

Estudo do comportamento de um motor à relutância variável monofásico utilizando microcontrolador PIC16F877

Marcos José de Moraes Filho, Luciano Coutinho Gomes, Augusto W. Fleury, Vinicius Toledo Dias
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE)
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil
marcos.jmf@hotmail.com, lcgomes2005@gmail.com, augustofleury@yahoo.com.br, v.toledodias@gmail.com

Resumo – O motor à relutância variável monofásico representa uma solução bastante robusta em aplicações que requerem baixo torque de partida, como por exemplo, em cargas fracionárias. Este trabalho tem como objetivo propor e implementar um acionamento capaz de controlar a corrente de um motor à relutância variável monofásico. A modelagem matemática, bem como os resultados de simulação são apresentados. No intuito de validar o modelo, desenvolveu-se um protótipo experimental utilizando sensores analógicos e digitais, além de um microcontrolador altamente flexível. Os resultados experimentais e de simulação são expostos e confrontados, e mostram a viabilidade técnica da proposta aqui apresentada.

Palavras-Chave – Histerese, Microcontrolador, Modelagem, Motor à relutância variável, Simulação.

STUDY THE BEHAVIOR OF A SINGLE-PHASE VARIABLE RELUCTANCE MOTOR USING PIC16F877 MICROCONTROLLER

Abstract – The single phase variable reluctance motor represents a robust and an economic solution for fractional load applications, which require low starting torque. The aim of this paper is to propose and implement a driver capable of controlling the current of a single phase variable reluctance motor. Mathematical modeling and simulation results are presented. In order to validate the model, an experimental setup using analog and digital sensors was developed, and a highly flexible microcontroller, as well. The simulation and experimental results are presented and compared, showing the technical viability of the proposal presented here.

Keywords - Hysteresis, Microcontroller, Modeling, Simulation, Variable reluctance motor.

I – INTRODUÇÃO

Apesar de possuir o primeiro registro de sua aplicação em meados do século XIX, e algumas 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), o motor à 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, permitindo que novos tipos máquinas elétricas passassem a fazer parte do conjunto de alternativas disponíveis e viáveis, dentre as quais se encontram os MRV's.

Construtivamente o MRV possui polos salientes tanto no estator quanto no rotor sendo esta uma particularidade das máquinas à relutância variável. Destaca-se também nesta máquina a disposição concentrada dos enrolamentos, característica que torna o acoplamento mútuo entre as fases desprezíveis, contribuindo positivamente no acionamento e controle da mesma. A Figura 1 ilustra um motor monofásico 4/4, objeto deste estudo, em corte transversal.

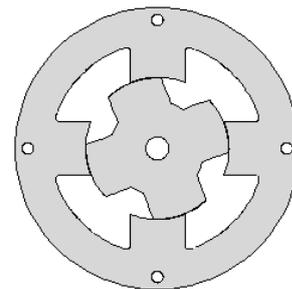


Fig. 1. Corte Transversal do MRCM 4/4.

A indutância varia com a variação da 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.

As Figuras 2 e 3 são fotos do estator e do rotor do motor utilizado ao longo do estudo.



Fig. 2. Estator do motor utilizado no projeto.



Fig. 3. Rotor do motor utilizado no projeto.

Dentre as vantagens oferecidas pelo 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 servo-motor;
- Alimentação a partir de uma fonte de corrente contínua, com correntes unidirecionais, diminuindo o número de dispositivos eletrônicos em seu conversor;
- Ausência de escovas.

Os motores à relutância variável monofásicos (MRVM) são indicados para acionamento de cargas como ventiladores, exaustores e bombas. Estas cargas, geralmente são movidas por MI's, e nestes casos os MRVM's podem oferecer maior eficiência, redução de volume para um mesmo torque exigido além de possibilitar o controle de velocidade com larga faixa de variação.

II – MODELAGEM MATEMÁTICA DO MRVM

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

Para o desenvolvimento da modelagem matemática foi considerado um motor 4/4 monofásico (ilustrado na Figura 1), a partir do qual foi implementada a integração da matriz de estados do motor. Para obter esta matriz é necessário conhecer as 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.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_p \\ \dot{C}_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_p & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} \cdot i_p \cdot \frac{\partial L_p(\theta)}{\partial \theta} & -D & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_p \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_p & 0 & i_p \cdot \frac{\partial L_p(\theta)}{\partial \theta} \\ 0 & -J & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_p \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde:

- V_p – Tensão na fase (V)
- C_c - Conjugado de carga (N.m)
- r_p – resistência de fase (Ω)
- L_p – Indutância da fase (H)
- i_p – Corrente na fase (A)
- D - Coeficiente de atrito viscoso ($\text{Kg.m}^2/\text{s}$)
- θ – Ângulo entre o rotor e o estator (rad)
- ω - Velocidade angular do rotor (rad/s)
- J - Momento de inércia do motor (Kg.m^2)

Com base no projeto construtivo mecânico e elétrico do motor, foi estimado o valor do momento de inércia do motor como $J_m = 2.10^{-2} \text{ Kg.m}^2$. O coeficiente de atrito viscoso adotado foi $D = 2,14.10^{-4} \text{ Kg.m}^2/\text{s}$, também estimado com base no projeto construtivo mecânico e elétrico da máquina.

III – SIMULAÇÃO DINÂMICA DO MRVM

O sistema de acionamento do MRVM é mostrado em detalhes nas Figuras 4, 5 e 6. Na Figura 4 temos o sistema que compreende a fonte de alimentação C.A., uma ponte retificadora C.A./C.C., capacitor filtro, mosfets e diodos de potência.

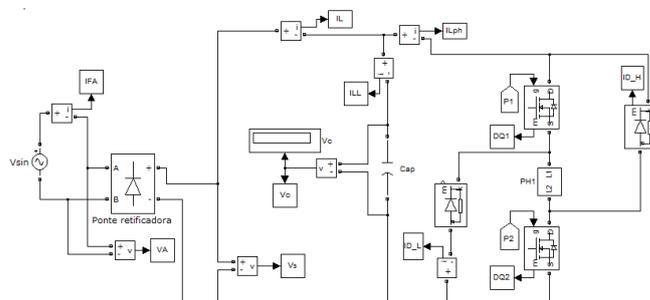


Fig. 4. Sistema completo de alimentação do motor.

O sistema de controle ilustrado na Figura 5 é obtido a partir do conhecimento do ângulo entre o rotor e o estator, valor o qual é fornecido pelo sistema de modelagem do motor.

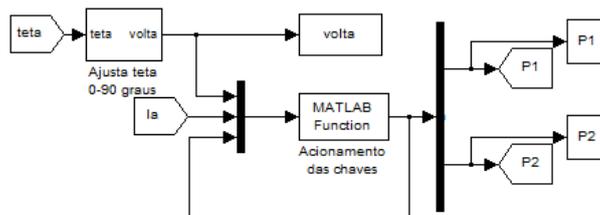


Fig. 5. Sistema de controle das chaves.

O sistema que realiza a modelagem do motor, apresentado na Figura 6, é montado a partir da matriz de estado do MRVM. A tensão aplicada à 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.

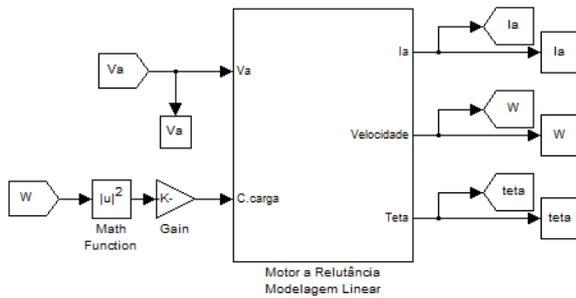


Fig. 6. Sistema com a modelagem do motor.

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.

A estratégia de acionamento abordada ao longo deste trabalho consiste em acionar o MRCM mantendo um controle sobre a corrente de fase e também sobre o alinhamento dos polos do estator com os polos do rotor. No *Simulink*, podemos dividir esta técnica em 2 etapas básicas:

1ª - Em uma primeira etapa é aplicada tensão positiva ao enrolamento do motor através do fechamento das duas chaves do conversor. As chaves são mantidas fechadas até que a corrente atinja o valor máximo previamente escolhido ou até que os polos do estator e do rotor estejam próximos do alinhamento. Nesta simulação os o ângulo mínimo será tomado com 47° e a histerese de corrente estará contida dentro do intervalo de 3,2 a 3,8 A. Os valores de corrente citados anteriormente foram escolhidos por serem os valores utilizados nos ensaios experimentais.

2ª - Quando a corrente alcança seu valor máximo ou o ângulo mínimo necessário não é atingido inicia-se a etapa 2, que consiste na abertura das chaves, e então a corrente que circula pela fase é forçada a passar pelos diodos do conversor e o enrolamento do motor fica submetido à tensão negativa (tensão reversa). Estando a fase submetida à tensão reversa, a corrente da fase decresce rapidamente até sua extinção.

Com o conhecimento do funcionamento do MRVM é com o auxílio de ferramentas matemáticas de análise de elementos finitos pode-se afirmar que teremos um perfil trapezoidal para a indutância, com valores máximos e mínimos que dependeram de aspectos construtivos e elétricos da máquina em questão. A indutância é uma grandeza de difícil mensuração durante ensaios experimentais, todavia, com a descrição do comportamento do motor em softwares de simulação específicos, como o *MatLab*[®], podemos visualizar o comportamento desta grandeza.

Nas Figuras 7 e 8, a primeira em escala maior, estão demonstradas as formas de onda obtidas com relação a corrente de fase; a indutância e o chaveamento dos *mosfets*.

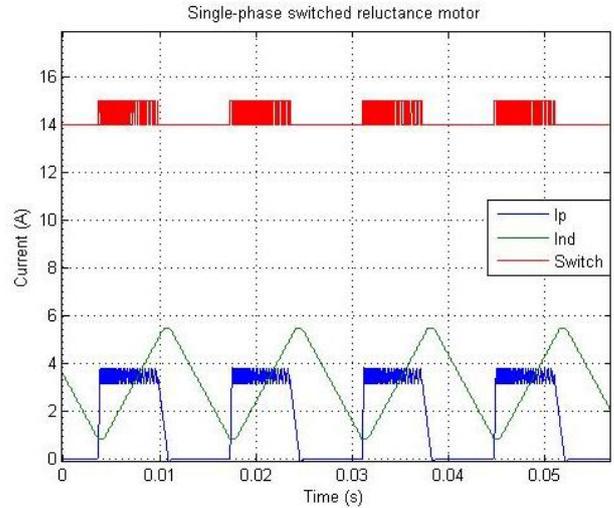


Fig. 7. Curvas da corrente de fase, indutância e chaveamento.

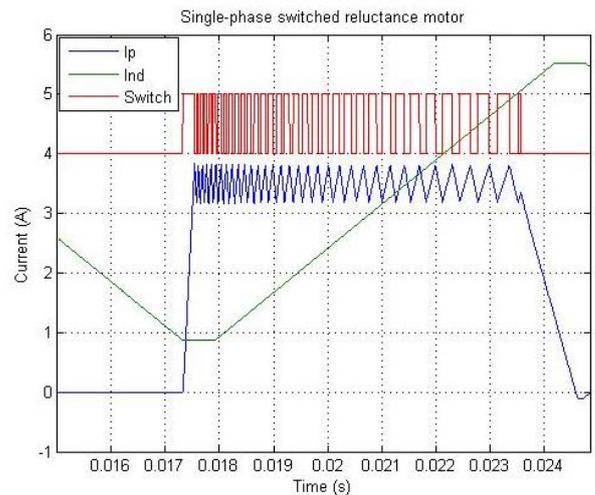


Fig. 8. Curvas da corrente de fase, indutância e chaveamento.

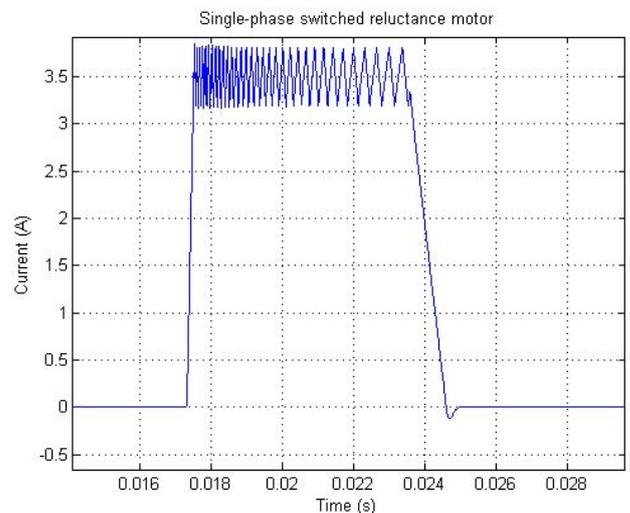


Fig. 9. Curva da corrente de fase.

A Figura 9 enfatiza o controle de corrente proporcionado pela técnica de acionamento aqui aplicada, comprovamos que enquanto as chaves estão fechadas temos um corrente em média com mínimo em 3,2 A e máximo em 3,8 A. Uma observação relevante faz-se necessária com relação à análise do gráfico ponto a ponto; alguns pontos podem estar fora da histerese implementada, o que é algo aceitável já que a simulação apresenta certo refinamento de acordo com o passo de integração utilizado.

III – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para que o resultado experimental fosse possível foi necessário que se implementasse uma técnica de acionamento do MRVM que contou com os seguintes elementos: sensor de efeito hall, sensor de posição, isoladores óticos, conversor estático e microcontrolador.

O sensor de efeito hall é um transdutor que varia sua tensão de saída em resposta a um campo magnético, e foi usado a fim de se mensurar a corrente no enrolamento do MRVM, possibilitando com o auxílio de um microcontrolador a elaboração de um controle de histerese para esta grandeza. Na Figura 10 temos o esquema eletrônico do sensor de efeito hall.

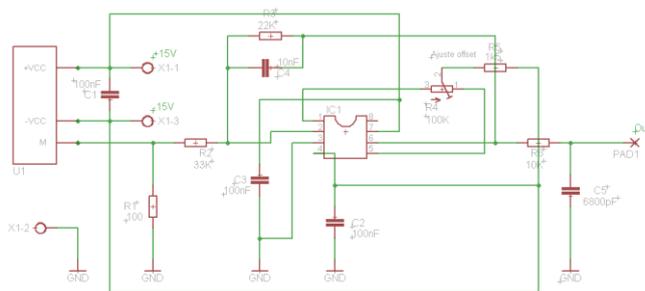


Fig. 10. - Esquema do circuito do sensor de efeito hall.

Um sistema de posicionamento utilizando sensor óptico e um disco ranhurado foi implementado. A Figura 12 mostra o disco utilizado e o sensor óptico.

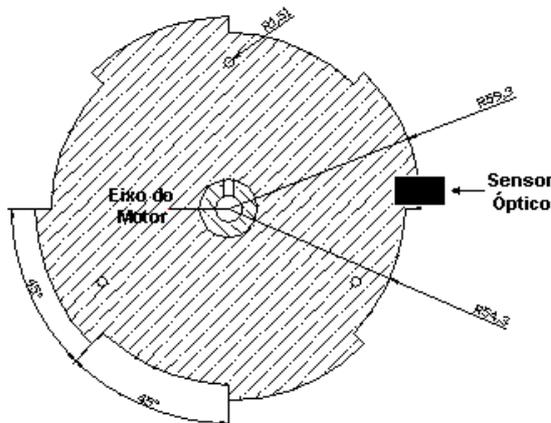


Fig. 11. Esquema de posicionamento do disco ranhurado e do sensor óptico.



Fig. 12. Posicionamento real do disco e do sensor óptico.

O disco auxiliar é fixado ao eixo do rotor e o sensor óptico é preso à carcaça do motor. A interação entre o sistema, disco e sensor oferece como resultado a indicação da posição, discreta, do rotor através de pulsos de tensão. Portanto, o disco e/ou o sensor podem ser posicionados para que determinada região do disco coincida exatamente com as regiões de ativação/desativação do enrolamento da fase do motor, variando de acordo com a lógica e o ângulo de acionamento escolhido.

A fim de implementar um desacoplamento entre sistemas de potência e de controle foi necessária a inserção de acopladores óticos no acionamento geral.

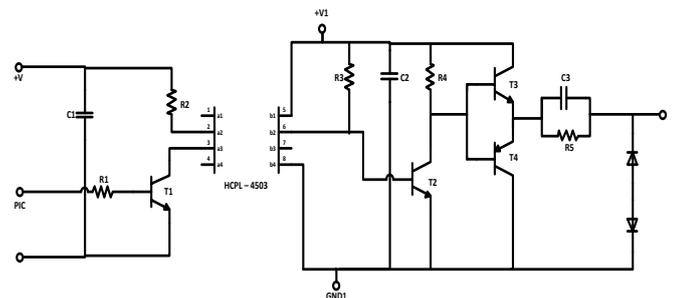


Fig. 13. Esquema do circuito isolador.

Além de isolar a parte de potência da parte de controle, o circuito mostrado na Figura 13 também fornece um ganho na tensão de entrada, pois, o máximo valor de tensão na saída do microcontrolador não é suficiente para acionar os *mosfets* utilizados como chaves no conversor estático, porém, após o sinal passar pelo circuito isolador a tensão recebe um ganho o qual possibilita o acionamento dos *mosfets*.

A topologia de conversor mais utilizada para acionar a máquina de relutância é a *half-bridge*, que se caracteriza por possuir duas chaves controladas em série com a fase da máquina e dois diodos, utilizados para desmagnetização da bobina da fase, após o período de magnetização da mesma. O conversor *half-bridge* pode ser visualizado na Figura 14.

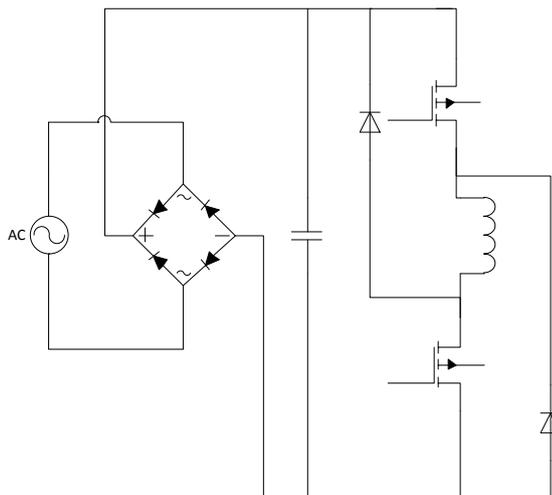


Fig. 14. Topologia do conversor *half-bridge*.

O microcontrolador escolhido foi o PIC16F877, da Microchip Technology, família 16F, com barramento de dados de 8 bits e com 40 pinos. Possui 368 x 8 bytes de memória RAM e 356 x 8 bytes de EEPROM, além de:

- 5 conjuntos de portas de entrada e saída (total de 33 portas);
- Conversor analógico-digital de 10 bits de resolução e 8 canais de entrada;
- Periférico de comunicação paralela e serial (USART e MSSP);
- 2 Módulos CCP (Comparação, Captura e PWM);
- 3 Timers (1 de 16 bits e 2 de 8 bits);
- Watchdog timer.

O princípio de funcionamento de uma máquina de relutância variável se baseia na tendência do rotor em se deslocar para uma posição onde a relutância é mínima a qual corresponde à posição onde a indutância da bobina excitada do estator é máxima [3]. A citação acima expressa uma das formas mais simples de se definir o funcionamento de um MRV e foi utilizada como ponto de partida para estabelecer o algoritmo de controle a ser implementado no microcontrolador PIC16F877. O software tem como objetivo analisar os dados de entrada que são a posição do rotor e a corrente na fase do motor, e a partir daí, impor o chaveamento ao conversor de potência.

A histerese de corrente foi definida tendo como valores de extremidade, 3,2A e 3,8A. Estes valores foram escolhidos levando em consideração a corrente nominal do motor que é de 4,0A. O nível de alinhamento do rotor em relação ao estator é dado pelo sensor de posição de rotor, o qual é finamente ajustado para indicar, de forma precisa, a posição do rotor. Convém ressaltar, que o conhecimento da posição do rotor é crucial para um bom desempenho do controlador. É a partir dela, que é definido o regime de trabalho da MRVM, se é como motor ou como gerador. Neste caso, o sensor de posição é conectado diretamente ao pino de interrupção externa do microcontrolador, e o controle toma as seguintes decisões: Caso os polos estejam alinhados, as chaves do conversor devem ser abertas, prioritariamente,

pois, com os polos alinhados o motor tende a operar com freio, travando o eixo, favorecendo um crescimento abrupto da corrente. Portanto, o controle deve receber dois parâmetros de entrada: um analógico, a corrente na fase do motor, e outro digital, que fornece a posição do rotor, indicando ao software, o momento da energização da fase pelo conversor. Os parâmetros de saída do controlador são os pulsos de acionamento das chaves do conversor de potência estático.

Analisando o comportamento do sistema do ponto de vista das chaves do conversor, teremos basicamente três situações:

1 - Ambas as chaves estão fechadas; neste caso, a corrente da fase cresce rapidamente, sendo que cabe ao controle manter a corrente dentro dos limites aceitáveis. O valor máximo da corrente é de 3,8A;

2 - Ambas as chaves estão abertas e a corrente flui através dos diodos, e dissipa-se rapidamente, uma vez que há a inversão da tensão na bobina do motor. Esta situação ocorre em dois momentos do acionamento: os polos do rotor e do estator estão alinhados; e/ou a corrente ultrapassou o valor máximo estipulado;

3 - Ambas as chaves são abertas e permanecem nesta condição por um longo intervalo de tempo, devido à atuação da proteção, ou ainda, por interferência do operador.

A Figura 15 nos fornece um comparativo entre a tensão de entrada e a tensão de saída no circuito isolador ilustrado na Figura 13.

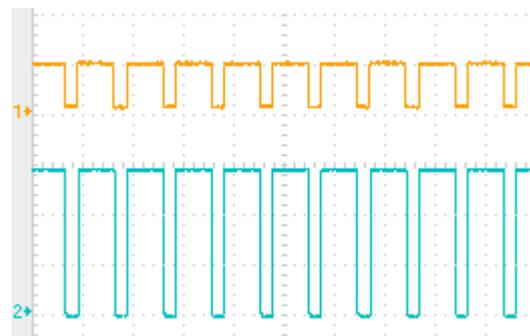


Fig. 15. Formas de onda na entrada e saída dos isoladores.

Na Figura 16 temos a representação das formas de onda nas chaves do conversor *half-bridge*, obtidas diretamente do osciloscópio. Nesta figura confirmamos que as duas chaves são acionadas simultaneamente, a fim de obter um controle sobre a corrente de fase.

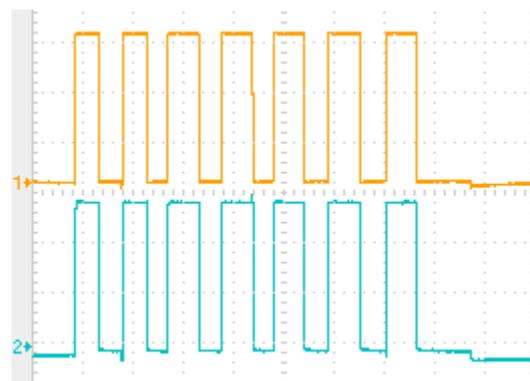


Fig. 16. Formas de onda nas chaves do conversor.

Nas Figuras 17 e 18 temos as formas de onda das duas chaves sobrepostas (canais 1 e 2), e também a representação da corrente de fase (canal 3) obtida diretamente da saída do sensor de efeito hall. Por meio desta análise experimental pode-se comprovar que o modelo de controle escolhido mostra-se bastante promissor e viável. Promissor devido ao fato de vir a tornar-se altamente eficiente, com a melhoria e aplicação dos dispositivos de controle adequados. Viável devido ao baixo custo de implementação e manutenção.

Apesar do controle de corrente não estar em perfeita sintonia com os resultados obtidos nas simulações, no que diz respeito à frequência de chaveamento, percebe-se que esta defasagem não exerce grande influência no resultado experimental, pois, temos uma resposta correta da grandeza corrente ao chaveamento.

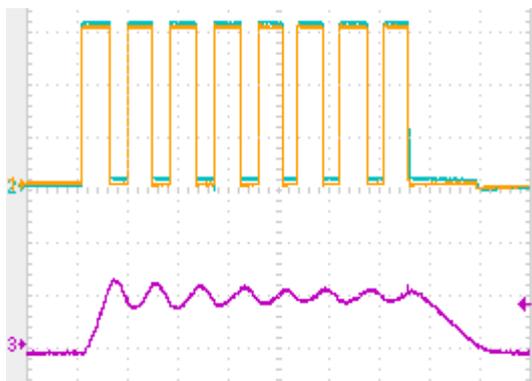


Fig. 17. Formas de onda nas chaves do conversor e na saída do sensor de efeito hall em uma escala de tempo de 1 ms.

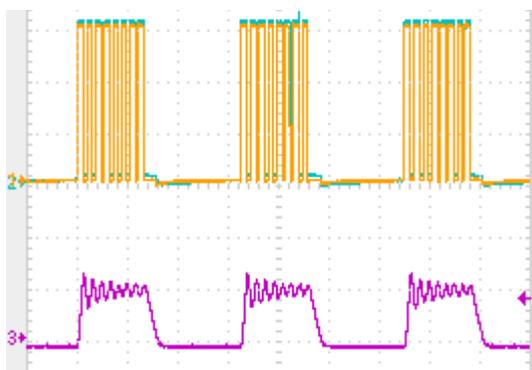


Fig. 18. Formas de onda nas chaves do conversor e na saída do sensor de efeito hall em uma escala de tempo de 5 ms.

IV – CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentadas a modelagem, a simulação e os circuitos de acionamento de um motor à relutância variável monofásico.

Pode-se perceber, pela simplicidade dos circuitos, a viabilidade técnica e financeira do projeto. Este motor foi utilizado para acionar uma carga centrífuga, tipo ventilador industrial, porém, algumas empresas já desenvolvem e oferecem comercialmente produtos como aspiradores de pó; máquinas de lavar roupas; máquinas de lavar louças; centrifugadores para laboratório; portas deslizantes; dentre outras que incorporam MRV's no acionamento.

Apesar de ser uma máquina flexível, robusta, confiável e de elevado rendimento deve-se estar atento a uma das

desvantagens dos MRVM's, que é sua forte dependência do sensor de posição; tornando-se uma desvantagem representativa ou não de acordo com a aplicação na qual se deseja utilizar o mesmo.

Quanto ao controle de corrente utilizado comprovamos sua eficiência, porém, o mesmo pode vir a ser modificado a fim de se adequar a aplicação desejada, isto é, a largura do controle de corrente pode ser reduzida ou ampliada com simples modificações nas variáveis específicas no software de controle.

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]D. A. Andrade, R.S. Costa, A. W. F. V Fleury, R. S. Teixeira. *Motor a relutância chaveado monofásico*. Laboratório de Acionamentos Elétricos, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, p.1-6.
- [2]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*, Vol. 15, No.1., 2010.
- [3]G. G. Sotelo, L. G. B. ROLIM, A. C. FERREIRA. *Uso de uma máquina de relutância variável para armazenamento energético: Uma aplicação para qualidade de energia*. XIV Congresso Brasileiro de Automática, 2002.
- [4]J. L. Domingos, D.A. Andrade; M. A. A Freitas, H. De Paula. *A new drive strategy for a linear switched reluctance motor*. *Electric Machines and Drives Conference*, 2003. IEMDC'03. IEEE, International Volume: 3, 1-4 June 2003 Pages: 1714 - 1719 vol.3.
- [5]J. M. L. Nacimento, L. G. B Rolim., P. Heidrich, W. I Suemitsu, R. Hanitsch. *Design and Simulation Aspects of a Switched Reluctance Drive*. *Third Brazilian Power Electronics Conference Proceeding*, pp. 79-83 - 1995
- [6] J. M Stephenson. *Single-Phase Switched Reluctance Motor Design*. *IEE Proc-Electr. Power Appl.*, vol. 147, No. 2 – 2000.
- [7]R. Krishnan. *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*. CRC press – 2001 – ISBN 0-8493-0838-0.
- [8]T.J.E. Miller. *Switched Reluctance Motors and Their Control*. Magma Pysics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1993.
- [9]R. S Costa. *Análise, projeto e construção do motor monofásico à relutância chaveado: Uma solução eficiente para cargas de potência fracionária*. 2004. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.
- [10]T. Higuchi, O. Fiedler, J. and W. De Doncker. *On the Design of a Single-Phase Switched Reluctance Motor*. *IEEE*, pp. 561-567. – 2003.