

# PROPOSTA DE PLATAFORMA PARA ESTUDO DE MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6

Marcos José de Moraes Filho, Luciano Coutinho Gomes, Darizon Alves de Andrade, Josemar Alves dos Santos Junior, Wanberton Gabriel de Souza, Cássio Alves de Oliveira  
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE)  
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil  
marcos.jmf@hotmail.com, lcgomes@ufu.br

**Resumo** - Neste artigo é apresentada a implementação de uma plataforma de acionamento e estudo para uma máquina a relutância variável 8/6, sendo acionada como motor. O sistema de acionamento tem como elemento principal um conversor half-bridge e o sistema de controle é fundamentado em microcontrolador, isoladores, transdutores de corrente, transdutores de tensão e encoder. A proposta é fazer com que todos os elementos citados anteriormente trabalhem de forma integrada a fim criar uma plataforma robusta, é que além do acionamento da máquina em questão propicie o estudo de diversas grandezas e aspectos da mesma, tal como o perfil de indutância, o perfil de conjugado, a potência, o efeito da sobreposição de fases, a imposição de conjugado, dentre outros.

**Palavras-Chave** - Acionamento, conversor, DSP, motor, máquina a relutância variável 8/6.

## PROPOSAL TO PLATFORM FOR STUDY OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR 8/6

**Abstract** - In this article the implementation of a drive platform and study for a switched reluctance machine 8/6, being operated as a motor is presented. The drive system has as its main element a half-bridge converter and the control system is based on microcontroller, insulators, current transducers, voltage transducers and encoder. The proposal is to make all the aforementioned elements work seamlessly to create a robust platform, is that in addition to drive the machine in question would encourage the study of various magnitudes and aspects of it, such as inductance profile, conjugate profile, the power, the effect of overlapping phases, the torque control, among others.

**Keywords** - Converter, drive, DSP, motor, switched reluctance machine 8/6.

## I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas devido ao grande avanço de diversas áreas da engenharia elétrica, tais como a eletrônica de potência, sistemas de controle, microcontroladores, sistemas de sensoriamento, dentre outras; muitas máquinas não convencionais vêm tornando-se cada vez mais acessíveis, e dentre estas máquinas temos a máquina a relutância variável (MRV).

A MRV têm sido foco de diversos trabalhos na área de máquinas e acionamentos elétricos, em suas diversas configurações, tais como 4/4 (quatro polos no estator e quatro polos no rotor), 6/4 (seis polos no estator e quatro polos no rotor), 6/6 (seis polos no estator e seis polos no rotor), 8/6 (oito polos no estator e seis polos no rotor), dentre outras configurações, sendo a mesma acionada tanto como motor quanto como gerador.

Do ponto de vista construtivo a máquina a relutância variável apresenta polos salientes tanto no rotor quanto no estator e enrolamento concentrado, característica que torna o efeito da indutância mútua desprezível ou inexistente para máquinas com uma pequena quantidade de polos, com reflexos positivos no acionamento e controle de operação da mesma [3]. Na Figura 1 temos o perfil da máquina utilizada neste trabalho.

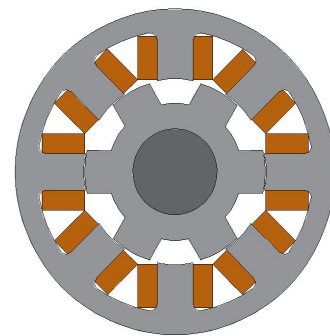


Fig. 1. Perfil transversal da máquina a relutância variável 8/6.

Os enrolamentos são formados por pares de bobinas concentradas que envolvem os polos do estator, diametralmente opostos, e podem ser ligadas em série ou paralelo. A escolha da ligação como série ou paralelo ocorrerá de acordo com os níveis de tensão e corrente desejados, ou de acordo os limites destas grandezas por fatores elétricos ou mecânicos da máquina em questão. Abaixo temos a representação dos dois tipos de ligação para as bobinas do estator.



XIV CEEL - ISSN 2178-8308  
03 a 07 de Outubro de 2016  
Universidade Federal de Uberlândia - UFU  
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

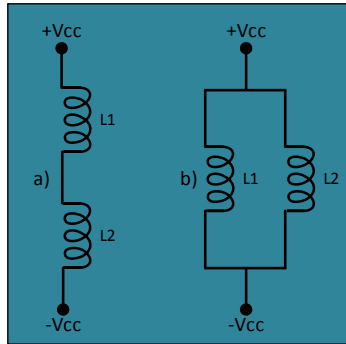


Fig. 2. a) Ligação série. b) Ligação paralelo.

O princípio de funcionamento da MRV baseia-se na variação da indutância, grandeza a qual é função da posição do rotor em relação ao estator e também da corrente no estator. Temos o perfil da indutância não saturada para esta máquina [4], conforme segue abaixo.

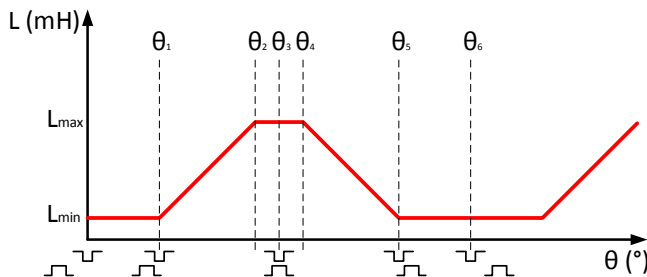


Fig. 3. Perfil de indutância para máquina a relutância variável não saturada.

Apesar da impossibilidade prática de termos o perfil de indutância ideal devido a saturação magnética da MRV, sabemos que a saturação causa uma curvatura no perfil de indutância próximo aos pontos de alinhamento dos polos do estator e do rotor ( $L_{max}$ ) e exerce uma influência negativa no torque da máquina [4]. Mas o perfil apresentado na Figura 3 nos traz pontos angulares que são de extrema importância na etapa de acionamento da máquina, pois, a partir dos mesmos podemos determinar os momentos de energização e desenergização de cada fase da MRV, tal que:

$\theta_1$  - Esta posição indica o ponto na qual inicia-se a sobreposição entre os polos do rotor e do estator, e também o ponto no qual deve-se iniciar a alimentação da fase, pois, no sistema apresentado propõe-se que a máquina seja acionada como motor.

$\theta_2$  - Este ponto indica a posição na qual o polo do rotor percorre toda a extensão do polo do estator, e ponto máximo na qual a fase deve ser desenergizada.

$\theta_3$  - Indica a posição na qual os polos do rotor e do estator estão completamente alinhados.

Os pontos  $\theta_4$ ,  $\theta_5$  e  $\theta_6$  não serão abordados devido a sua importância principalmente no acionamento da máquina como gerador, evento o qual não ocorre nesta etapa de nosso estudo. A partir deste perfil de indutância o sistema proposto deverá impor a energização de cada fase e o controle de corrente sobre a mesma a fim de obter o melhor aproveitamento da MVR 8/6 acionada como motor.

## II. MÁQUINA UTILIZADA NO PROJETO

A máquina utilizada neste projeto é uma máquina 8/6, a qual foi inteiramente desenvolvida dentro do laboratório que dá suporte ao estudo em questão, desde as etapas referentes ao estudo elétrico e magnético, passando pelas etapas de modelagem, simulações e definição de medidas e materiais a serem utilizados [1] em sua construção e findando na construção efetiva. Abaixo temos as fotos da máquina, de seu estator e de seu rotor, respectivamente.

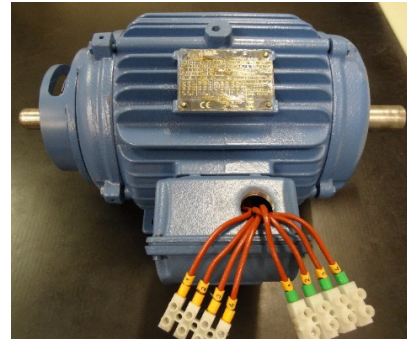


Fig. 4. Máquina utilizada no projeto.

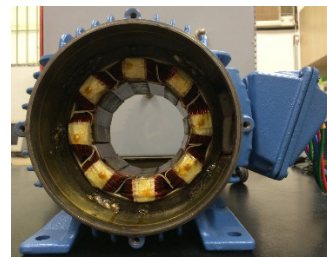


Fig. 5. Estator da máquina utilizada no projeto.

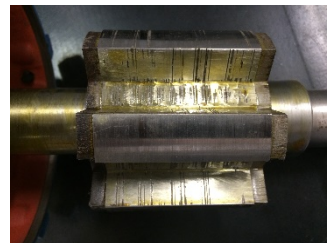


Fig. 6. Rotor da máquina utilizada no projeto.

A Figura 7 retrata a localização das grandezas de projeto apresentadas na Tabela I através de suas siglas.

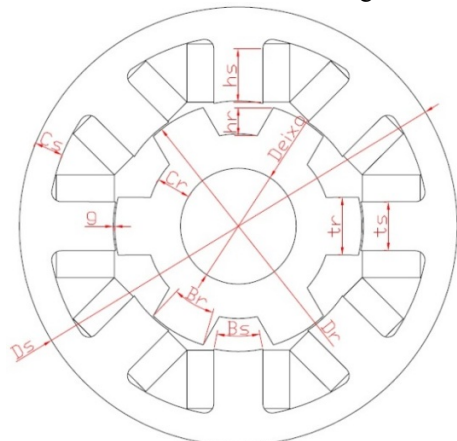


Fig. 7. Localização das grandezas de projeto.

A tabela abaixo reúne os principais parâmetros da máquina foco deste estudo:

Tabela I - Principais parâmetros da máquina foco deste estudo.

Parâmetro	Siglas	MRV
Quantidade de polos no estator	$N_s$	8 polos
Quantidade de polos no rotor	$N_r$	6 polos
Potência nominal	$P_n$	2,2 kW (3 cv)
Velocidade nominal	$\omega_n$	3500 rpm
Ângulo dos polos do rotor	$\beta_r$	24,5°
Ângulo dos polos do estator	$\beta_s$	22,5°
Diâmetro externo do estator	$D_s$	160 mm
Diâmetro do rotor	$D_r$	90,5 mm
Comprimento do entreferro	$g$	0,3 mm
Comprimento do rotor	$l$	63 mm
Largura dos polos do rotor	$t_r$	18,3 mm
Largura dos polos do estator	$t_s$	17,8 mm
Altura dos polos do rotor	$h_r$	15 mm
Altura dos polos do estator	$h_s$	22 mm
Culatra do rotor	$Y_r$	13 mm
Culatra do estator	$Y_s$	12,45 mm
Diâmetro do eixo	$D_{eixo}$	34,5 mm

### III. SIMULAÇÃO DINÂMICA DO MRV 8/6

Na etapa de projeto da máquina, na qual foram simulados o comportamento da máquina para diversos valores de correntes e posições, foram obtidas as curvas de indutância e fluxo; as quais foram utilizadas para iniciar uma simulação dinâmica através do software MATLAB/Simulink®.

A topologia de conversor escolhida para acionar a máquina a relutância é o half-bridge, que caracteriza-se por possuir duas chaves controladas em série com cada fase da máquina e dois diodos, utilizados para desmagnetização da bobina de cada fase, após o período de magnetização da mesma. O conversor half-bridge para a MRV 8/6 pode ser visualizado na Figura 8.

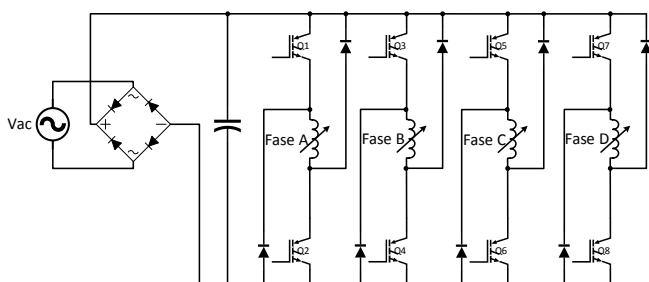


Fig. 8. Topologia do conversor half-bridge para a MRV 8/6.

A partir da definição do conversor que seria utilizado, [2], montou-se a simulação pautada no mesmo e o controle foi implementado tendo como principais elementos de controle o sensor de posição do rotor em relação ao estator e o controle de corrente por fase. A Figura 9 mostra o ambiente completo de simulação.

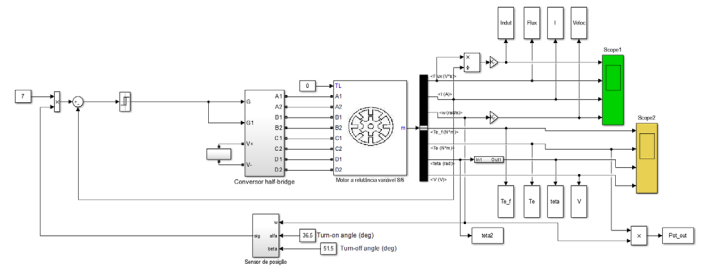


Fig. 9. Ambiente completo de simulação.

A estratégia de acionamento implementada consiste em acionar o MRV mantendo um controle sobre a corrente de cada fase e também sobre o alinhamento dos polos do estator com os polos do rotor para cada fase. No Simulink podemos dividir esta estratégia em 2 etapas básicas:

1 - Em uma primeira etapa é aplicada tensão positiva ao enrolamento do motor através do fechamento das duas chaves do conversor, referentes a fase sobre a qual se realiza o controle. As chaves são mantidas acionadas até que a corrente atinja o valor máximo previamente escolhido ou até que os polos do estator e do rotor estejam fora do intervalo permitido para o acionamento de cada fase.

2 - Quando a corrente alcança seu valor máximo ou o ângulo entre o rotor e o estator está fora do intervalo escolhido para a alimentação da fase em questão, 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.

O intervalo de histerese da corrente foi definido entre 6,5 e 7,5 A, tendo como set point 7 A. O ângulo de condução para cada fase foi estabelecido de 36,5° até 51,5°; valores os quais são obtidos respeitando-se [2,4] e ajustados ao sistema de referências do MATLAB®. A partir dessas definições temos alguns gráficos de grandezas importantes na MRV 8/6 acionada como motor.

A Figura 10 ilustra o perfil de indutância da MRV 8/6 e o controle de corrente atuando sobre a mesma, e devido à imposição do controle não teremos sobreposição de fases neste acionamento.

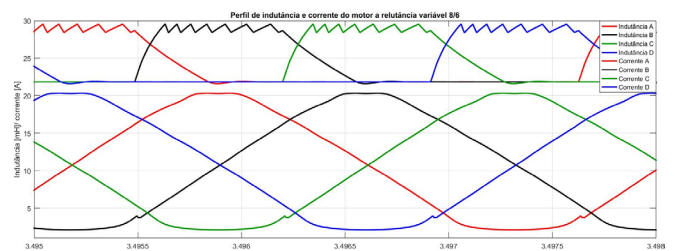


Fig. 10. Perfil da indutância e corrente no estator da MRV 8/6.

Abaixo temos os gráficos que ilustram o comportamento do fluxo da máquina foco deste trabalho e também o comportamento do conjugado eletromecânico, respectivamente.

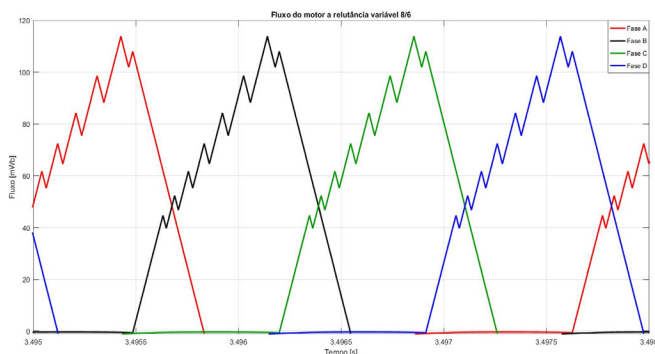


Fig. 11. Perfil do fluxo do motor a relutância variável 8/6.

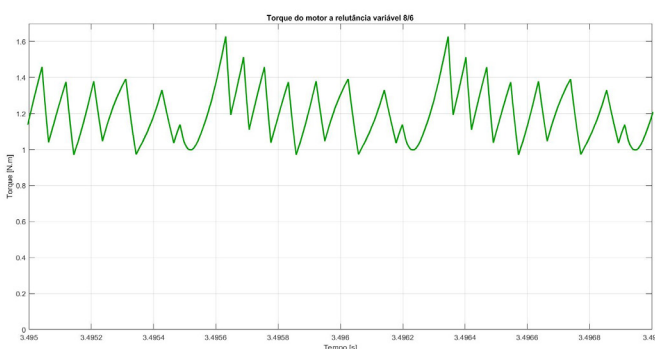


Fig. 12. Perfil do torque do motor a relutância variável 8/6.

Na Figura 13 temos o comportamento da velocidade da MRV 8/6, desde sua partida até que a mesma atinja sua velocidade nominal, 3500 rpm.

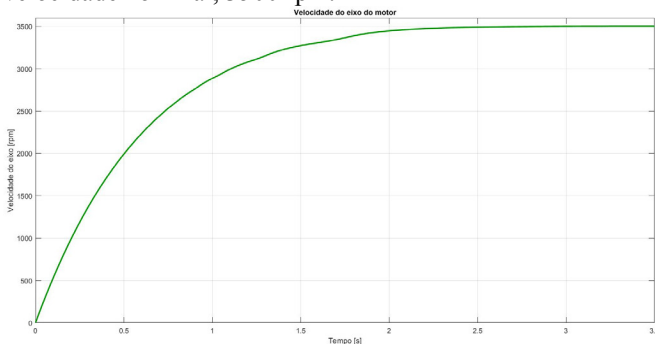


Fig. 13. Comportamento da velocidade do motor a relutância variável 8/6.

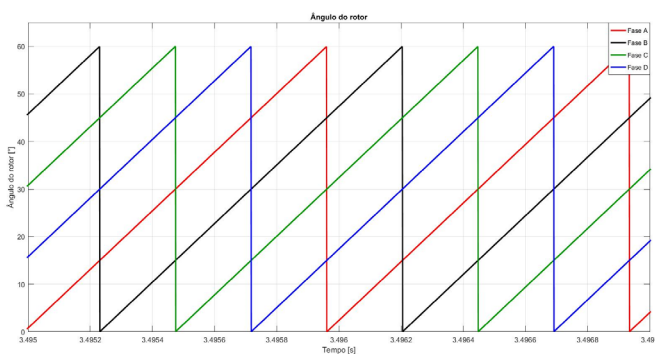


Fig. 14. Comportamento do ângulo do polo do rotor no motor a relutância variável 8/6.

Na Figura 14 temos o gráfico que expressa o comportamento do ângulo do rotor em relação a cada fase, pois, para a máquina 8/6 temos que a cada 60° mecânicos o perfil de indutância da referida fase se repete.

#### IV. MONTAGEM DE PLATAFORMA

Na etapa de montagem experimental trabalhamos com 6 circuitos principais, os quais em conjunto permitem o acionamento e controle da MRV 8/6, tal que:

1 - Conversor half-bridge e isoladores: O conversor half-bridge foi construído através de chaves do tipo insulated-gate bipolar transistor (IGBT), adquiridas da empresa Fuji Electric, modelo 6MBI100S-060, tendo as ligações entre seus terminais alteradas de modo que tivéssemos um conversor com quatro braços [3]. A fim de implementar um desacoplamento elétrico entre sistemas de potência e de controle foi inserido um circuito de acopladores óticos para cada chave. Além de isolar a parte de potência da parte de controle, o circuito isolador tem a função de elevar a tensão de sua entrada de 3,3 V para 15 V em sua saída, pois, o 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. O layout final da placa que aloja o conjunto de chaves que exerce a função do conversor e os circuitos isoladores pode ser visualizada na Figura 15.

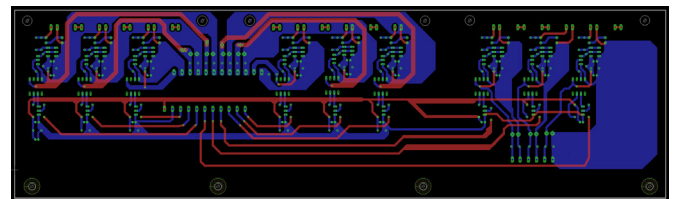


Fig. 15. Layout da placa de potência.

2 - Fontes de alimentação: Como o circuito isolador necessita de fontes com referências de terras distintas, deveremos ter uma fonte de alimentação para cada circuito isolador. A Figura 16 mostra o layout da placa das fontes dos isoladores.

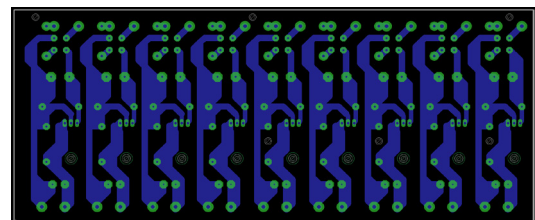


Fig. 16. Layout da placa das fontes dos isoladores.

3 - Microcontrolador: O microcontrolador utilizado neste projeto é o DSC TMS320F28335, ilustrado na Figura 17, o qual é um microcontrolador da Texas Instruments® e pertence a um grupo específico de dispositivos de processamento digital chamado Digital Signal Controller (DSC). É um chip que combina o processamento de um processador digital de sinais a periféricos embarcados de um microcontrolador. Devido seu enorme potencial, velocidade

de processamento, versatilidade para trabalhar com operações matemáticas complexas e a necessidade de se controlar o sistema em tempo real, um DSC é o dispositivo indicado para a aplicação abordada.

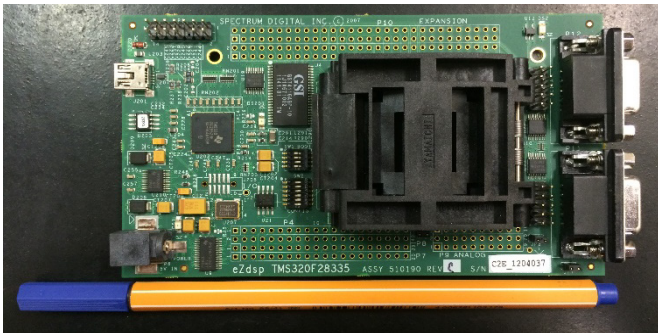


Fig. 17. DSC TMS320F28335.

4 - Transdutores de tensão e corrente: A fim de efetuar o controle e acionamento da MRV precisamos efetuar as medidas de alguns parâmetros da mesma, os quais são adquiridos pela placa ilustrada na Figura 18, que conta com transdutores de corrente e tensão, filtros, além de um sistema que adequa seu sinal de saída a patamares que podem ser trabalhados pelo microcontrolador utilizado no projeto. O projeto desta placa foi desenvolvido por professores do Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP), Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

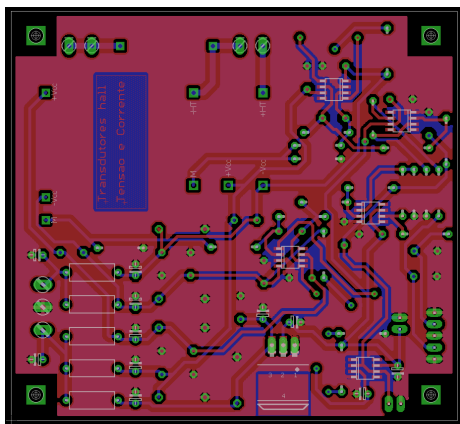


Fig. 18. Layout da placa dos transdutores de corrente e tensão.

5 - Adaptadores de níveis de tensão: Alguns elementos presentes na plataforma proposta podem não ter sinais dentro de níveis (do ponto de vista de amplitude) aceitáveis pelo DSP utilizado, e a função desta placa é fazer a adaptação de sinais digitais de forma que possam ser utilizados como entradas no DSP. Um exemplo de aplicação da placa de adaptação de níveis de tensão é a saída do encoder, que apresenta níveis de tensão de 0 e 15 V, sendo os mesmos adaptados para níveis de 0 e 3,3 V, respectivamente. Assim como a placa dos transdutores de tensão e corrente, esta também teve seu projeto desenvolvido pelos professores do Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP), Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

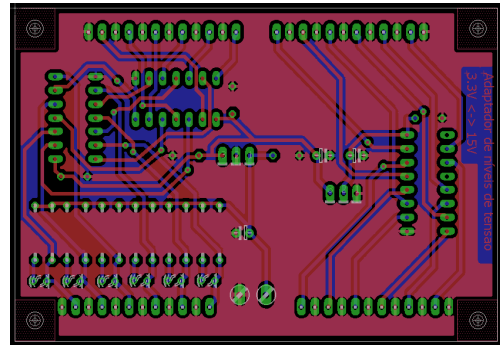


Fig. 19. Layout da placa para adaptação de níveis de tensão.

6 - Encoder absoluto: A função deste elemento é fornecer de forma precisa a posição de rotor em relação ao estator, para que, a partir desta informação possamos identificar o momento correto de acionar cada fase da máquina. O encoder utilizado neste projeto necessariamente deve ser do tipo absoluto, pois, neste tipo de encoder a posição é dada pela leitura de um código único para cada posição, condição indispensável para o correto acionamento da MRV. O encoder utilizado apresenta uma resolução de 0,35° mecânicos e é mostrado na Figura 20.



Fig. 20. Encoder utilizado na plataforma proposta.

Após definidos os principais elementos que iriam compor a plataforma os mesmos foram divididos basicamente em dois subsistemas, tal que o primeiro mostrado na Figura 21 suporta um transformador com 9 saídas isoladas para alimentar as fontes dos isoladores, a placa com as fontes dos isoladores, a placa com os circuitos isoladores e ligações dos módulos IGBTs, os módulos IGBTs e o sistema de retificação de fornecerá a tensão contínua necessária ao funcionamento da MRV 8/6. O segundo subsistema é mostrado na Figura 22, e é composto pelas placas de transdutores, placas de adaptadores de níveis de tensão, pelo DSP e pela fonte que irá alimentar todas esses circuitos, além do encoder, o qual estará acoplado ao eixo da máquina.

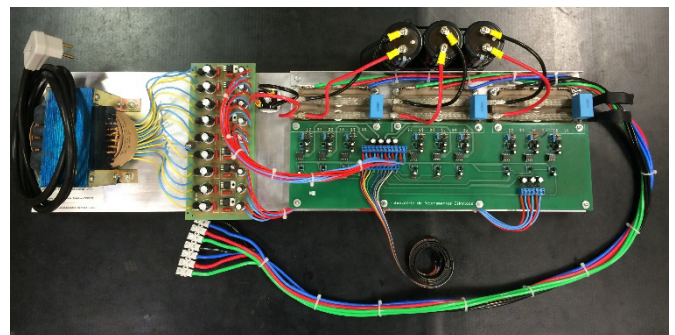


Fig. 21. Montagem final do sistema de potência.

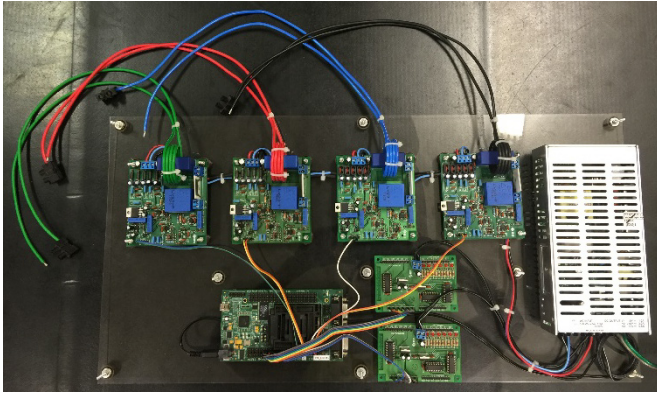


Fig. 22. Montagem final do sistema transdutores, placas de adaptação de níveis de tensão e microcontrolador.

## V. CONCLUSÕES

A MRV mostra-se como uma máquina com potencial a contribuir com as fontes motrizes atualmente utilizadas, focando principalmente no aspecto que tange a controle de conjugado e eficiência energética.

A partir deste projeto temos estímulos a fim de continuar este estudo no âmbito experimental, abordando em quais situações e sobre quais máquinas a MRV 8/6 apresenta pontos positivos, negativos e possíveis adaptações ou melhorias, as quais podem ser implementadas a fim de extrair todo o potencial desta máquina.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAPEMIG e ao CNPq pelo apoio financeiro, e à Universidade Federal de Uberlândia pela infraestrutura disponibilizada.

## REFERÊNCIAS

- [1] R. B. Bianchi, D. A. Andrade. “Projeto, Modelagem e Levantamento de Curva de Indutância de Máquina a Relutância Variável 8x6 Utilizando Elementos Finitos”, *XI CBQEE*, 2015.
- [2] T.J.E. Miller. *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*, Newnes, 1ª edição, Oxford, 2001.
- [3] M.J. Moraes Filho, L.C. Gomes, D. A. Andrade, A. W. F. V. Silveira. “Estudo e implementação de um sistema de acionamento para motor a relutância variável 8/6”. *XII CEEL*, 2014.
- [4] R. Krishnan. *Switched Reluctance Motor Drives - Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*, CRC Press LLC, 1ª edição, 2001.
- [5] P. Vijayraghavan, “Design of Switched Reluctance Motors and Development of a Universal Controller for Switched Reluctance and Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives”, dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in electrical engineering, 2001.
- [6] T.J.E. Miller. *Switched Reluctance Motors and Their Control*. Magma Pysics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1993.
- [7] V.R. Bernardeli. *Estudo sobre o comportamento do gerador a relutância variável operando no modo autoexcitado*. 2014. Tese (doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.