

# CONVERSOR “FULL-BRIDGE C-DUMP” NO ACIONAMENTO DE MOTOR DE RELUTÂNCIA CHAVEADO

**Paulo Sérgio Siqueira de Carvalho<sup>1</sup>, Kleber Ferreira da Silva<sup>2</sup>,  
Gilberto Araújo de Medeiros<sup>3</sup>, Wanderlei Marinho da Silva<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Universidade do Vale do Paraíba – Univap / Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento  
Av. Shishima Hifumi, 2911 - São José dos Campos, SP, Brasil 12244-000  
<sup>1</sup>paulocarvalho@gmail.com

<sup>2,3,4</sup>Universidade Cruzeiro do Sul – Unicsul / Departamento de Engenharia Elétrica  
Av. Dr. Ussiel Cirilo, 225 - São Paulo, SP, Brasil 08060-070  
<sup>2</sup>klebermange@gmail.com ; <sup>3</sup>gilbertoam@uol.com.br ; <sup>4</sup>w\_marinho@ig.com.br

**Resumo-** Este trabalho apresenta a topologia de acionamento de motor de relutância chaveado “Full-Bridge C-Dump”. Esta nova topologia faz uso de módulos semicondutores de potência (IGBT) disponíveis comercialmente, o que proporciona redução significativa de custo e tamanho do conversor em relação a topologia meia-ponte assimétrica que é a mais utilizada atualmente.

**Palavras-chave:** Máquinas Elétricas Especiais, Motor de Relutância Chaveado, topologias de acionamento.  
**Área do Conhecimento:** Engenharias

## Introdução

O conceito do Motor de Relutância Chaveado (MRC) é mais antigo que o do motor de indução, tendo sido estabelecido em 1838 [1]. Os primeiros protótipos apresentavam baixo desempenho devido a problemas nos comutadores mecânicos e controle deficiente. Porém, a partir da década de 1980, o desenvolvimento de materiais magnéticos, das chaves eletrônicas de potência (transistores bipolares, MOSFET, IGBT, etc.) e dos microprocessadores estimularam novas pesquisas com o MRC.

O MRC possui as seguintes vantagens [1, 2]: robustez do motor; simplicidade construtiva; operação em altas velocidades; eficiência comparável às máquinas de indução; tolerante a falhas; baixo custo; elevada relação conjugado/inércia; operação em elevadas temperaturas.

As principais desvantagens do MRC são [3]: ondulação de torque; ruído acústico e vibração; não pode ser ligado diretamente a rede elétrica, sendo necessário um conversor de potência e um circuito de controle.

O conversor de potência tem a função de energizar os enrolamentos do motor de forma seqüencial, fazendo com que o rotor tenda a se mover para a posição de mínima relutância[4], ou seja, pólos do estator e do rotor alinhados.

Várias topologias de conversores de potência para o acionamento de MRC estão descritas na literatura [4-6].

Este trabalho apresenta um estudo experimental do conversor “Full-Bridge C-Dump” proposto por Silva (2004) [4].

## Princípio de Funcionamento do MRC

O MRC é de simples construção, possui pólos salientes tanto no rotor quanto no estator (Figura 1) e enrolamentos somente no estator.



Figura 1 – Motor de relutância chaveado desmontado, detalhe dos pólos salientes no rotor e no estator.

O rotor e o estator são feitos de material ferromagnético laminado para reduzir as perdas por histerese e as perdas Foucault. O número de pólos no estator geralmente é maior que no rotor e algumas configurações típicas são: 6/4, 8/6 e 12/8.

A natureza discreta do mecanismo de produção de torque através da energização seqüencial dos enrolamentos do estator determina um alto índice de ondulação de torque e contribui para a produção de ruído acústico e vibração [3].

### Topologias de Conversores de Potência

Neste trabalho foi adotada a simbologia de chave para os transistores dos conversores (Figuras 2 a 4) uma vez que estão operando como chaves (região não-linear).

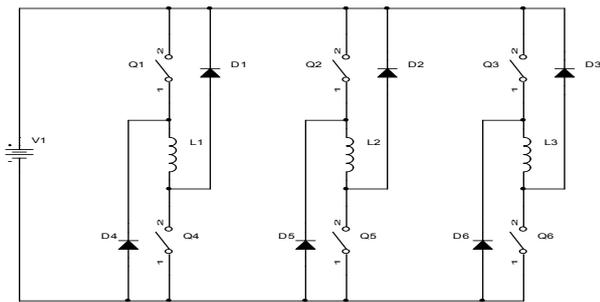


Figura 2: Conversor meia-ponte assimétrica

O conversor meia-ponte assimétrica (Figura 2) é a topologia mais empregada na atualidade [4]. O funcionamento de cada fase é independente e pode ser explicado pela operação da fase L1. A magnetização desta fase ocorre ao ligar Q1 e Q4, aplicando-se a tensão V1 ao enrolamento L1. A desmagnetização pode ocorrer no modo "soft-chopping" ou no modo "hard-chopping". No primeiro desliga-se apenas um dos transistores (Q1 ou Q4) ao passo que no modo "hard-chopping" os dois transistores são desligados simultaneamente, provocando a desmagnetização da fase mais rapidamente, porém com maior esforço sobre o isolamento entre espiras no enrolamento [2].

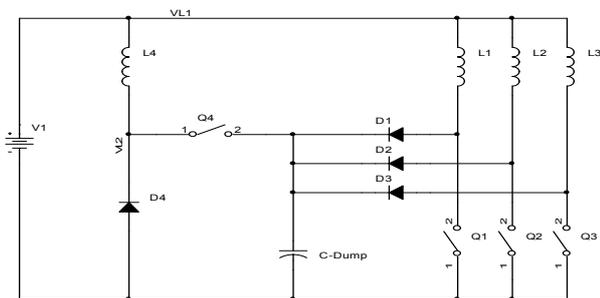


Figura 3: Conversor C-Dump original Bass et al.

O conversor C-Dump (Figura 3) foi originalmente descrito por Bass et al. [5]. Nesta configuração somente uma chave é necessária para a energização de cada fase. O funcionamento das fases também é independente. Na fase L1 a magnetização ocorre ao ligar Q1, aplicando-se a tensão V1 ao enrolamento L1. A

desmagnetização ocorre através de D1, quando Q1 é desligado, carregando o capacitor C-Dump.

O circuito composto por Q4, D4 e L4 forma um conversor convencional "buck" ou "step-down" que retorna de forma controlada a energia armazenada no capacitor para o barramento principal (VL1). Permitindo o reaproveitamento de parte da energia de magnetização das fases.

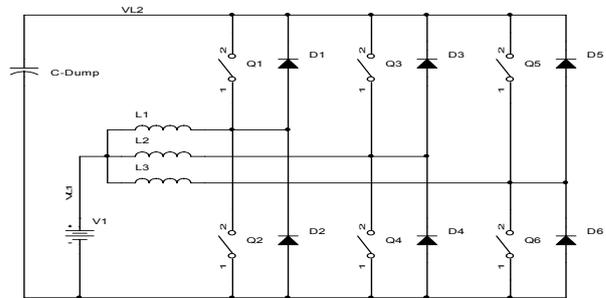


Figura 4: Conversor "Full-Bridge C-Dump"

O conversor utilizado neste trabalho foi proposto por Silva (2004), é chamado "Full-Bridge C-Dump" (Figura 4). Assim como o C-Dump original, somente uma chave é necessária por fase. Porém, devido a sua topologia, duas chaves estão ligadas em cada fase, por exemplo, Q1 e Q2 na fase L1. Para analisar a topologia é necessário dividir o circuito dos transistores em dois: a parte superior (Q1, Q3 e Q5) e a parte inferior (Q2, Q4 e Q6).

Análise da parte inferior utilizando a fase L1: a energização de L1 ocorre ao ligar Q2 e ao desligá-lo a energia armazenada no indutor será transferida para o capacitor C-Dump através de D1. Isto implica que os acionamentos nos transistores da parte inferior provocarão a carga do capacitor, elevando a tensão em seus terminais.

Análise da parte superior utilizando a fase L1: para o funcionamento do MRC sendo energizado pela parte superior é necessário que o capacitor C-Dump esteja com uma tensão aproximadamente igual ao dobro da tensão de acionamento do motor ( $VL2 \approx 2 \cdot VL1$ ). Nesta situação o acionamento da fase L1 se dá ao ligar o transistor Q1. A energia armazenada no C-Dump é utilizada para energizar a fase L1 através do circuito: C-Dump, Q1, L1 e V1.

A decisão da utilização dos transistores da parte superior ou inferior é feita dinamicamente em função da tensão no capacitor C-Dump. Quando a tensão está baixa [ $VL2 < 0,9 \cdot (2 \cdot VL1)$ ], somente os transistores da parte inferior são ativados (Q2, Q4 e Q6) aumentando a tensão no C-Dump. Quando esta tensão está alta [ $VL2 > 1,1 \cdot (2 \cdot VL1)$ ] somente os transistores da parte superior são ativados (Q1, Q3 e Q5) reduzindo a tensão no C-Dump.

## Materiais e Métodos

O experimento foi montado conforme o diagrama de blocos da figura 5, e suas principais características são: controlador baseado no PIC16F877A; controle de operação em modo de pulso único e ângulos de comutação fixos ( $\theta_{ON}$  e  $\theta_{OFF}$ ); controle de corrente por histerese; não foram implementados laços de controle por corrente e velocidade;

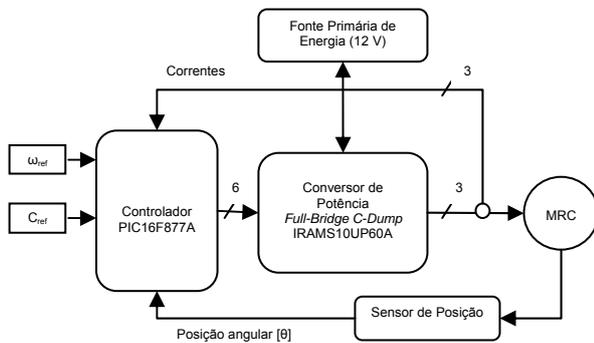


Figura 5 – Diagrama de blocos do acionamento MRC utilizado no experimento

Um módulo integrado de potência para acionamento de motores IRAMS10UP60A foi utilizado para o acionamento do MRC conforme a figura 4.

Para verificar a influência do capacitor C-Dump foram utilizados dois capacitores diferentes. Os valores dos capacitores são: 10 mF e 0,47 mF.

O motor utilizado nos experimentos é um protótipo desenvolvido em 2000 na Universidade Cruzeiro do Sul para o acionamento de uma cadeira de rodas. Os parâmetros do motor de relutância chaveado são descritos por Silva [4].

## Resultados

As figuras de 6 a 10 apresentam os resultados obtidos no experimento. Todas as figuras possuem legendas em sua parte inferior interna. As legendas possuem as seguintes informações de cada sinal: O número; a cor; a descrição; a escala/divisão no eixo y com sua respectiva unidade de medida e por fim a escala/divisão no eixo x com sua respectiva unidade de medida.

Na lateral esquerda das figuras encontra-se a marcação do zero em amplitude de cada um dos sinais. Por exemplo, 1> indica o local no eixo y do zero para o sinal 1.

A figura 6 mostra a seqüência de energização das fases do MRC, as figuras 7 e 8 mostram a variação da corrente em L1 e a tensão do capacitor C-Dump em função de sua capacitância e as figuras 9 e 10 a variação da tensão no capacitor C-Dump com o MRC em vazio e com carga nominal em função de sua capacitância.

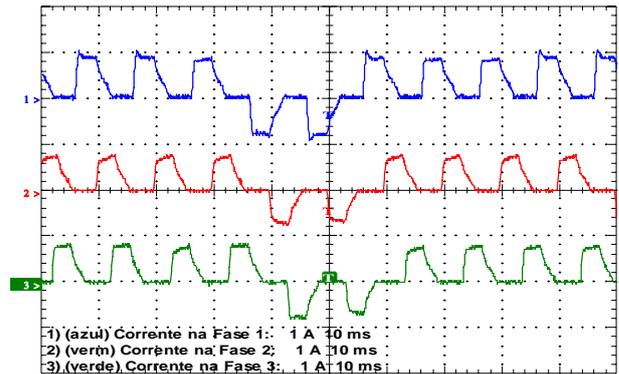


Figura 6 – Energização das fases do MRC. 1-(azul) Corrente em L1; 2-(vermelho) Corrente em L2 e 3-(verde) Corrente em L3. Mostra o acionamento seqüencial das fases (1→2→3→1→...) do MRC. Ocorrem pulsos de corrente positivos e negativos. As correntes são positivas quando os transistores de baixo são ligados (Q2, Q4 ou Q6) e são negativas quando os transistores de cima são ligados (Q1, Q3 ou Q5).

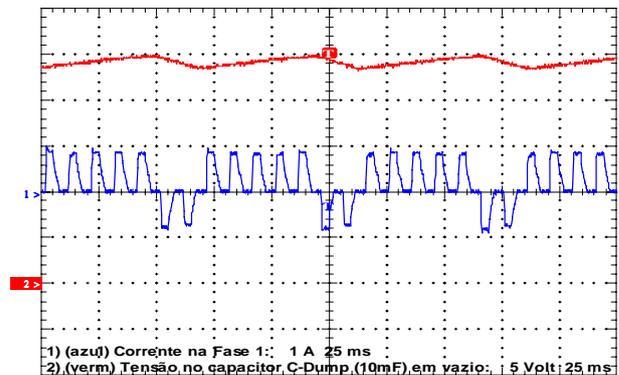


Figura 7 – Funcionamento do controle com MRC operando em vazio e capacitor C-Dump com grande capacitância (10 mF). 1-(azul) Corrente na fase 1 e 2-(vermelho) Tensão no capacitor C-Dump. Detalhe da pequena ondulação na amplitude da tensão no capacitor C-Dump.

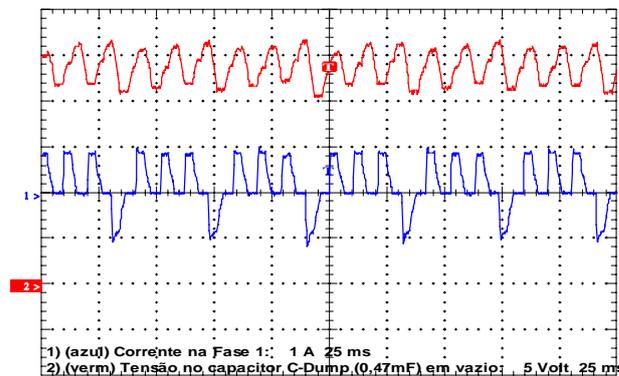


Figura 8 – Funcionamento do controle com MRC operando em vazio e capacitor C-Dump com pequena capacitância (0,47 mF). 1-(azul) Corrente na fase 1 e 2-(vermelho) Tensão no capacitor C-Dump. Detalhe da grande ondulação na amplitude da tensão no capacitor C-Dump.

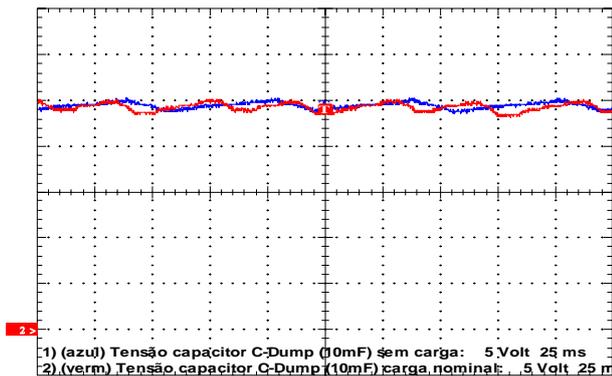


Figura 9 – Estabilidade do controle para capacitor C-Dump com alta capacitância (10mf). 1-(azul) Tensão no C-Dump para MRC em vazio e 2-(vermelho) Tensão no C-Dump para MRC operando com carga nominal.

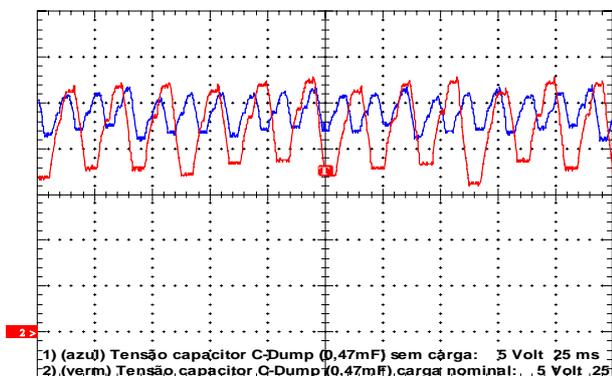


Figura 10 – Instabilidade do controle para capacitor C-Dump com pequena capacitância (0,47 mF). 1-(azul) Tensão no C-Dump para MRC em vazio e 2-(vermelho) Tensão no C-Dump para MRC operando com carga nominal.

## Discussão

Este trabalho constituiu um experimento preliminar para investigar o funcionamento da topologia “Full-Bridge C-Dump” no acionamento de motores de relutância chaveado.

O conversor mostrou-se adequado ao acionamento do MRC com o capacitor de grande capacitância (Figura 9):  $\Delta V_{(VAZIO)} = 1,6 \text{ V}$  e  $\Delta V_{(CARGA \text{ NOMINAL})} = 2,0 \text{ V}$ . Ficando dentro dos limites definidos pela banda de histerese ( $\pm 10\%$  da tensão VL2) operando sem carga e com carga nominal.

Porém, quando se utilizou o capacitor de pequena capacitância a ondulação na tensão atingiu níveis muito altos (Figura 10):  $\Delta V_{(VAZIO)} = 6,0 \text{ V}$  e  $\Delta V_{(CARGA \text{ NOMINAL})} = 11,8 \text{ V}$  que provocaram representativo aumento na ondulação de torque. Demonstrando, conforme Silva (2004) já descrevera, a importância do correto dimensionamento do capacitor nesta topologia.

Experimentos futuros poderão implementar os laços de controle de velocidade e de torque ao

controlador visando a redução da ondulação de torque e o controle da velocidade.

## Conclusão

O conversor “Full-Bridge C-Dump” se apresenta como uma alternativa viável para o acionamento de motores de relutância chaveados.

A utilização de módulos de potência comerciais reduz o custo e a densidade volumétrica de potência [ $\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$ ] do conversor e a utilização de uma única chave por fase torna o conversor indicado para acionamento de motores de baixa tensão

## Agradecimentos

Os autores agradecem a UNICSUL- Universidade Cruzeiro do Sul por ceder as instalações do Laboratório de Eletrônica de Potência para os ensaios e a Luciano Benitez pela cooperação.

## Referências

- [1] MILLER, T.J.E. **Electronic control of switched reluctance machines**. Oxford: Newnes, 2001. xiv, 272 p.
- [2] KRISHNAN, R. **Switched reluctance motor drives : modeling, simulation, analysis, design, and applications**. Industrial electronics series. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2001. 398 p.
- [3] HUSAIN, I.; EHSANI, M. Torque ripple minimization in switched reluctance motor drives by PWM current control. **IEEE Trans. Power Electron.**, 11(1): p. 83-88. 1996.
- [4] SILVA, W.M. **Proposta de novas topologias de conversores "C-Dump" para o acionamento de motores e geradores de relutância chaveados**. 2004. 89f. Tese ( Doutorado em Engenharia Elétrica ) - EPUSP, Universidade de São Paulo, 2004.
- [5] BASS, J.T. et al. Development of a unipolar converter for variable reluctance motor drives. In: IEEE IAS Annual Meeting. Canada. p. 1062-1068, 1985.
- [6] HAVA, A.M.; BLASKO, V.; LIPO, T.A. A modified C-dump converter for variable-reluctance machines. **IEEE Trans. Ind. Appl.**, 28(5): p. 1017-1022. 1992.