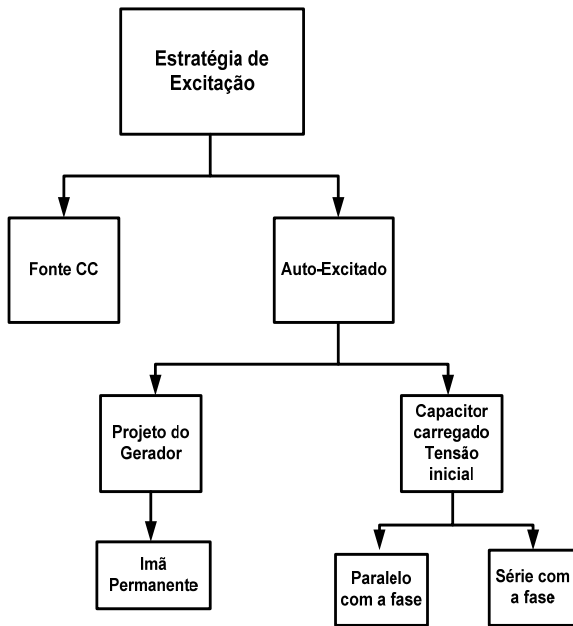


Fig. 1. Diagrama de classificação dos principais métodos de excitação para o GRVA.

São possíveis duas estratégias para excitar o GRV, conforme mostrado no diagrama de blocos da figura 1. A primeira consiste em colocar uma fonte externa de corrente contínua com uma tensão fixa [12],[13] e a outra consiste na estratégia de auto excitação.

Para propiciar a auto excitação pode ser utilizado um ímã permanente na máquina durante o processo de fabricação. Os projetistas inserem ímãs permanentes no núcleo do estator de tal forma que este ímã cria um fluxo magnético e excita a máquina [6]. Esta estratégia apresenta inconvenientes, sendo que o principal deles é que se a velocidade da máquina primária que aciona o gerador for muito baixa, o fluxo magnético do ímã permanente pode não ser suficiente para excitá-lo.

A segunda opção para iniciar o processo de auto-excitação do GRV é apresentada por [1],[8],[9],[10],[11] que consiste em colocar um capacitor carregado com uma tensão inicial em série com a carga, conforme pode ser visto na figura 2. O sistema funciona de forma que o circuito entra em ressonância gerando correntes e tensões alternadas (AC).

A terceira estratégia de excitação do gerador, apresentada no presente trabalho, é adicionar um capacitor carregado em paralelo com a carga, conforme pode ser visto na figura 3, sendo que esta estratégia produz em seus terminais tensão e corrente CC. Este tipo de estratégia gera uma grande vantagem em relação à colocação dos ímãs permanentes, que é o de não precisar alterar os parâmetros de projeto da máquina e também pode ser utilizado em qualquer máquina.

Neste trabalho, o foco é a operação da máquina a relutância variável como gerador auto-excitado. Trabalhos anteriores desenvolvidos [12],[13],[14],[15],[20] já demonstraram a eficácia da operação da máquina como gerador excitado por fontes externas de energia elétrica. As aplicações potenciais são, a exemplo dos geradores auto excitados tradicionais, em locais isolados sem atendimento de redes de energia elétrica, em veículos autônomos tais como aeronaves, veículos marítimos e terrestres. Para prover

a excitação inicial da máquina, utiliza-se um capacitor parcialmente carregado instalado em paralelo com a carga. Além de apresentar resultados de bancada confirmando a viabilidade da operação proposta, o artigo contribui, evidenciando a necessidade de se utilizar modelo matemático que leve em conta a saturação magnética para a correta simulação matemática da operação da máquina. Ressalta-se que a utilização de modelo matemático que não contemple a saturação magnética para simulação desse modo de operação leva a resultados incorretos, dado a sua inerente incapacidade de representar adequadamente o processo de escorvamento da tensão gerada.

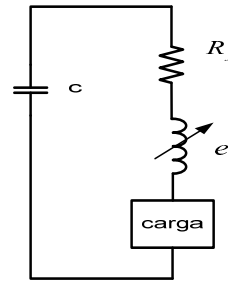


Fig. 2. Circuito do GRV representando uma fase, estratégia de excitação fase com capacitor em série com a carga.

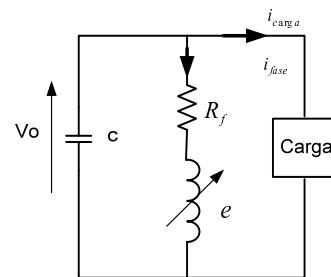


Fig. 3. Circuito do GRV representando uma fase, estratégia de excitação fase com capacitor em paralelo com a carga.

II. MODELO DO GRVA PARA ANÁLISE DINÂMICA

Uma das características básicas da máquina a relutância variável é a ausência de enrolamentos no rotor e estrutura de pólos salientes. A figura 4 mostra o perfil transversal da máquina utilizada 6/4 (Seis pólos no estator e 4 pólos no rotor) com a distribuição de um enrolamento em umas das fases.

Do ponto de vista de acionamento, a MRV é possível trabalhar como motor ou gerador, com pequenas modificações no conversor e alterando o ângulo de chaveamento da mesma, como por exemplo: 1) para trabalhar como motor energiza-se a fase no instante em que a derivada da indutância da fase em relação à posição é positiva ou crescente, 2) para operá-la como gerador aplicam-se os pulsos de corrente nas fases no instante em que a derivada é negativa ou decrescente.

Para acionar a MRV operando no modo auto-excitado é imprescindível a utilização de dispositivos armazenadores de energia para excitação da máquina, essa energia pode ser na forma de campo elétrico (capacitor em paralelo ou em série

com a carga) ou de campo magnéticos através da adição imãs permanentes no estator. O presente trabalho utiliza um capacitor em paralelo com a carga para prover essa excitação. A figura 5 mostra o diagrama de todo o processo de conversão mecânica/elétrica, evidenciando os blocos: máquina primária, GRV, Conversor Half-Bridge, capacitor e carga. É importante ressaltar que um conversor eletromecânico operando como gerador em modo auto-excitado, necessariamente se utiliza da característica de saturação magnética. Durante o escorvamento, os incrementos da corrente de excitação que levam a incrementos no fluxo magnético, são propiciados pelo incrementos da tensão gerada, num processo de realimentação positiva. Isso ocorre até que a máquina atinja a saturação magnética, quando então não havendo mais incremento de fluxo magnético, não há incremento da tensão gerada e o sistema se estabiliza. Dessa forma, para representar corretamente o modo de operação, o modelo matemático a ser utilizado deve necessariamente contemplar a saturação magnética.

A seguir serão detalhados os modelos do circuito elétrico e mecânico do gerador, representação do perfil da indutância por meio da série de Fourier, resultados obtidos com o modelo matemático e o modelo do conversor. A modelagem matemática da máquina elétrica não inclui o capacitor de excitação. Este é levado em conta no programa de simulação utilizado.

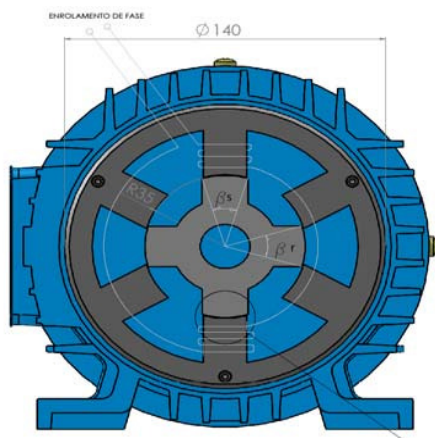


Fig. 4. Perfil transversal da máquina utilizada 6/4.

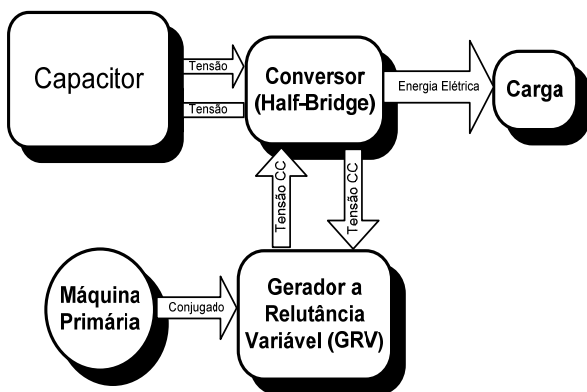


Fig. 5. Diagrama de blocos do sistema.

A. Modelo do circuito elétrico e mecânico

O circuito de uma fase do GRV pode ser equacionado como:

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

Para uma velocidade constante, a equação da tensão na fase pode ser escrita como:

$$v = ri + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + e \quad (2)$$

onde v é a tensão aplicada, i é a corrente da fase, R é a resistência da fase, L é a indutância incremental (dinâmica) da fase e θ é a posição do rotor. Denomina-se indutância no trabalho o valor de indutância em função da posição, a variação dessa mesma indutância para diferentes valores de posição e de corrente passa a ser chamado de indutância incremental.

O terceiro termo do lado direito da igualdade é a força contraeletromotriz e , que isoladamente pode ser escrita como:

$$e = i\omega \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \quad (3)$$

Onde, $\omega = d\theta/dt$ é a velocidade angular do rotor.

O conjugado mecânico produzido pelo GRV, pode ser expresso por (4).

$$T_e = \frac{\partial W'(i, \theta)}{\partial(\theta)} \quad (4)$$

onde $W'(i, \theta)$ é a co-energia dada por,

$$W'(i, \theta) = \int_0^i \lambda(i, \theta) di \quad (5)$$

Para realização da modelagem matemática usada no programa de simulação, o conjugado mecânico produzido pela máquina foi calculado levando em consideração as perdas por atrito viscoso D e momento de inércia J , conforme apresentado pela equação (6).

$$T_m = T_{emag} - J \frac{d\omega}{dt} - D\omega \quad (6)$$

Designando por $[V]$, $[R]$, $[I]$, $[L]$ e $[J]$ as matrizes na ordem em que aparecem em [12], a matriz de estados do GRV tem a seguinte forma:

$$[J] = [L]^{-1}[V] - [L]^{-1}[R][I] \quad (7)$$

B. Representação do Perfil da Indutância por meio da série de Fourier

A expansão da indutância por meio da Série de Fourier [14] que será apresentada aqui, tornou-se atrativa pelo fato de representar com precisão os efeitos devido a saturação do circuito magnético. A implementação deste método permite simular computacionalmente a operação dinâmica do GRV trabalhando no modo auto-excitado.

A estratégia adotada para representar o perfil da indutância incremental para diferentes correntes e posições do rotor, é baseada na aproximação da curva utilizando segmentos de linhas retas, conforme indicado na figura 6. Na figura foi adotada esta representação para a indutância por conveniência matemática.

As equações que representam a indutância como função da posição a partir da figura 6 podem ser escritas

$$L(\theta) = -a_j \theta + b_j \quad (8)$$

para o j 'ésimo segmento de $\theta < 0$

$$L(\theta) = a_j \theta + b_j$$

para o j 'ésimo segmento de $\theta > 0$, onde

$$\begin{cases} a_j = \frac{l_{(j+1)} - l_j}{\alpha_{(j+1)} - \alpha_j}, \\ b_j = l_j - a_j \cdot \alpha_j, \end{cases}$$

sendo l_j a indutância para o j 'ésimo segmento, e α a posição associada a esta indutância.

Devido a simetria na forma de onda, a Série de Fourier contém apenas termos de co-seno e isto vem simplificar a equação final que fornece os valores da indutância analiticamente. Logo, para uma máquina com P_r pólos na parte fixa do núcleo magnético a indutância de fase é descrita por

$$L(\theta) = L_0 + \sum_{n=1}^{\infty} L_n \cos(nP_r \theta) \quad (9)$$

onde L_0 é um termo constante, L_n é um coeficiente associado à ordem harmônica, n é a ordem harmônica, θ é a posição e P_r é um valor associado ao número de pólos do rotor. Este último está relacionado ao período da indutância G por meio de

$$G = \frac{2\pi}{P_r} \quad (10)$$

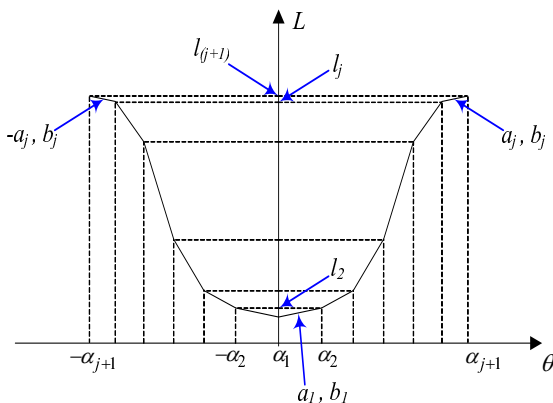


Fig. 6. Representação Aproximada da Curva da Indutância utilizando "j" Segmentos de Linhas Retas

O termo constante L_0 é calculado por meio de

$$L_0 = \frac{1}{G} \int_{-G/2}^{G/2} L(\theta) d\theta = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^m \left(\int_{-\alpha_{(j+1)}}^{-\alpha_j} (-a_j \theta + b_j) d\theta + \int_{\alpha_j}^{\alpha_{(j+1)}} (a_j \theta + b_j) d\theta \right) \quad (11)$$

onde m é o número de segmentos de linhas retas. Através de algumas manipulações matemáticas a equação 11 resulta em

$$L_0 = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^m [l_{(j+1)} + l_j] \cdot [\alpha_{(j+1)} - \alpha_j] \quad (12)$$

O coeficiente L_n da equação 9 é deduzido como

$$L_n = \frac{2}{G} \int_{-G/2}^{G/2} L(\theta) \cos(nN_r \theta) d\theta = \frac{2}{G} \sum_{j=1}^m \left(\int_{-\alpha_{(j+1)}}^{-\alpha_j} (-a_j \theta + b_j) \cos(nP_r \theta) d\theta + \int_{\alpha_j}^{\alpha_{(j+1)}} (a_j \theta + b_j) \cos(nP_r \theta) d\theta \right) \quad (13)$$

Desenvolvendo os termos que constituem o coeficiente L_n na equação anterior e fazendo algumas simplificações matemáticas a equação 13 transforma-se em

$$L_n = \sum_{j=1}^m [l_{(j+1)} \cdot A_{(j,n)} - l_j \cdot B_{(j,n)}] \quad (14)$$

onde

$$A_{(j,n)} = \frac{2}{n\pi} \left\{ \text{sen}[nP_r \alpha_{(j+1)}] + \frac{\cos[nP_r \alpha_{(j+1)}] - \cos[nP_r \alpha_j]}{nP_r [\alpha_{(j+1)} - \alpha_j]} \right\} \quad (15)$$

e

$$B_{(j,n)} = \frac{2}{n\pi} \left\{ \text{sen}[nP_r \alpha_{(j+1)}] + \frac{\cos[nP_r \alpha_{(j+1)}] - \cos[nP_r \alpha_j]}{nP_r [\alpha_{(j+1)} - \alpha_j]} \right\} \quad (16)$$

Por fim, a indutância $L(\theta)$ do enrolamento pode ser obtida realizando as substituições das equações 12 até a 16 na equação 9, resultando na expressão

$$L(\theta) = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^m (l_{(j+1)} + l_j) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m [l_{(j+1)} A_{(j,n)} - l_j B_{(j,n)}] \right) \cos(nP_r \theta) \quad (17)$$

A equação 17 torna possível a construção do perfil de indutância em função da posição que a partir de dados obtidos com softwares de análise de elementos finitos e também de dados reais obtidos experimentalmente da

máquina projetada torna-se possível sua representação pela série de Fourier.

A relação fluxo por corrente depende da posição do rotor e da corrente de fase, na equação 17 existe a dependência da posição do rotor, termos (α_j) , pelo número de seguimentos de linhas retas. A figura 7 mostra o perfil idealizado dividido em segmentos à indutância em função da posição e da corrente.

A curva da indutância incremental em função da corrente corresponde aos termos l_j da equação 17, estes valores mudam para cada corrente sendo possível representar analiticamente estes termos dentro da equação 17 através de $l_j = l_j(i, \alpha_j)$, finalmente a indutância incremental $L(i, \theta)$ é obtida. O último passo para representar a indutância incremental é fazendo um ajuste polinomial através de uma interpolação de de terceira ordem que serve para adequar os valores medidos com a série de Fourier. A expressão $l_j = l_j(i, \alpha_j)$ é dada por:

$$l_j(i, \alpha_j) = C_{3j}i^3 + C_{2j}i^2 + C_{1j}i + C_{0j} \quad (18)$$

Finalmente, ao substituir a equação 17 em 18 obtém-se a expressão da indutância incremental.

$$L(i, \theta) = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^m (l_{(j+1)}(i, \alpha_j) + l_j(i, \alpha_j)) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m (l_{(j+1)}(i) A_{(j,n)} - l_j(i) B_{(j,n)}) \right) \cos(nP_r \theta) \quad (19)$$

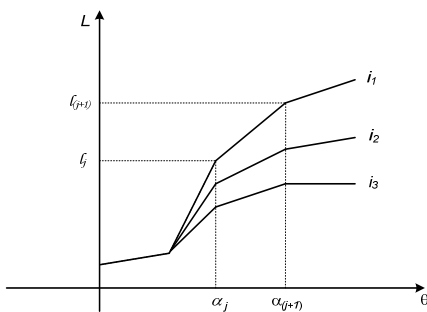


Fig. 7. Indutância em função da posição dividida por seguimentos de linhas retas

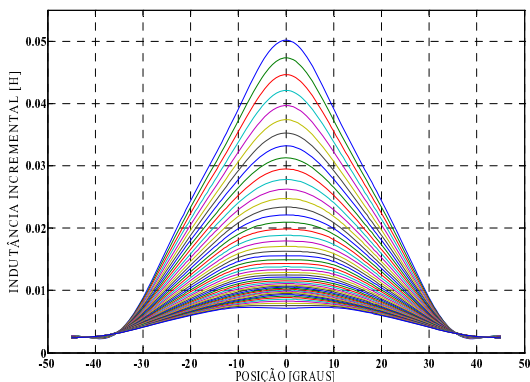


Fig. 8. Perfil indutância obtido por da série de Fourier para diferentes valores de corrente e posição.

Com este modelo matemático é possível obter resultados factíveis que levam em consideração a saturação do circuito magnético. A figura 8 mostra a indutância incremental utilizada no trabalho obtida através da série de Fourier, onde foram utilizados 6 harmônicos para sua representação.

C. Resultados preliminares com o modelo proposto

A figura 9 mostra o comportamento da indutância incremental para um ciclo de geração. São observadas variações incrementais na curva de indutância na medida em que a corrente na fase aumenta, indicando que o modelo representa adequadamente a dependência desse parâmetro tanto com a posição rotórica quanto com o nível de corrente na fase. A figura 10(a) mostra o comportamento da tensão gerada para o modelo que inclui a saturação magnética, observa-se que a partir do instante excitação inicial a tensão começa a crescer até atingir um valor próximo de 98 volts quando se estabiliza a saturação do circuito magnético. A figura 10(b) mostra o comportamento da tensão gerada obtida a partir de um modelo que não contempla a saturação magnética, observa-se que a tensão gerada cresce indefinidamente, não convergindo para um valor estável.

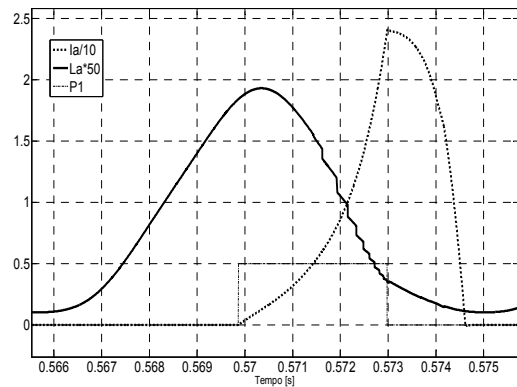


Fig. 9. Perfil da indutância incremental e forma de onda da corrente para a MRV operando como gerador

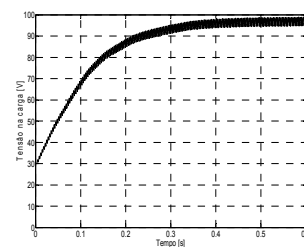


Fig. 10(a). Tensão na carga - Resultados obtidos com modelo que incorpora a saturação

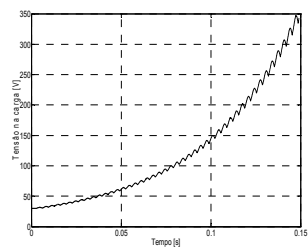


Fig. 10(b). Tensão na carga - Resultados obtidos com modelo que não considera a saturação

D. Modelo do Conversor

Após a obtenção da matriz de estados do GRV e posteriormente obtidos os primeiros resultados com a modelagem proposta torna-se necessário a análise das etapas do conversor mostrando a estratégia de auto-excitação proposto no trabalho.

A figura 11 mostra o conversor trifásico do tipo *half-bridge* (HB) largamente utilizado para acionar motor e adaptado para acionar o GRV. As etapas do conversor são divididas em duas para cada fase do gerador: excitação e geração, e serão descritas a seguir.

Etapa 1 [0-t₀] Excitação inicial: Capacitor carregado com uma tensão inicial

Nesta etapa o capacitor C está inicialmente carregado com uma tensão inicial V₀, conforme mostra figura 12. Esta tensão é responsável por estabelecer a corrente que impõe o fluxo magnético inicial no enrolamento da máquina, sendo que nesta etapa o processo de excitação é iniciado com a fase A. Este caminho é visto pela figura e está em negrito, onde a chave S₁ e S₂ estão fechadas.

Etapa 2 [t₀-t₁] Geração da fase A

Nesta etapa as chaves 1 e 2 são abertas de modo que a energia armazenada no enrolamento da fase através da excitação e do processo de conversão mecânica/elétrica. Conforme indicado na figura 13 a corrente na fase, I_f, se divide entre a carga (I_{carga}) e o capacitor (I₁).

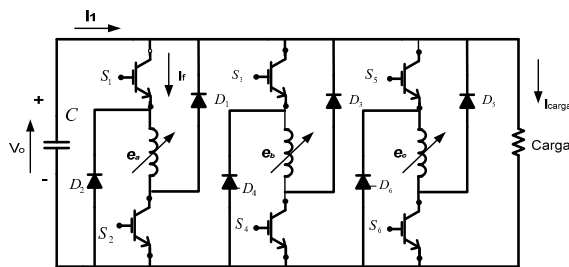


Fig. 11. Conversor HB para operação do GRV no modo auto-excitado.

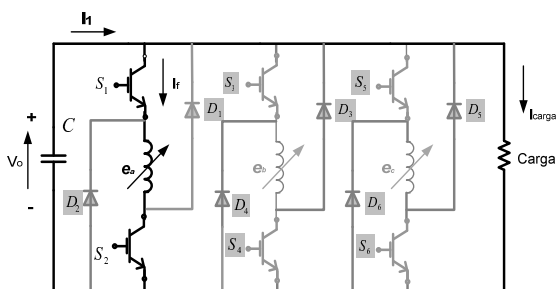


Fig. 12. Etapa 1: Excitação da fase A do gerador.

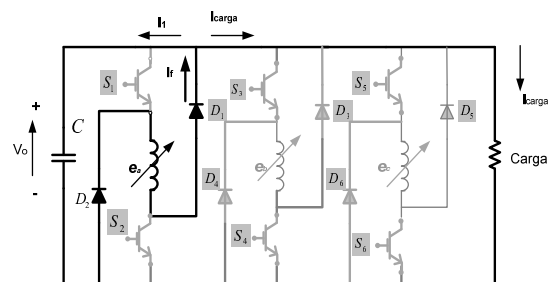


Fig. 13. Etapa 2: Excitação da fase A do gerador.

As etapas analisadas para a fase A se repetem para as fases B e C, na seção a seguir serão apresentados resultados de simulação em regime transitório e regime permanente da operação do GRVA com carga.

III. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção, serão apresentados resultados de simulação do gerador operando no modo auto-excitado. O programa foi escrito para desenvolver a simulação de uma máquina a relutância variável 6/4 operando como gerador. O conversor usado para acionar a máquina é do tipo HB, mostrado na figura 11 com todas as etapas descritas anteriormente.

A simulação é baseada em um protótipo real, com seis saliências no estator e quatro no rotor (6/4), construído para testes em bancada experimental. Portanto os parâmetros, perfil de indutância, limites de corrente, foram ajustados para representar a máquina. Todos os parâmetros do protótipo são mostrados em anexo.

Os resultados de simulação que serão mostrados na sequencia foram obtidos através da modelagem apresentada na seção II. Foi mostrado também que esta modelagem somente torna-se possível para operação do GRV no modo auto-excitado se o modelo contemplar a saturação magnética, e está seção só existe devido tal modelagem. A máquina primária que fornecerá a fonte de energia mecânica foi configurada com uma velocidade de 1800 rpm, a carga foi fixada em 40 Ω puramente resistiva, o capacitor foi configurado para um valor de capacitância C=7mF com uma tensão inicial de 20 V. Para o trabalho foi realizado um estudo por meio de simulação e observou-se que para valores abaixo de 1mF o gerador não consegue a auto-magnetização. Outro critério que também foi levado em consideração foi à redução de oscilação da tensão nos terminais da máquina [21].

Todos os passos descritos até aqui foram importantes para implementação e validação experimental. A figura 14(a) mostra a tensão gerada na carga, esta tensão ficou em torno de 105 volts e o transitório de escorvamento foi de 0,5 segundos, pode-se observar também que a tensão conforme dito anteriormente é uma tensão contínua porém pulsada visto que isto é uma característica inerente deste tipo de máquina. A figura 14(b) mostra esta mesma tensão com um intervalo menor evidenciando o regime permanente para este caso e mostrando que esta tensão estabilizou em torno de uma valor fixo.

A figura 14(a) mostra a corrente na fase durante o transitório de escorvamento para mesma situação, observando que esta corrente estabilizou para um valor de pico próximo a 75 amperes, a figura 16(d) mostra a mesma situação em regime permanente. A figura 15(a) mostra a tensão na fase do gerador durante o periodo transitório de escorvamento, onde é possível observar que esta tensão se estabiliza próximo de 105 volts.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Esta seção apresenta os resultados experimentais obtidos com o protótipo para comprovação com o estudo abordado anteriormente por meio de simulação. Foi montada uma bancada experimental conforme indicado na figura 16. O GRV foi acoplado a um motor de indução 2 cv, 4 pólos, acionado por um inversor comercial com controle vetorial. O conversor HB foi construído através de chaves IGBT (600V/100A), conforme mostrado pela figura 17, a estratégia de acionamento foi programada para ser executada em um DSP TMS320F2812, utilizado no sistema. A posição do rotor, necessária para aplicação dos sinais de gatilho durante o período de magnetização das fases, foi obtida utilizando sensores ópticos associados a um disco, que representa o instante exato em que cada fase deve ser magnetizada. Adicionalmente, com o intuito de validar os testes teóricos discutidos anteriormente foram realizados dois testes com carga resistiva de 40 Ω e 60 Ω descritos a seguir.

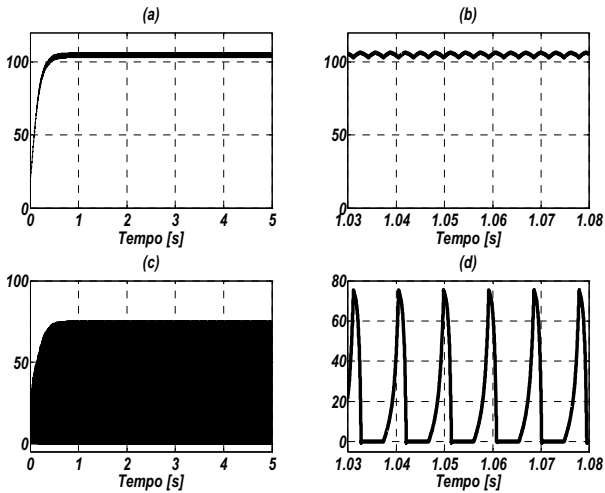


Fig. 14. Tensão gerada na carga durante transitório de escorvamento (a), e em regime permanente (b), corrente da fase durante o transitório de escorvamento (c) e regime permanente (d).

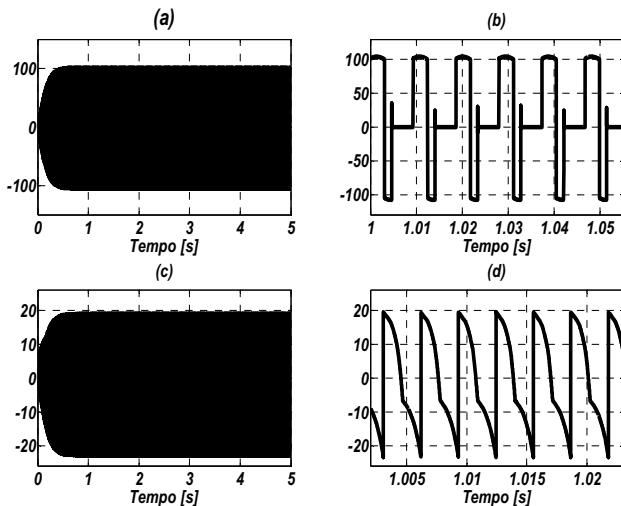


Fig. 15. Tensão da fase A durante transitório (a) e (b) em regime permanente, corrente no capacitor durante transitório (c) e regime permanente (d).

A figura 14(a) mostra a corrente na fase durante o transitório de escorvamento para mesma situação, observando que esta corrente estabilizou para um valor de pico próximo a 75 amperes, a figura 16(d) mostra a mesma situação em regime permanente. A figura 15(a) mostra a tensão na fase do gerador no transitório onde é possível observar que esta tensão se estabiliza próximo de 105 volts. A figura 15(b) mostra para a mesma situação a tensão na fase em regime permanente evidenciando as etapas de excitação (parte negativa da figura) e desmagnetização (parte positiva da figura). A figura 15(c) mostra a corrente no capacitor durante o transitório de excitação inicial para este caso foi adotado um valor de 20 volts. A Figura 15(d) mostra a corrente no capacitor em regime permanente e fica evidente que esta corrente é alternada observando e comprovando as etapas do conversor desenvolvidas anteriormente.



Fig. 16. Foto da Bancada de testes experimentais.



Fig. 17. Foto do circuito de acionamento do GRV e conversor Half-Bridge (IGBT 600V/100A)

A. Resultados carga resistiva 40 ohms

A figura 18 mostra a tensão na carga durante o transitório de escorvamento para a mesma situação obtida por simulação mostrada pela figura 15(a), pode ser observado que os valores estão próximos, inclusive o transitório de escorvamento. A figura 19 mostra a tensão na fase A em regime permanente, para a mesma situação vista pela figura 15(c). A figura 18 mostra a corrente no capacitor, que é

alternada e compreende o carregamento e descarregamento do capacitor. Esta situação foi simulada e comparada com a figura 15(d).

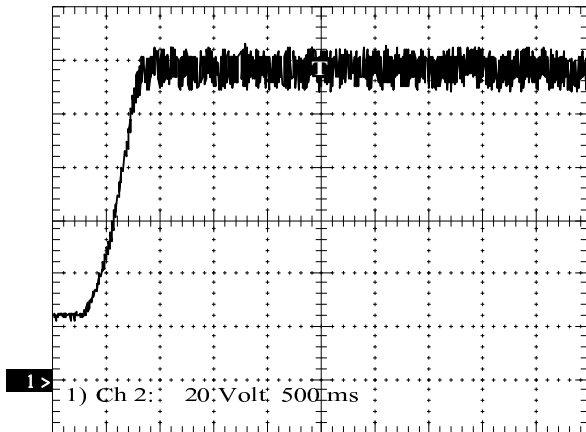


Fig. 18. Transitório de tensão na carga (escorvamento).

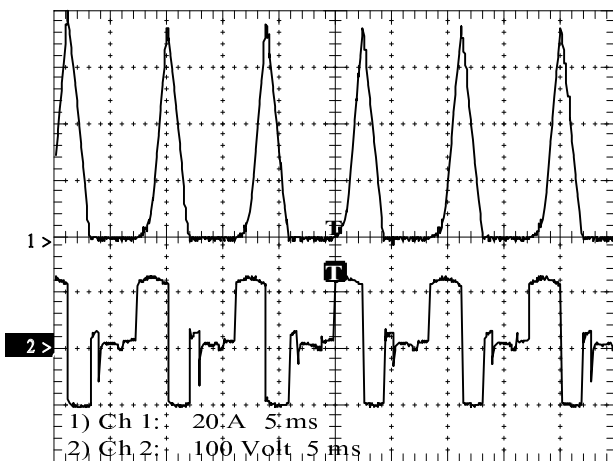


Fig. 19. Corrente (Canal 1) e tensão (Canal 2) na fase A em regime permanente.

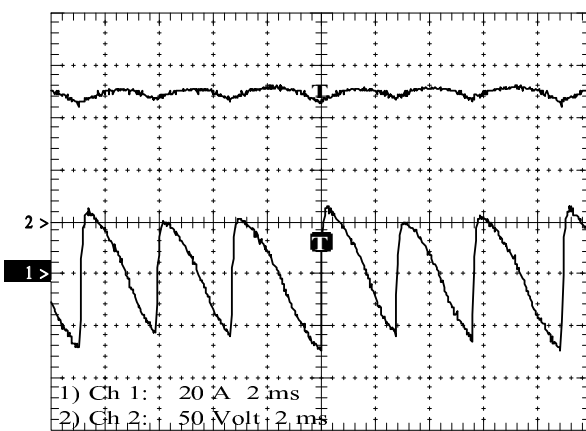


Fig. 20. Tensão na carga (Canal 2) e corrente no capacitor (Canal 1) em regime permanente.

B. Resultados com carga resistiva 60 ohms

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos através de um teste realizado para uma carga resistiva de 60Ω , a velocidade da máquina primária foi de 1800 rpm e todos os outros parâmetros foram descritos anteriormente. A figura 21(a) mostra a corrente no banco de capacitores no transitório de escorvamento, essa corrente assume valores pequenos antes da geração, após o momento de magnetização da máquina a corrente começa a crescer até assumir valores de regime permanente conforme mostrado pela figura 22(a). Para mesma situação a tensão na carga conforme mostrada pela figura 22 (b) no instante excitação inicial foi ajustada uma tensão de 20 volts após a magnetização da máquina começa a subir até o valor próximo de 120 volts de regime permanente conforme mostrado pela figura 22(b). Para este teste também foram medidos os valores de corrente na fase figura 23(a) e tensão na fase figura 23 (b) em regime permanente.

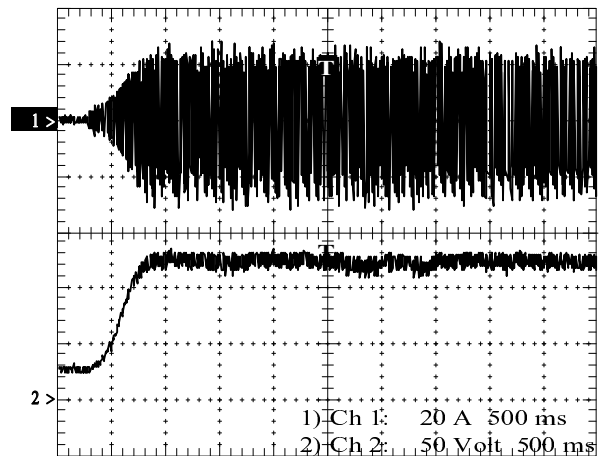


Fig. 21. Corrente no banco de capacitores (canal 1) (a) e tensão na carga (canal 2) (b) no transitório de escorvamento.

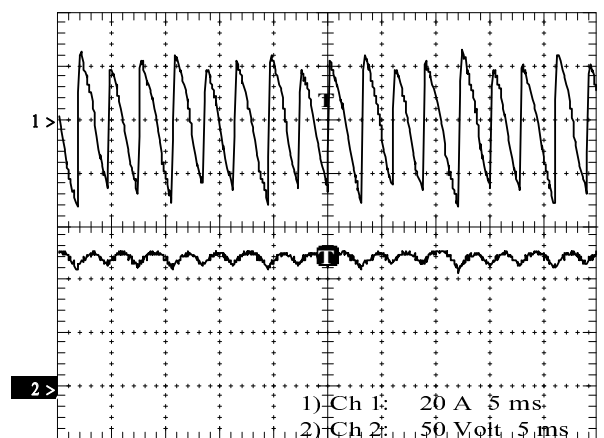


Fig. 22. Corrente no capacitor (canal 1) (a) e Tensão carga (canal 2) (b) em regime permanente.

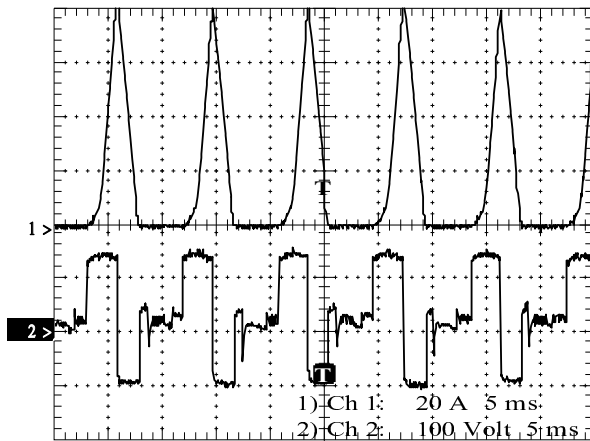


Fig. 23. Corrente na fase A (canal 1) (a) e tensão na fase A (canal 2)(b) em regime permanente.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre o comportamento do gerador a relutância variável operando no modo auto excitado. Foram investigados e relatados os diferentes tipos de excitação possíveis para a MRV. O artigo explora a estratégia de se utilizar um capacitor carregado com uma tensão inicial para permitir a excitação inicial da máquina e mostra que após o escorvamento, tensão terminal estável em modo auto excitado é mantida. No que concerne à modelagem matemática da máquina elétrica, demonstrou-se a necessidade de se levar em conta a característica de saturação do circuito magnético, sem o que a modelagem não consegue expressar corretamente a operação do dispositivo no modo de operação analisado. Foram apresentadas as equações mecânicas e elétricas que estabelecem o modelo matemático do gerador juntamente com a análise da dinâmica do conversor utilizado desde o transitório até em regime permanente. Resultados de simulação utilizando o ambiente MatLab/Simulink® também foram obtidos a fim iniciar os estudos sobre o tópico e também mostrar que é possível utilizar este tipo de máquina para operação auto-excitada. Finalmente resultados experimentais foram obtidos do protótipo utilizado a fim de validar os resultados de simulação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFU, pela estrutura disponibilizada, à FAPEMIG pelo apoio financeiro e à CAPES, pela concessão de bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

[1] N. Radimov, N. Ben-Hail, R. Rabinovici "Switched Reluctance Machines as Three-Phase AC Autonomous Generator", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 11, pp. 3760-3764, November 2006.
 [2] W. Cai, "Comparison and review of electric machines for integrated starter alternator applications", *IEEE-IAS*, 2004.

[3] P. Zhang, S. S. Williamson, "Recent status and future prospects of integrated starter-generator based hybrid electric vehicles" *IEEE-VPPC*, 2008.
 [4] J. G. W. West, "DC, induction, reluctance and PM motors for electric vehicles" *Power Engineering Journal*, Vol. 8, Issue: 2, 1994.
 [5] I. Kioskeridis, C. Mademlis "Optimal Efficiency Control of Switched Reluctance Generators", *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 21, no. 4, pp. 1062-1072, July 2006.
 [6] L. P. B. de Oliveira, A. C. Oliveira, E. R. C. da Silva, A. M. N. Lima e C. B. Jacobina "Aacionamento Eletrônico de Motor a Relutância: Determinação do Perfil da Indutância, Controle do Conjugado e Comutação Suave" *Eletrônica de Potência*, Vol. 8, No. 1., 2003.
 [7] T. J. E. Miller, "Electronic Control of Switched Reluctance Machines", *Newnes Power Engineering Series*, Oxford, 2001.
 [8] T. Matsuo, J. Luo, E. P. Hoffman, T. A. Lipo N. Radimov, N. Ben-Hail, R. Rabinovici "Self Excited Variable Reluctance Generator", *IEEE Industry Application Society*, New Orleans, Louisiana, October 5-9, 1997.
 [9] V. Nedic, T. A. Lipo "Experimental Verification of Induced Voltage Self-Excitation of a Switched Reluctance Generator", *IEEE Industry Application Conference*, Roma, Italy, October 8-12, 2000.
 [10] A. Martínez, J. Vina, F. Perez, E. Laloya, B. Martín, T. Pollán, B. Sánchez, J. Laladó "Steady-State Behavior of an AC Autonomous Switched Reluctance Generator", *IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC*, Rhodes, June 15-19, 2008.
 [11] A. Martinez, et. al., "Use of an AC self-excited switched reluctance generator as a battery charger" *13th IEEE-PEMC*, 2008.
 [12] H. Chen, J. J. Gu "Implementation of the Three-Phase Switched Reluctance Machine System for Motors and Generators" *IEEE Transactions on Mechatronics*, vol. 15, no. 3, pp. 521-432, June 2010.
 [13] 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 - SOBRAEP*, Vol. 13, no. 3, Agosto 2008.
 [14] A. W. F. V. Silveira, D.A. Andrade, L. C. Gomes, C. A. Bissochi Jr, H. de Paula "Generated voltage control in a switched reluctance motor/generator" *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, Vol. 15, No.3., 2010.
 [15] G. G. Sotelo, M. R. Ribeiro, M. El-Mann, L. G. B. Rolim, J. L. da Silva Neto "Dynamic non-linear model of a Switched Reluctance Machine for operation as motor/generator" *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, Vol. 15, No.1., 2010.
 [16] 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.
 [17] C. G. C. Neves, N. Sadowski, Y. Lefèvre, R. Carlson "Modelagem dos Ambientes Eletromagnético e Mecânico do Motor de Relutância Chaveado" *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, Vol. 2, No.1., 1997.

- [18] L. L. N. dos Reis, A. A. R. Coelho, O. M. Almeida, R. N. C. Almeida, "Modeling and control of switched reluctance motor drives based on set point relay" *Eletrônica de Potência* - SOBRAEP, Vol. 13, No.3., 2008.
- [19] L. O. A. P. Henriques, L. G. B. Rolim, W. I. Suemitsu, P. J. C. Branco, "Uma revisão das estratégias de redução de ondulações de conjugado no motor de relutância chaveado" *Eletrônica de Potência* - SOBRAEP, Vol. 8, no. 1, 2003.
- [20] P. P. Paula, W. M. da Silva, J. R. Cardoso, S. I. Nabeta "Simulação do Desempenho de Motores e Geradores de Relutância Chaveados" *Eletrônica de Potência* - SOBRAEP, Vol. 8, No.2., 2003.
- [21] V. R. Bernardeli, D. A. Andrade, A. W. F. V. Silveira, L. C. Gomes, G. P. Viajante, L.G.Cabral "Self-Excited Switched Reluctance Generator" *XI Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência* - COBEP, 2011.
- [22] E. S. L. Oliveira, A. Coelho, M. L. Aguiar, M. Suetake "Investigation on Single-phase Switched Reluctance Generator Under Variable Speed" *XI Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência* - COBEP, 2011.
- [23] L. L. N. Reis, R. N. Almeida, W. A. Silva, G. M. P. Mendes, O. M. M Almeida "Self-tuning Control for Current Loop in a Switched Reluctance Motor Drive" *XI Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência* - COBEP, 2011.

ANEXO

TABELA I
Características do GRV

Parâmetros	Valor
Ângulo de Condução	30 graus
Atrito Viscoso	0.026 N.m.s
Culatra do Estator	12 mm
Culatra Rotor	12,4 mm
Comprimento da pilha laminada	107 mm
Dentes do Estator	22,5 mm
Dentes do Rotor	11,7 mm
Diâmetro do Estator	140 mm
Diâmetro do Rotor	70 mm
Gap de Ar	0,4 mm
Largura dos dentes do Estator	19 mm
Largura dos dentes do Rotor	20 mm
Momento de Inércia	0,0028 kg.m ²
Número de espiras por fase	100 volta/fase

DADOS BIOGRÁFICOS

Victor Régis Bernardeli nasceu em Capinópolis - Brasil, em 27 Setembro de 1982. É engenheiro de telecomunicações pela UNIMINAS - União Educacional de Minas Gerais (2005), mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (2008). Atualmente é aluno de doutorado da UFU. Suas principais áreas são: acionamento e controle de máquinas elétricas, modelagem matemática e simulação computacional.

Darizon Alves de Andrade Nasceu em Monte Alegre de Minas - Brasil, em 23 de Junho de 1956. Recebeu os títulos de graduação e mestrado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e Ph. D. pela Universidade de Leeds, U. K. em 1980, 1987 e 1994, respectivamente. Durante o ano de 2000 realizou estágio de pós doutorado na VTEC, Blacksbur, VA, USA, pesquisando sobre novas estratégias sobre modelagem da MRV. Suas áreas de interesse são: Projeto, simulação e técnicas de controle de máquinas elétricas, conversão eletromecânica de energia e qualidade de energia elétrica. Tem orientado e publicado diversos trabalhos na área.

A. W. F. V. Silveira Nasceu em Goiânia-GO em 1981. 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, como professor efetivo, onde também realiza pesquisa para o desenvolvimento das estratégias de controle e acionamento de máquinas elétricas.

Luciano Coutinho Gomes Nasceu em Barreira do campo - Brasil em 20 de outubro de 1972. Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Obteve os títulos de Mestre e Doutor em 2002 e 2008, respectivamente, também em engenharia elétrica. Atua como professor da UFU desde 2003. Desenvolve pesquisa na área acionamento e controle de máquinas elétricas.

G. P. Viajante: nasceu em Goiânia -Goiás - Brasil em 15 de novembro de 1976. 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.