



## SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO ACIONAMENTO DE PROTÓTIPO DE MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6

Marcos José de Moraes Filho\*<sup>1</sup>, Luciano Coutinho Gomes<sup>1</sup>, Augusto Wohlgenuth Fleury Veloso da Silveira<sup>1</sup>, Josemar Alves dos Santos Junior<sup>1,2</sup>, Wanberton Gabriel de Souza<sup>1</sup>, Cássio Alves de Oliveira<sup>1</sup>, Gustavo de Oliveira Machado<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FEELT - Universidade Federal de Uberlândia

<sup>2</sup>NuPSE Itumbiara - Instituto Federal de Goiás

**Resumo** - Este trabalho apresenta a etapa de simulação computacional do acionamento de uma máquina a relutância variável 8/6, acionada como motor. A simulação computacional é uma etapa de grande valia ao longo do trabalho científico, visto que a partir desta obtém-se um direcionamento quantitativo das grandezas abordadas, resguardando recursos financeiros e a segurança das pessoas, permitindo ainda que durante esta etapa questões possam ser levantadas e modificações propostas. O foco ao longo deste trabalho serão as grandezas elétricas e magnéticas pertinentes a máquina a relutância variável, e será tomada a topologia meia-ponte assimétrica como conversor a ser utilizado.

**Palavras-Chave** - Acionamento, conversor meia-ponte assimétrico, máquina a relutância variável, projeto, simulação.

### DRIVE SIMULATION OF A 8/6 SWITCHED RELUCTANCE MOTOR PROTOTYPE

**Abstract** - This work presents the computational simulation of the drive of a 8/6 switched reluctance machine, driven as a motor. Computational simulation is a valuable step throughout the scientific work, since from this we obtain a quantitative orientation of the magnitudes studied, safeguard fund and the security of the people, also allowing that during this stage questions can be doing and modifications can be suggested. The full focus of this work will be the electrical and magnetic magnitudes pertinent to the switched reluctance machine, and will be taken the asymmetric half-bridge topology as converter to be used.

**Keywords** - Design, drive, asymmetric half-bridge converter topology, simulation, switched reluctance machine.

### I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas devido ao grande avanço de diversas áreas da engenharia elétrica, tais como a eletrônica de

potência, microcontroladores, sistemas de sensoriamento, dentre outras; muitas máquinas não convencionais vêm tornando-se objetos de estudos, e dentre estas máquinas tem-se a máquina a relutância variável (MaRV), seja acionada como motor (MRV) ou como gerador (GRV).

Apesar de apresentar algumas limitações, a máquina a relutância variável mostra-se capaz de competir com máquinas convencionais em aplicações que demandem velocidades variáveis, pois, para tais situações o conversor não é um fator diferencial. Dentre as principais características das MaRVs tem-se:

- Robustez, permitindo trabalho em ambientes sujeitos a altas temperaturas e vibrações;
- Tolerância à falta de fases em motores polifásicos, visto que as fases são controladas de modo independente;
- Construção simples, com enrolamentos concentrados nos polos e rotor laminado;
- Redução de perdas ôhmicas no rotor, visto à inexistência de enrolamentos no mesmo;
- Alimentação a partir de uma fonte de corrente contínua, apresentando impacto positivo na implementação do conversor para seu acionamento;
- Elevado conjugado de partida;
- Alta relação conjugado/volume; característica que gera impactos financeiros visto à redução do material em sua produção.

A partir das características acima listadas, a MaRV vem destacando-se em diversos estudos científicos e aplicações industriais.

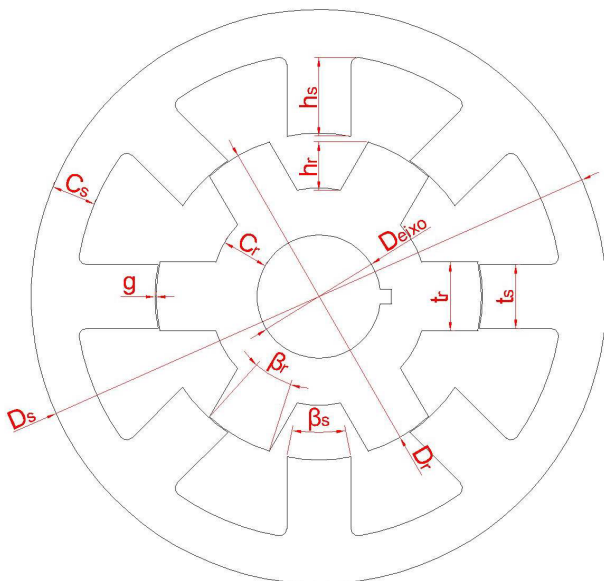
### II. PROTÓTIPO DO MRV

O protótipo utilizado como foco neste trabalho, a fim de possibilitar a conexão entre simulação computacional e implementação experimental, é uma máquina 8/6 com potência nominal de 2,2 kW (3 cv) e corrente nominal de 10 A; a qual teve seu projeto desenvolvido dentro do laboratório que dá suporte ao projeto, desde as etapas referentes à definição das medidas e dos materiais, a modelagem, o estudo elétrico e magnético, simulações, findando em sua construção efetiva.

\*marcos.jmf@hotmail.com

A Figura 1 retrata a localização das principais grandezas de projeto apresentadas na Tabela 1, através de suas siglas.

Figura 1: Localização das grandezas de projeto.



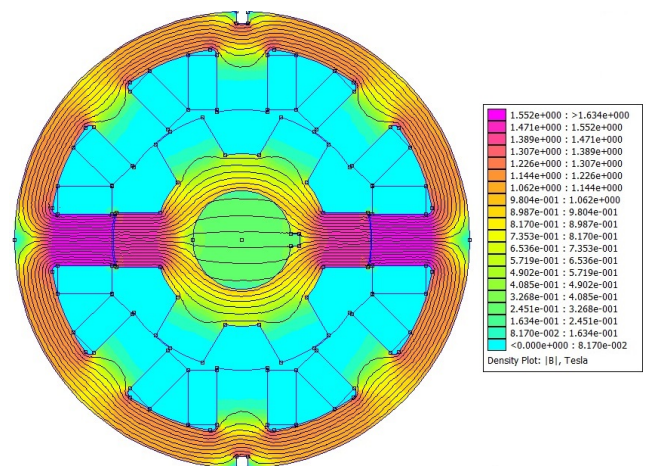
As principais dimensões do MRV 8/6 projetado seguem na tabela abaixo.

Tabela 1 - Principais parâmetros da máquina foco deste estudo.

| Parâmetro                      | Símbolo    | Valor         |
|--------------------------------|------------|---------------|
| 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) |
| Ângulo dos polos do rotor      | $\beta_r$  | 24,5°         |
| Ângulo dos polos do estator    | $\beta_s$  | 22,5°         |
| Diâmetro externo do rotor      | $D_r$      | 90,5 mm       |
| Diâmetro externo do estator    | $D_s$      | 160 mm        |
| Comprimento do entreferro      | $g$        | 0,3 mm        |
| Comprimento do rotor           | $l$        | 63 mm         |
| Largura dos polos do rotor     | $t_r$      | 19,2 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               | $C_r$      | 13 mm         |
| Culatra do estator             | $C_s$      | 12,45 mm      |
| Diâmetro do eixo               | $D_{eixo}$ | 34,5 mm       |

A partir das medidas expostas na Tabela 1 a máquina foi desenhada no AutoCAD® e o esboço foi exportado para o software FEMM, Figura 2, onde iniciou-se a análise magnética e elétrica por meio de elementos finitos, utilizando o método de triangulação. Nesta etapa, o funcionamento da máquina foi simulado para diversos valores de correntes e posições do rotor.

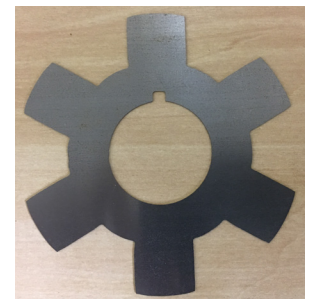
Figura 2: Densidade de fluxo magnético do MRV 8/6.



As Figuras 3 e 4 retratam as lâminas do estator e do rotor, respectivamente, após efetuado o corte das mesmas.

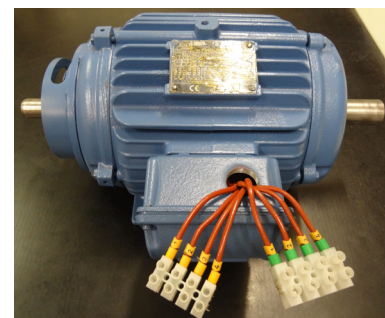
Figura 3: Corte das lâminas do estator.

Figura 4: Corte das lâminas do rotor.



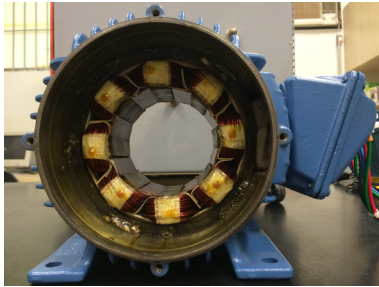
A Figura 5 retrata a montagem final da máquina, a qual após projetada foi adaptada a fim de se utilizar a carcaça de um motor de indução trifásico, fornecedora WEG, modelo W22, 3 cv, 6 polos, modelo de carcaça 100 L e forma construtiva B3D (montagem na posição horizontal, motor com pés, eixo à direita olhando para a caixa de ligação).

Figura 5: Protótipo do MRV 8/6.



Na Figura 6 mantém-se o foco no estator da máquina, e observa-se uma característica muito marcante nas MaRVs que são seus polos salientes. No estudo proposto tem-se uma máquina com 8 polos no estator, de forma que os polos simétricos estão conectados em série, exigindo um acionamento tetrafásico.

Figura 6: Estator do protótipo.



Na Figura 7 tem-se a ênfase no rotor da máquina projetada, o qual é construído com lâminas prensadas de forma que se tenham 6 polos. Na Figura 8 tem-se a relação entre os polos do estator e rotor, para a configuração 8/6 os polos do estator estão deslocados  $45^\circ$  mecânicos entre si, e os polos do rotor estão deslocados  $60^\circ$  mecânicos entre si.

Figura 7: Rotor do protótipo.

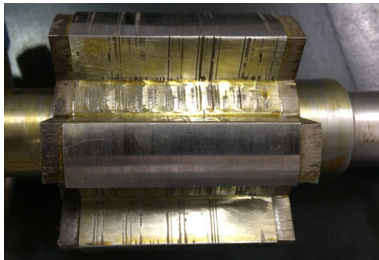


Figura 8: Relação entre os polos do estator e do rotor no protótipo.



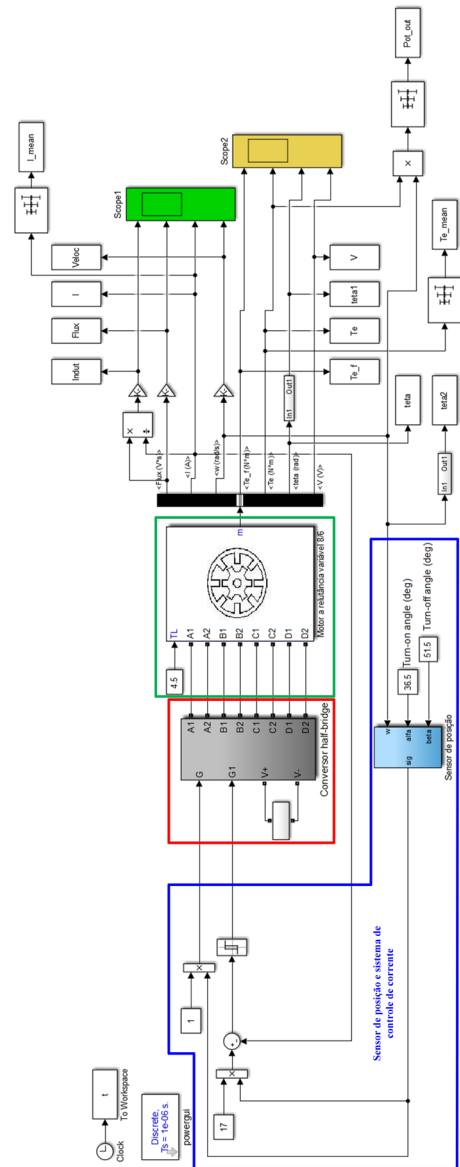
Todas as etapas de projeto desta máquina, inclusive as deduções matemáticas para se definir as medidas de todos os elementos da mesma são minuciosamente abordadas nas referências [1] e [4].

### III. SIMULAÇÃO DO ACIONAMENTO DO MRV

A etapa da simulação norteará o acionamento da máquina estudada a fim de possibilitar a análise do comportamento e amplitude de algumas grandezas, tais como: fluxo magnético, indutância, corrente por fase, conjugado por fase e velocidade angular do rotor. Na Figura 9 é mostrado o modelo completo utilizado na simulação, o qual é composto por vários subsistemas, tal que os principais são:

- Motor a relutância variável 8/6;
- Conversor meia ponte assimétrico;
- Sistema de determinação de posição e sistema de controle de corrente.

Figura 9: Diagrama de blocos no Simulink®.



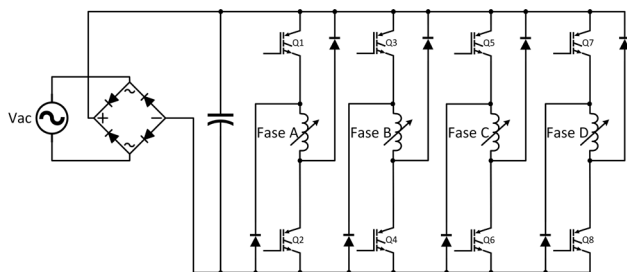
Foi definida a utilização do modelo computacional de máquina a relutância variável presente no Simulink®, o qual é uma ferramenta de modelagem e simulação de sistemas baseado em diagramação gráfica por blocos do software MATLAB®. Tal modelo é pautado em referências consolidadas [2] e [3], e vem sendo testado e validado em diversos trabalhos envolvendo esta máquina nos últimos anos. Contudo, ao longo da simulação do comportamento do protótipo foram implementadas algumas modificações no modelo padrão da máquina disponível, a fim de obter uma maior quantidade de parâmetros, e também foram utilizados os dados específicos da máquina projetada.

Na etapa de simulação foi escolhida a topologia do conversor que seria utilizado no acionamento, elemento fundamental e que impõe grande impacto no comportamento da máquina. A topologia de conversor escolhida foi a meia-ponte assimétrica, Figura 10, 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. Como a máquina em questão é tetrafásica, o conversor será composto por 4 braços, um para cada fase.

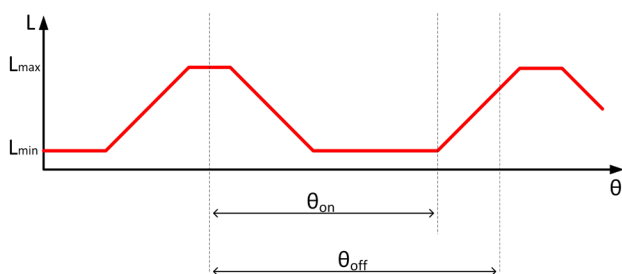
Figura 10: Topologia do conversor meia-ponete assimétrico para o MRV 8/6.



Um elemento indispensável ao acionamento da MaRV, seja como motor ou gerador, é um sistema que forneça o posicionamento absoluto do rotor em relação ao estator, não necessariamente sendo um sensor. Na etapa de simulação utiliza-se uma lógica que fornece o posicionamento entre estator e rotor a partir da velocidade angular do rotor.

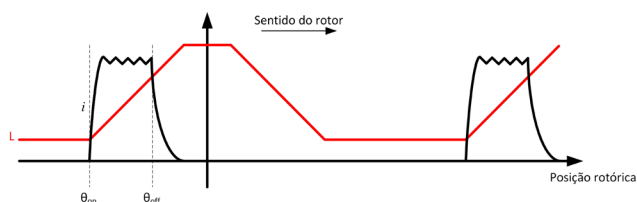
O valor do ângulo de condução é estabelecido a partir da diferença entre a posição na qual a fase é desenergizada ( $\theta_{off}$ ) e a posição na qual a fase é energizada ( $\theta_{on}$ ); e os valores destes ângulos são definidos a partir de um sistema de referência específico do modelo de MaRV utilizado pelo Simulink®, tal como mostrado na Figura 11.

Figura 11: Referência específica do modelo de MaRV do Simulink®.



A Figura 12 ilustra o comportamento esperado da corrente por fase, para o controle do tipo histerese, tendo como referência o perfil de indutância para esta mesma fase. Nesta figura observa-se claramente os momentos: de magnetização da fase, atuação do controle e desmagnetização da fase.

Figura 12: Relação entre perfil de indutância e corrente (controle tipo histerese de corrente).



Com base na Figura 12 observa-se que o ângulo de condução não é definido durante todo o intervalo angular no

qual tem-se perfil crescente de indutância para a fase, pois, após a abertura das chaves controladas a corrente leva algum tempo para atingir valores próximos de zero. Caso a fase não seja desmagnetizada antes do alinhamento total entre os polos, será gerado conjugado negativo pela mesma.

A partir do modelo acima exposto iniciou-se a simulação para máquina a relutância operando como motor, impondo uma carga fixa de 5,5 N.m em seu eixo, e uma histerese de corrente entre 20 e 22 A. A tensão de alimentação do sistema foi gerada a partir da retificação de uma fonte trifásica com valor de 220 V de linha, e o ângulo de condução de cada fase foi de 15°, tomado a partir do momento de sobreposição dos polos do estator e do rotor de cada fase; o que garante que não estaremos trabalhando com fases sobrepostas. O tempo de simulação foi de 5 s, a fim de garantir que a máquina atingiu regime permanente, e os gráficos foram tomados entre o intervalo de 4,99 e 5 s.

Nas Figuras 13 e 14 tem-se respectivamente, as curvas de indutância e fluxo para as quatro fases da máquina, e em ambos os gráficos observa-se que as curvas apresentam aspecto diferente com relação ao perfil ideal, pois, nos trechos em que o controle de corrente atual tanto a indutância quanto o fluxo sofrem distorções, o que é esperado, visto que ambas as grandezas são dependentes da corrente.

Figura 13: Curvas de indutância nas quatro fases do MRV 8/6.

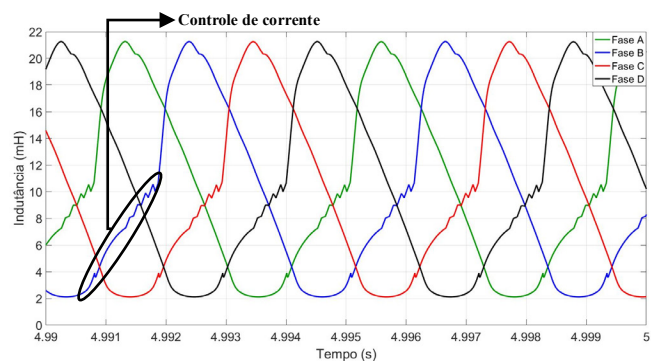
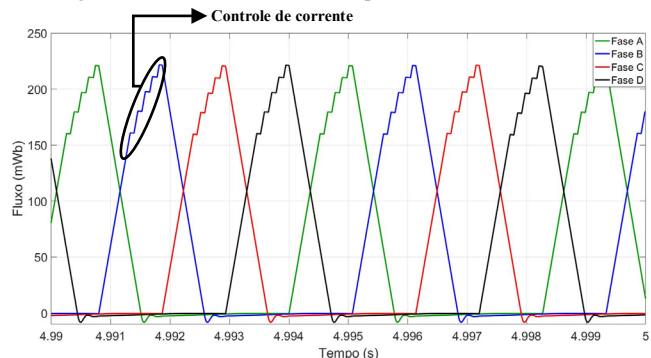
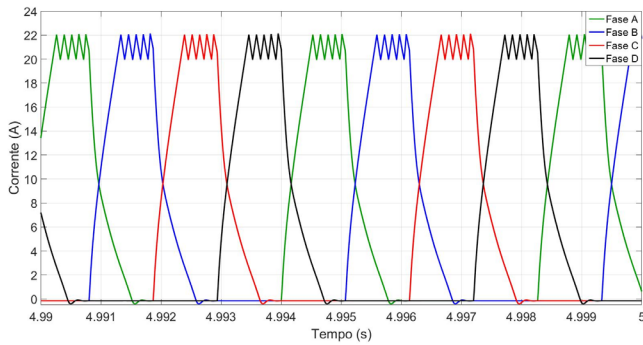


Figura 14: Curvas de fluxo nas quatro fases do MRV 8/6.



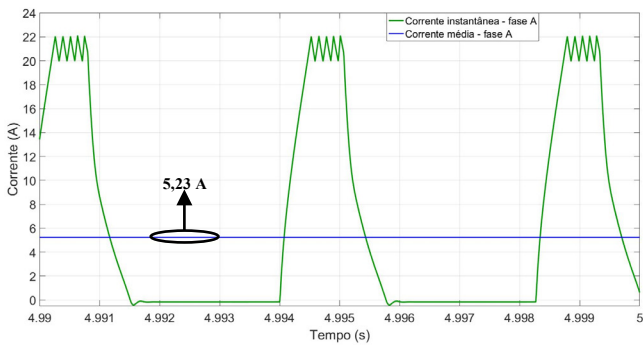
A Figura 15 traz as correntes em cada uma das fases, e nota-se que no momento em que a corrente na fase A começa a decrescer, indicando que o intervalo de condução desta fase chegou ao fim, a corrente na fase B inicia um comportamento crescente, e este mesmo processo se repete sequencialmente e ciclicamente, de forma que sempre haverá uma fase conduzindo. Evidencia-se o controle da corrente de forma a manter os valores dentro da faixa de 20 a 22 A, quando estiver no intervalo de condução da respectiva fase.

Figura 15: Curvas das correntes nas quatro fases do MRV 8/6.



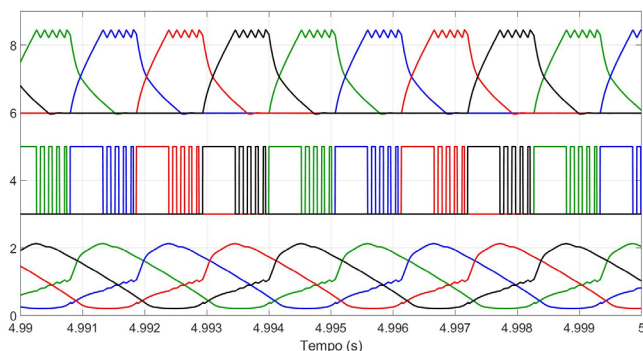
A Figura 16 enfatiza a corrente instantânea e média da fase A, tendo que a relação entre a corrente média e a corrente de pico é de aproximadamente 0,2377, ou seja, apesar dos altos picos de corrente o valor médio é em torno de 23,77% deste valor. Este valor percentual é de extrema importância na etapa de implementação experimental, visto que os condutores, conectores, chaves controladas, dentre outros elementos também serão dimensionados levando em consideração a corrente média, e não somente a corrente de pico.

Figura 16: Curvas da corrente instantânea e média na fase A.



A Figura 17 ilustra em um mesmo gráfico o comportamento da indutância, dos pulsos dos gatilhos das chaves e da corrente nas quatro fases da máquina, efetuando-se alguns ajustes de escalas. Para operação da MaRV como motor as chaves do conversor devem ser acionadas na região de crescimento da indutância.

Figura 17: Indutâncias, gatilhos nas chaves controladas e correntes nas quatro fases do MRV 8/6.

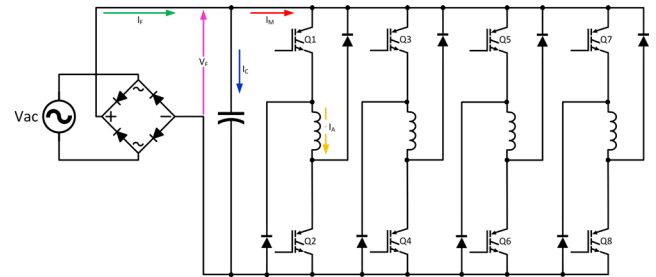


Observando-se uma fase específica, Figura 17, nota-se o reflexo do chaveamento na corrente e na indutância desta, de forma que no momento em que a fase entra em sua região de condução as chaves são mantidas fechadas por um intervalo

de tempo maior, pois, a corrente parte de um valor 0 e o controle de histerese somente começa a atuar quando a mesma atinge o limite superior definido.

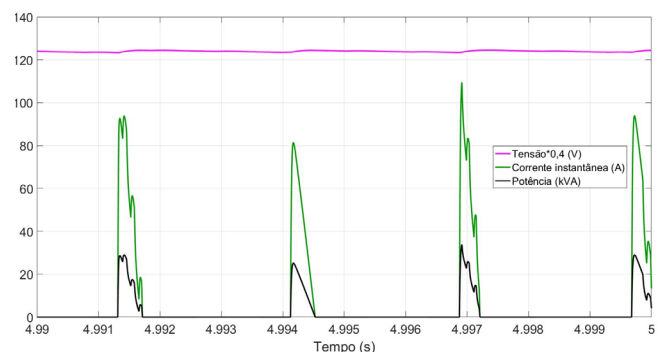
A Figura 18 ilustra a localização e sentidos das grandezas expostas nas Figuras 19 e 20, pois, mesmo que a saída do retificador trifásico, o banco de capacitores e o conversor meia-ponte assimétrico permaneçam conectados em um mesmo ponto, têm-se perfis de correntes específicos para cada elemento.

Figura 18: Localização e sentidos das grandezas expostas nas figuras 19 e 20.



A Figura 19 ilustra a relação entre corrente, tensão e potência instantâneas fornecidas na saída da etapa de retificação, e observa-se que a tensão é essencialmente contínua, enquanto a corrente apresenta altos picos em intervalos de tempo médio de 2,5 ms. O comportamento da corrente fornecida pelo retificador é resultado da interação entre o banco de capacitores e o enrolamento estatórico do MRV 8/6. Como a potência instantânea é obtida pelo produto direto entre tensão e corrente, a mesma apresenta aspecto semelhante ao observado na corrente de saída do retificador, ou seja, picos elevados em intervalos de tempo aproximadamente regulares.

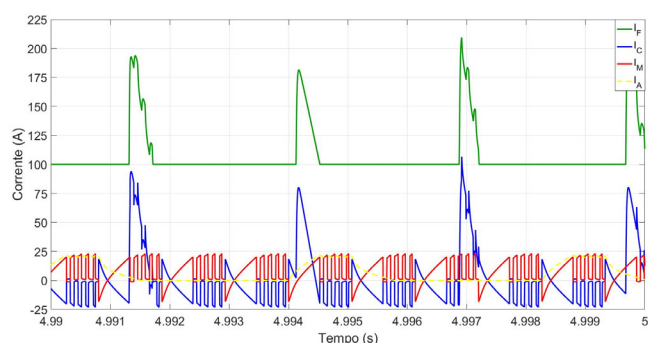
Figura 19: Curvas da corrente instantânea, tensão e potência instantânea na saída do retificador.



A Figura 20 destaca a relação entre as correntes em alguns pontos específicos do acionamento, de forma que observa-se o comportamento das mesmas de acordo com as expectativas, tal que:

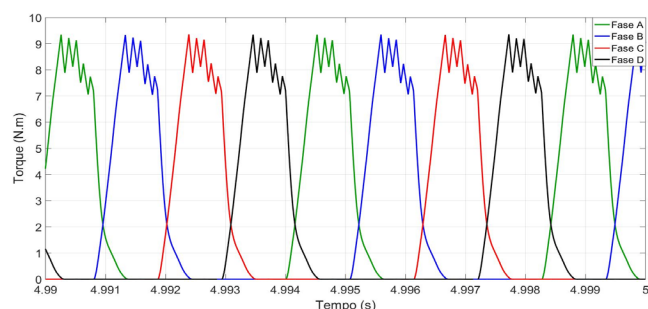
- Na etapa de desmagnetização de uma fase tem-se o retorno de corrente do conversor ( $I_M$ ) para o capacitor ( $I_C$ ).
- Na etapa de roda livre do conversor as correntes  $I_M$  e  $I_C$  são nulas.
- Quando a fonte está fornecendo corrente, grande parte da mesma é absorvida pelo banco de capacitores.

Figura 20: Perfis das correntes instantâneas na saída do retificador, no capacitor, no conversor meia-ponte e na fase A do motor.



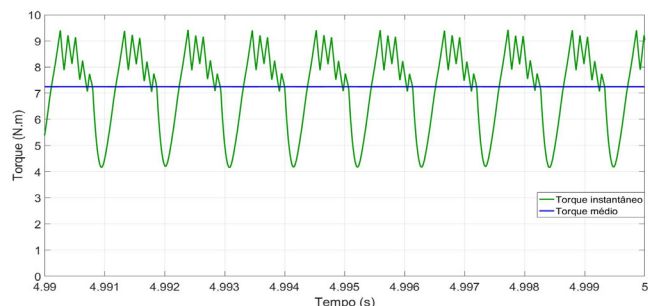
As curvas do conjugado eletromagnético do MRV 8/6 são apresentadas nas Figuras 21 e 22, de forma que cada figura aborda um aspecto específico desta grandeza. Na Figura 21 tem-se o conjugado produzido por cada fase, comprovando a correta definição do intervalo de condução, dado que não existe a produção de conjugado negativo. O sinal do conjugado é positivo, pois, a máquina está produzindo conjugado eletromagnético positivo em relação ao sentido de rotação do rotor, quando o mesmo encontra-se em movimento rotacional.

Figura 21: Conjugado eletromagnético instantâneo das quatro fases do MRV 8/6.



A Figura 22 mostra o conjugado resultante produzido pelo motor, ou seja, a partir da relação entre a contribuição parcial de cada uma das quatro fases tem-se o perfil de conjugado exposto. Observa-se que o conjugado resultante apresenta o menor valor no momento em que uma fase é desmagnetizada e a fase subsequente é magnetizada.

Figura 22: Conjugado eletromagnético instantâneo e médio no MRV 8/6.

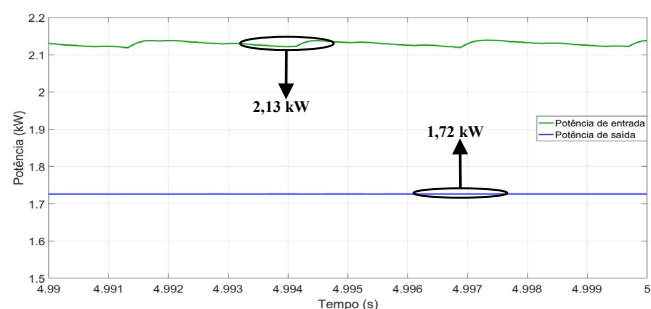


A oscilação do conjugado, observada na Figura 22, é uma característica da máquina a relutância variável em decorrência principalmente de seu aspecto construtivo, vinculado a sua estrutura composta de polos salientes tanto no estator quanto

no rotor, e consequente chaveamento da corrente em seu acionamento.

A Figura 23 ilustra os valores médios das potências de entrada, adquirida no barramento cc, e de saída, a qual é a potência disponível no eixo da máquina. Relacionando-se estas duas grandezas obtém-se um rendimento estimado da máquina em torno de 80,75%, o qual é um valor aceitável perante outras máquinas da mesma faixa de potência. Convém ressaltar que o rendimento de 80,75% é um rendimento estimado para a máquina acionada para um determinado valor de corrente, carga e velocidade.

Figura 23: Potências médias de entrada e saída do MRV 8/6.



#### IV. CONCLUSÃO

A partir dos resultados computacionais obtidos com este trabalho, esperasse um melhor dimensionamento dos elementos que irão compor o sistema de acionamento e controle da máquina a relutância variável, na etapa experimental.

A MaRV 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, e os ganhos propiciados pela prévia etapa de simulação computacional vêm em auxílio para que esta máquina possa competir com as máquinas convencionais atualmente utilizadas.

#### AGRADECIMENTOS

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

#### REFERÊNCIAS

- [1] Bianchi, R.B. e Andrade, D.A. (2015). Projeto, Modelagem e Levantamento de Curva de Indutância de Máquina a Relutância Variável 8x6 Utilizando Elementos Finitos. CBQEE.
- [2] Krishnan, R. (2001). Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press.
- [3] Miller, T.J.E. (2001). Electronic Control of Switched Reluctance Machines, Newnes.
- [4] Moraes Filho, M. J.; Bianchi, R. B.; et al (2016). Projeto de máquina a relutância variável 8/6 e impacto do ângulo do polo do rotor em seu desempenho. XXI Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2016.