

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DIGITAL PARA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL OPERANDO COMO GERADOR NO MODO AUTOEXCITADO

Marcos José de Moraes Filho, Victor Regis Bernardeli, Luciano Coutinho Gomes, Darizon Alves de Andrade

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE)
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil

marcos.jmf@hotmail.com, eng.vitao@gmail.com, lcgomes2005@gmail.com

Resumo – Neste artigo é apresentado um estudo sobre o comportamento do gerador a relutância variável autoexcitado (GRVA). O conjunto completo é simulado utilizando o ambiente MatLab/Simulink®. A representação da matriz de estados da máquina a relutância variável, que inclui em seu modelo a saturação do circuito magnético é mostrada, e com base na mesma é implementado um sistema de acionamento para operar o GRVA em ambiente com velocidades variáveis; a fim de se verificar a viabilidade e a eficiência do sistema para utilização deste tipo de máquina na geração eólica, tendo como foco comunidades isoladas onde não existe o acesso a energia elétrica.

Palavras-Chave – Conversor, DSP, gerador autoexcitado, máquina a relutância variável.

IMPLEMENTATION OF A DIGITAL CONTROL SYSTEM FOR A VARIABLE RELUCTANCE MACHINE OPERATING AS SELF-EXCITED GENERATOR MODE

Abstract – This paper presents a study on the behavior of the self-excited variable reluctance generator. The complete set is simulated using MatLab/Simulink®. The matrix representation of the state of variable reluctance machine, which includes in its model the saturation of the magnetic circuit is shown, and based on it is implemented a drive system to operate self-excited variable reluctance generator an environment with variable speeds, in order to verify the feasibility and efficiency of the system to use this type of machine in wind generation, focusing on isolated communities where there is no access to electricity.

Keywords - Drive, DSP, self-excited generator, variable reluctance machine.

I – INTRODUÇÃO

Apesar de possuir o primeiro registro de sua aplicação em meados do século XIX, e vantagens tanto construtivas quanto operacionais com relação a algumas máquinas elétricas amplamente utilizadas como motores de indução (MI's) e motores de corrente contínua (MCC), a máquina a relutância variável (MRV) teve seu potencial pouco aproveitado e com lenta evolução, devido principalmente a forte dependência de um sistema eletrônico de potência para chaveamento de suas fases. Nas últimas décadas, porém, os sistemas de acionamento das máquinas elétricas evoluíram de forma rápida, apresentando significativos avanços em eficiência e controlabilidade o que fez com que novos tipos máquinas elétricas passassem a fazer parte do conjunto de alternativas disponíveis e, dentre estas novas alternativas se encontram as MRV's.

Construtivamente, conforme pode ser observada na Figura 1, a MRV é constituída de um conjunto de lâminas formando "dentes" ou polos, diametralmente opostos, procedimento o qual é aplicado tanto ao rotor quanto ao estator, tornando desta forma, a única máquina elétrica a possuir estas características. Observa-se também a disposição dos enrolamentos das fases da máquina, que são concentrados, aspecto que permite que as interações magnéticas entre suas fases sejam praticamente desprezíveis ou inexistentes, com reflexos positivos no acionamento e controle de operação da mesma. Na Figura 1, temos um perfil da máquina utilizada neste trabalho, uma MRV 6/4.

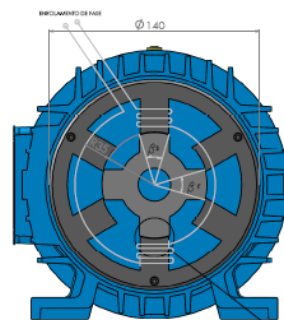


Fig. 1. - Perfil transversal da máquina a relutância variável 6/4.



Nas MRV's nota-se que, a indutância varia de acordo com a posição do rotor em relação ao estator, existindo uma posição onde a indutância é máxima, correspondente a posição onde os polos do rotor e do estator estão completamente alinhados, e uma posição onde a indutância é

mínima, correspondente a posição onde os polos estão completamente desalinhados. Estas posições recebem o nome de posição de equilíbrio estável e posição de equilíbrio instável, respectivamente. Energizando a fase da máquina na posição de equilíbrio estável o rotor permanecerá parado indefinidamente. Por outro lado, energizando a fase da máquina na posição de equilíbrio instável, o rotor poderá se movimentar no sentido horário ou anti-horário buscando a posição de equilíbrio estável.

Dentre as vantagens oferecidas pela MRV encontram-se:

- Robustez, permitindo trabalho em ambientes sujeitos a altas temperaturas e vibrações;
- Confiabilidade;
- Tolerância à falha de fase, em motores multifásicos;
- Alta relação conjugado por volume, que possibilita construção de motores de menores dimensões;
- Possibilidade de trabalhar com velocidade variável de maneira econômica;
- Construção simples, com enrolamentos concentrados em volta dos polos e laminação simplificada;
- Inexistência de enrolamentos no rotor diminuindo perdas por efeito joule;
- Elevado rendimento;
- Baixa inércia, possibilitando trabalho como servomotor;
- Alimentação a partir de uma fonte de corrente contínua, com correntes unidirecionais, diminuindo o número de dispositivos eletrônicos em seu conversor;
- Ausência de escovas.

Devido ao conjunto de vantagens citadas acima decidimos investir no estudo de aplicações do GRVA.

II – MODELAGEM MATEMÁTICA DO MRVM

A partir das equações básicas que descrevem o comportamento do gerador a relutância variável (GRV) foi elaborado um software em MatLab/Simulink/Simpowersystems para expressar o sistema completo do acionamento do mesmo.

Para o desenvolvimento da modelagem matemática foi considerado um GRV 6/4 trifásico, a partir do qual foi implementada a integração da matriz de estados do mesmo. Para se obter esta matriz é necessário o conhecimento das equações básicas que relacionam as grandezas mecânicas e elétricas deste tipo específico de máquina. A matriz de estados do motor é mostrada abaixo, o desenvolvimento completo da mesma ou das equações que a geraram foge ao escopo deste trabalho e portanto não serão abordados.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ C_{cg} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 & 0 \\ r_1 & r_2 & r_3 & -D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a(i, \theta) & 0 & 0 & 0 & i_a \frac{\partial L_a(i, \theta)}{\partial \theta} \\ 0 & L_b(i, \theta) & 0 & 0 & i_b \frac{\partial L_b(i, \theta)}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & L_c(i, \theta) & 0 & i_c \frac{\partial L_c(i, \theta)}{\partial \theta} \\ 0 & 0 & 0 & -J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

Fig. 2. - Matriz de estados do GRV.

Onde:

v_a - Tensão na fase A (V)

v_b - Tensão na fase B (V)

v_c - Tensão na fase C (V)

C_{cg} - Conjugado de carga (N.m)

r_a - resistência de fase A (Ω)

r_b - resistência de fase B (Ω)

r_c - resistência de fase C (Ω)

D - Coeficiente de atrito viscoso ($\text{Kg.m}^2/\text{s}$)

L_a - Indutância da fase A (H)

L_b - Indutância da fase B (H)

L_c - Indutância da fase C (H)

\dot{i}_a - Corrente na fase A (A)

\dot{i}_b - Corrente na fase B (A)

\dot{i}_c - Corrente na fase C (A)

ω - Velocidade angular do rotor (rad/s)

θ - Ângulo entre o rotor e o estator (rad)

Com a matriz de estado mostrada acima iniciamos o desenvolvimento da simulação no ambiente do Simulink.

III – SIMULAÇÃO DINÂMICA DO GRVA

Inicialmente discutiremos os resultados obtidos por meio da ferramenta MatLab/Simulink. O modelo computacional utilizado para a topologia do conversor estático é mostrado na Figura 3. O conversor utiliza chaves do tipo IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) e cada enrolamento da máquina usa duas chaves que correspondem a um braço do conversor. Os pulsos para o acionamento destas chaves são gerados através do bloco de geração de pulsos de disparos das chaves; a Figura 4 enfatiza o mesmo. Cada pulso deste bloco é obtido através do ângulo de condução das chaves que é dependente do perfil da indutância incremental e define a operação da máquina.

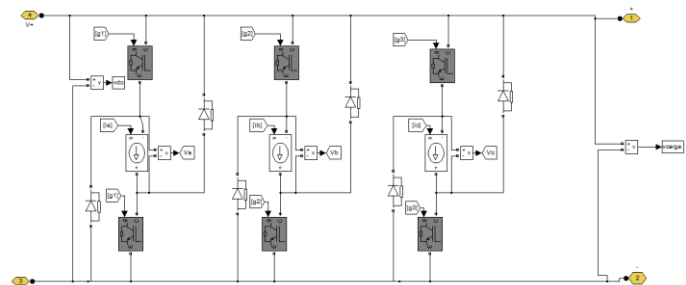


Fig. 3. - Modelo computacional utilizado para a topologia do conversor estático.

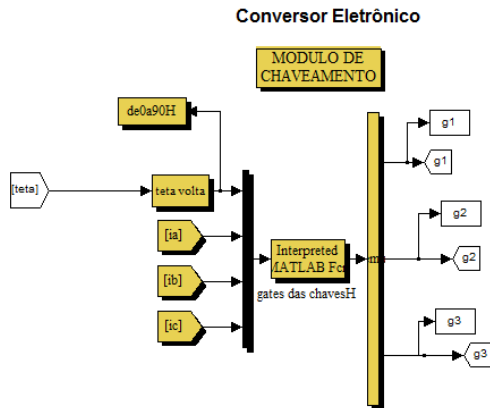


Fig. 4. - Sistema de controle das chaves.

A Figura 5 mostra o ambiente completo de simulação destacando os seguintes blocos: banco de capacitores, carga e modelo do gerador a relutância variável.

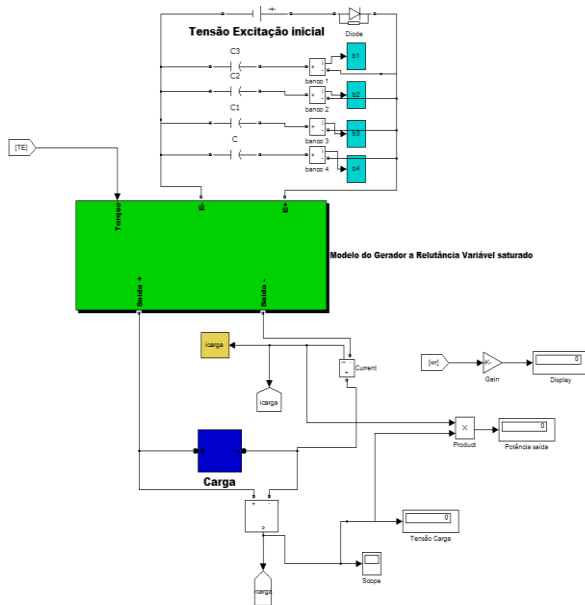


Fig. 5. - Ambiente completo de simulação.

As equações de estados são resolvidas através da função S-function, as variáveis de entrada desse subsistema são as tensões nas fases e conjugado; as variáveis de saída desse subsistema são as correntes das fases e a posição do rotor (θ) que são obtidas a partir dos dados de entrada.

O sistema que realiza a modelagem do motor, apresentado na Figura 6, é montado a partir da matriz de estado do GRV. A tensão aplicada à cada fase provém do sistema de alimentação e é dependente da lógica de acionamento do motor. O conjugado de carga é ajustado com a variação da velocidade e seu valor é uma função quadrática da velocidade angular.

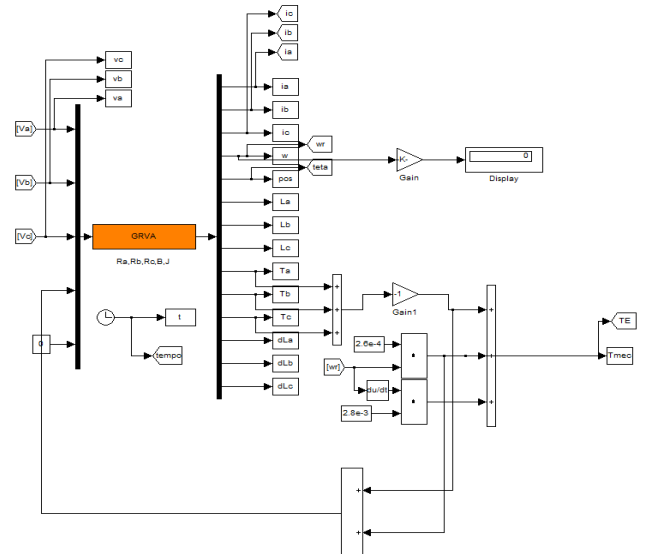


Fig. 6. - Sistema com a modelagem do motor.

Por se tratar de um sistema envolvendo equações diferenciais, foi desenvolvido um programa para resolver a matriz usando a função Ode23t. Esta função resolve equações diferenciais, sendo o passo de integração ajustado pela própria função. O passo máximo fixado para a integração foi regulado em 0,0001 segundo.

É importante ressaltar que todos os passos descritos e mostrados anteriormente foram importantes para implementação e validação experimental. Os gráficos mostrados a seguir são obtidos de uma simulação cuja velocidade do eixo do gerador é de 1600 rpm e a carga de 40 ohms.

A figura 7(a) mostra a tensão gerada na carga, esta tensão ficou em torno de 105 volts e o transitório foi de 0,5 segundos, pode-se observar também que a tensão é uma tensão contínua, porém pulsada visto que isto é uma característica inerente da máquina em questão. A Figura 7(b) mostra esta mesma tensão com um intervalo menor evidenciando o regime permanente para este caso e mostrando que esta tensão estabilizou-se em torno de um valor fixo.

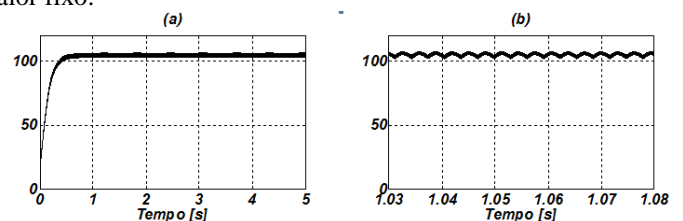


Fig. 7. - Tensão gerada na carga durante transitório (a) e em regime permanente (b).

As Figuras 8(a) e 8(b) mostram a tensão na fase A abordando o regime transitório e o regime permanente, respectivamente, evidenciando as etapas de excitação (parte negativa da figura) e desmagnetização (parte positiva da figura).

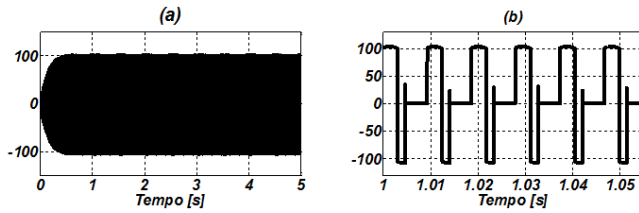


Fig. 8. - Tensão da fase A durante transitório (a) e em regime permanente (b).

A Figura 9 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.

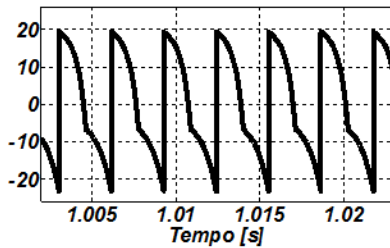


Fig. 9. - Corrente no capacitor em regime permanente.

IV – MONTAGEM E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Na etapa de confecção das placas de circuito impresso com a utilização do software adequando, primeiramente fizemos o esquema eletrônico do conversor utilizado, o qual foi construído através de chaves IGBT adquiridas da empresa Fuji Electric, tipo 6MBI100S-060, tendo as ligações especificadas na Figura 10. Tanto os circuitos isoladores quanto os circuitos de alimentação que serão explorados adiante, devem ser construídos para a ligação de cada chave, ou seja, teremos seis circuitos isoladores e seis fontes de alimentação.

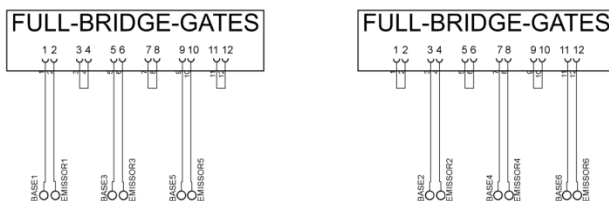


Fig. 10. - Esquema do circuito de ligação dos módulos IGBT.

A fim de implementar um desacoplamento entre sistemas de potência e de controle foi necessária a inserção de acopladores óticos no acionamento geral. Além de isolar a parte de potência da parte de controle, o circuito mostrado na Figura 11 também fornece um ganho à tensão de entrada, pois, o máximo valor de tensão na saída do microcontrolador utilizado não é suficiente para acionar os elementos utilizados como chaves no conversor estático, porém, após o sinal passar pelo circuito isolador a tensão recebe um ganho o qual garante o acionamento das chaves quando necessário.

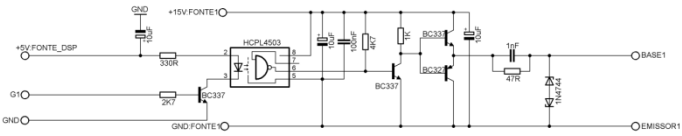


Fig. 11. - Esquema do circuito isolador.

Como o circuito isolador necessita de fontes com referências de terras diferentes, deveremos ter duas fontes de alimentação para cada chave, uma para alimentar o circuito antes do opto acoplador, a qual e a própria tensão fornecida pela placa do microcontrolador utilizado; e outra para a alimentação do próprio opto acoplador e também de todo o circuito após o mesmo; na Figura 12 temos o esquema eletrônico destas fontes.

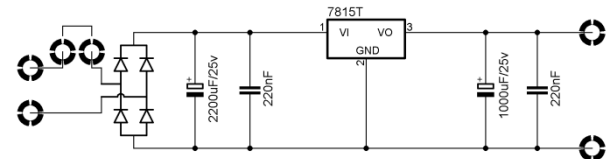


Fig. 12. - Esquema das fontes de alimentação.

Tanto a parte de controle quanto a de potência foram montadas em uma única placa, utilizando ambas as fases da mesma; e com esta medida apesar de encontramos um circuito complexo e de confecção complicada, ganhamos em aspectos estéticos, econômicos e principalmente em eficiência, pois, reduzimos a influência de determinados ruídos provenientes de uma possível ligação entre duas placas distintas.

A placa que contém as fontes de alimentação foi feita em uma plataforma distinta, pois, como esta não trabalha com manipulação de sinais que sejam provenientes de sensores ou do próprio microcontrolador, não há problemas em fazer sua ligação à outra por meio de fios.

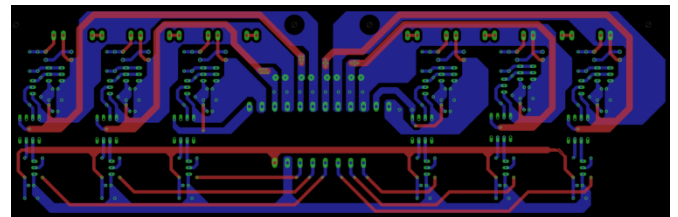


Fig. 13. - Layout da placa de controle e potência.

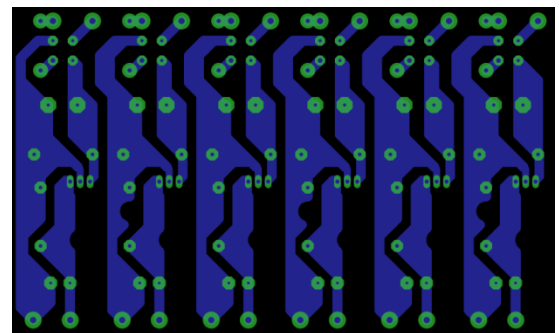


Fig. 14. - Layout da placa da alimentação.

Com os layouts em mãos iniciou-se a construção efetiva das placas, processo extremamente trabalhoso, que envolve desde etapas de transferência térmica a corrosão química do cobre da placa, todavia, como não é foco deste, estas etapas não serão abordadas. Temos como resultado final as placas mostradas nas Figuras 15 e 16, circuito de controle/potência e de alimentação, respectivamente.



Fig. 15. - Montagem da placa de controle e potência.



Fig. 16. - Montagem da placa de alimentação.

A realização de todas as etapas descrita até aqui foram muito importantes para o desenvolvimento do trabalho e obtenção dos resultados esperados. O conversor após a montagem final é mostrado na Figura 17, na qual temos além das placas mostradas nas Figuras 15 e 16 o incremento dos módulos IGBT, do transformador que alimentará as fontes da placa de alimentação e do banco capacitivo que será o responsável por manter a máquina funcionando no modo autoexcitado. Este conversor consegue acionar máquinas a relutância variável de até três fases, com nível de 100 amperes de corrente e com uma tensão de até 600 volts no barramento CC.



Fig. 17. - Montagem final.

Os testes que foram realizados a fim de comprovar o perfeito funcionamento do conversor montado são apresentados abaixo. Para tais testes utilizou-se uma carga de 40 ohms, uma velocidade fixa de 1600 rpm e um banco de

capacitores de 6 mF. A princípio verificou-se a forma de onda na carga, obtendo-se o gráfico da Figura 18.

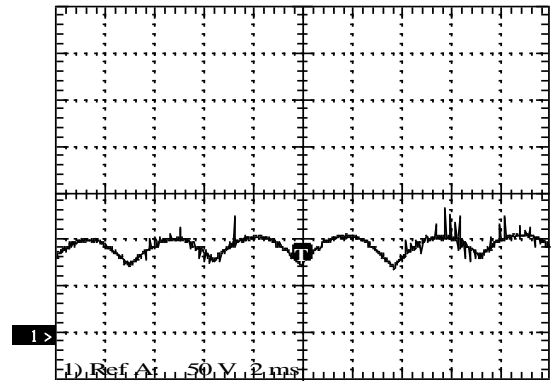


Fig. 18. - Tensão na carga em regime permanente.

No início do teste a tensão era 20 V (excitação inicial) e após o período transitório tensão era próxima de 98 V.

Outro resultado que foi adquirido neste teste funcional foi a tensão na fase A do gerador e mostrado pelo gráfico da Figura 19, através do mesmo é verificado o instante de excitação e geração da máquina.

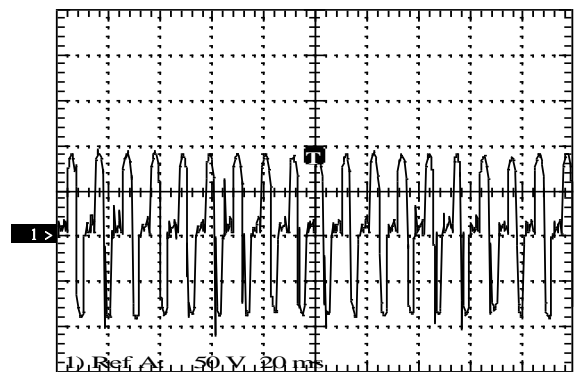


Fig. 19. - Tensão na fase A em regime permanente.

A Figura 20 mostra-nos o comportamento da corrente no capacitor, que é alternada e compreende o carregamento e descarregamento do capacitor.

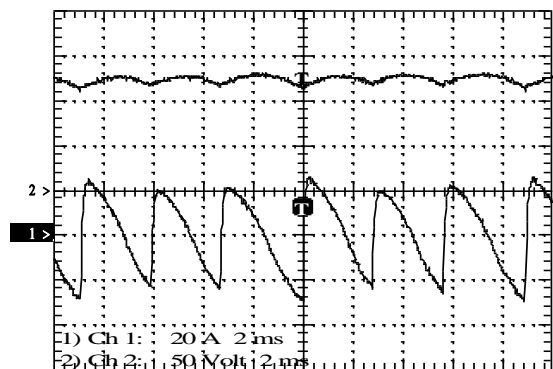


Fig. 20. - Tensão na carga (Canal 2) e corrente no capacitor (Canal 1) em regime permanente.

V – CONCLUSÃO

Analisando a evolução da sociedade, observa-se que é imperativo agregar novas tecnologias e novas fontes de

energia à matriz energética atual sempre enfatizando a eficiência energética.

A questão ambiental gera grandes preocupações a toda a sociedade e o desenvolvimento de um acionamento da máquina a relutância variável para trabalhar como gerador autoexcitado se mostra um estudo promissor, pois, seria uma solução viável às aplicações as quais exigem uma excitação, porém carecem de uma rede de energia próxima, tendo como exemplo a geração eólica.

Neste trabalho foram apresentadas a modelagem, a simulação e os circuitos de acionamento de um motor à relutância variável operando como gerador no modo autoexcitado além de resultados computacionais e experimentais.

Pelos resultados da simulação computacional confirmamos a importância da utilização das ferramentas de simulação, pois, por meio da mesma podemos visualizar antecipadamente o comportamento de determinado sistema, e implementar mudanças sem grande dispêndio de recursos financeiros ou de tempo. Pelos resultados experimentais confirmamos a viabilidade técnica do projeto, ou seja, aplicações na área de geração eólica.

Modificações no hardware de uma forma geral dificilmente serão necessárias, pois, o microcontrolador utilizado é bastante flexível e atende perfeitamente ao projeto apresentado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [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] 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.
- [5] T. J. E. Miller, "Electronic Control of Switched Reluctance Machines", *Newnes Power Engineering Series*, Oxford, 2001.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Andrade, D. A., Krishnan, R. "Characterization of Switched Reluctance Machines Using Fourier Series Approach" in *Proc. 36th IEEE Ind. Appl. Annu. Meeting*, Sep. 2001, pp. 48-54.
- [11] 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.
- [12] E. S. L. Oliveira, A. Coelho, M. L. Aguiar, M. Suetake "Investigation on Single-phase Switched Reluctance Reluctance Generator Under Variable Speed" *XI Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência - COBEP*, 2011.
- [13] Viajante, G.P., Andrade, D. A., Silveira, A. W. F. V., Bernardeli, V. R., Gomes, L. C., Freitas, M. A. A., Domingos, J. L, Fleury, A. "Estratégia para melhoria da eficiência da conversão eletromecânica de energia do GRV" *Eletrônica de Potência*, Vol. 16, No. 4, 2011.