

## CONVERSORES PARA O ACIONAMENTO DO SERVOMOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

Ivo Barbi

LAMEP - DEEL - UFSC  
Caixa Postal 476  
Florianópolis, SC - Brasil

### Resumo

Este artigo trata dos conversores estáticos destinados ao acionamento do servomotor de corrente contínua. São apresentados e discutidos os conversores clássicos empregados na indústria. Novas configurações, concebidas como objetivo de propiciar melhor rendimento e comportamento dinâmico dos acionamentos, são apresentados e discutidos. O princípio de funcionamento de cada uma delas e o comportamento em regime permanente são apresentados com resultados de simulações. Alguns protótipos de laboratório foram construídos e testados e foram obtidos resultados experimentais concordantes com os teóricos.

Converters for DC Servomotor Drives.

### Abstract

This paper is concerned with static power converters for DC servomotor drives. The classical power converters employed in the industry are presented and discussed. Also, new topologies conceived to improve the efficiency and dynamical performance of the drives are proposed. The steady-state behavior and the operation of the new converters are illustrated by means of simulation. Some laboratory prototypes have been built and tested. A reasonably close agreement between experimental and theoretical results has been obtained.

Keywords: DC Servomotor Drives; Static Power Converters.

### 1. INTRODUÇÃO

Os servomotores de corrente contínua operando nos quatro quadrantes do plano torque-velocidade encontram as mais variadas aplicações industriais. Pode-se citar como exemplos os processos automatizados de usinagem e de soldagem, de fundamental importância na indústria moderna [Dewan, 1984], [Hariharan, 1979].

Tais motores, nos últimos anos, foram consideravelmente aperfeiçoados com o emprego de novos materiais e de refinadas técnicas de projeto e fabricação. As potências por unidade de volume aumentaram e as constantes de tempo mecânica e elétrica diminuíram.

Um componente de grande importância em um sistema de controle de posição é o conversor estático, destinado a tratar eletronicamente

a energia disponível na rede comercial e fornecer potência elétrica ao motor na forma apropriada.

Os conversores produzidos pela indústria e colocados no mercado ao alcance dos usuários evoluíram muito pouco do ponto de vista das topologias ou do princípio do tratamento da energia elétrica. Houve avanços importantes apenas a nível de tecnologia de comando e dos componentes utilizados.

Os conversores tradicionais, o dual ou o "chopper" apresentam, o primeiro um sofrível desempenho do ponto de vista dinâmico e o segundo um rendimento considerado baixo.

A busca de novas estruturas e novas técnicas para o tratamento da energia, melhorando ambos os aspectos citados, constitui um dos temas atuais de estudos dentro da ele -

trônica de potência e será resumidamente abordada nos parágrafos seguintes.

## 2. O CONVERSOR DUAL

O conversor dual [Pelly, 1971], [Mohr, 1981] é o mais antigo e o mais difundido dentre os empregados no acionamento de servomotores de corrente contínua. A sua configuração básica, na versão trifásica de ponto médio, está representada na figura 1.

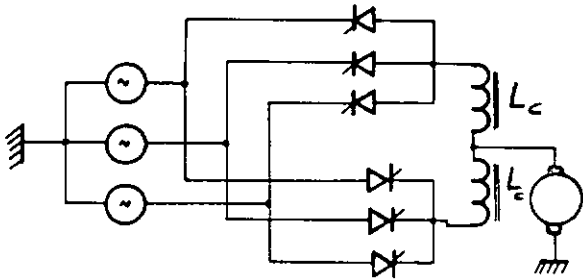


Fig. 1: Conversor dual de 3 pulsos.

Este conversor pode também ser obtido em configurações de 2 e 6 pulsos. Os indutores  $L_c$  são conhecidos como indutores de circulação e podem ser suprimidos às custas de circuitos de comando mais complexos. Tem como principais vantagens o emprego de tiristores lentos facilmente encontráveis e sua robustez natural. Os seus principais inconvenientes são a presença de harmônicas importantes na corrente do motor e uma resposta muito lenta, pelo fato de operar com frequência muito baixa.

## 3. O CONVERSOR CC-CC (CHOPPER)

O passo seguinte, na busca de maior desempenho dinâmico, levou os engenheiros a adotarem o chopper de quatro quadrantes [Perin, 1980], [Dewan, 1984], cuja estrutura básica está representada na figura 2.

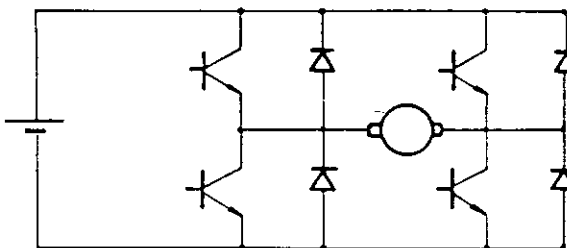


Fig. 2: Chopper de 4 quadrantes.

O emprego de transistores de alta tensão para comutação em alta frequência, de diodos rápidos, de técnicas modernas de comando e proteção permitem a operação com frequências elevadas, da ordem de vários KHz. Com isto obtém-se respostas muito rápidas e correntes

de armadura praticamente isentas de harmônicas.

Durante as frenagens do motor, há inversão da corrente contínua na entrada do conversor. A tensão contínua é obtida na indústria pela retificação da rede alternada por pontes de diodos, que não são reversíveis em corrente. Desse modo a energia da frenagem não pode ser devolvida à fonte e deve ser transformada em calor. A solução clássica consiste no emprego de um chopper adicional que está representado na figura 3 por  $T_1$  e  $R_1$ .

A impossibilidade da recuperação da energia de frenagem constitui o principal inconveniente desta estrutura. O outro inconveniente é o emprego de um conversor adicional.

Apesar desses inconvenientes esta é a técnica mais moderna disponível comercialmente.

A recuperação da energia de frenagem para rede pode ser feita com o emprego de um conversor dual em substituição ao retificador a diodo, como está representada na figura 4.

O emprego deste método, devido ao seu custo e à sua complexidade, não pode ser empregado para alimentar um único chopper. Poderia porém ser adotado para produzir um barramento de corrente contínua reversível em corrente destinado a alimentar vários servomotores.

## 4. NOVAS TÉCNICAS EMPREGANDO A CONVERSÃO DIRETA

Uma solução alternativa para o acionamento dos servomotores de corrente contínua, é o emprego de conversores diretos, com interruptores bidirecionais comandados no bloqueio.

Exemplos desses interruptores empregando transistores bipolares estão representados na figura 5.

As configurações básicas desses conversores estão representados na figura 6.

As figuras 7 e 8 mostram resultados de simulação dos conversores representados nas figuras 6.b e 6.c respectivamente. É empregada a modulação por largura de pulsos. A variável de entrada é a razão cíclica, que ao variar leva o motor a operar no quadrante desejado.

Esses conversores despertam atualmente grande interesse por parte dos pesquisadores pelos seguintes motivos:

- a) exigem pouco volume por não existirem estágios intermediários de tensão contínua.

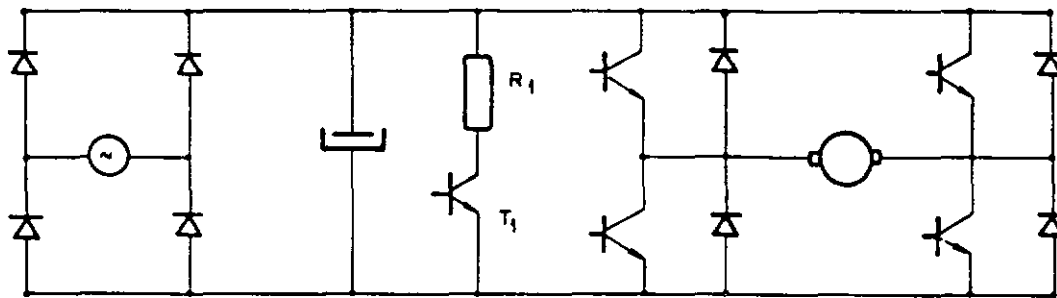


Fig. 3: Sistema com Chopper e frenagem dissipativa.

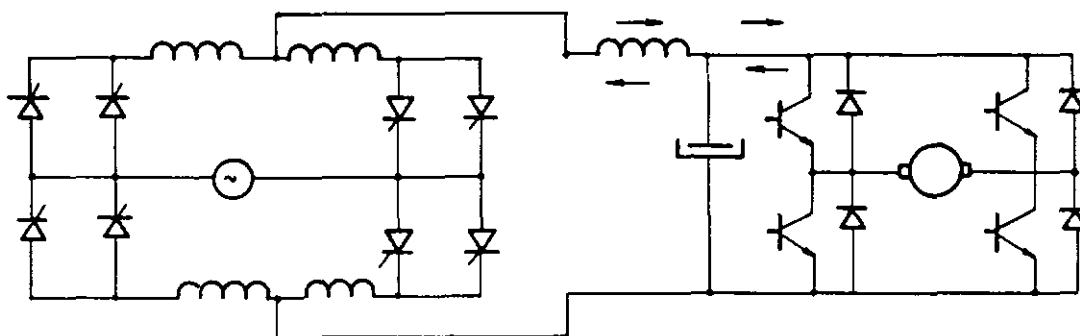


Fig. 4: Emprego do Conversor dual na alimentação do chopper.

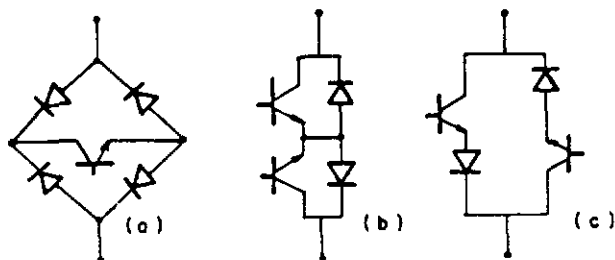


Fig. 5: Interruptores Bidirecionais com transistores bipolares.

- b) operam com frequências elevadas, proporcionando respostas rápidas.
- c) introduzem poucas harmônicas de corrente no motor e na rede.
- d) consomem pouca energia reativa.

Por outro lado, as dificuldades de natureza técnica que surgem na implementação dessas estruturas não devem ser subestimadas. Devem ser empregados componentes apropriados e nem sempre fáceis de serem encontrados. São necessários circuitos de comando cuidadosamente estudados, à luz de conhecimentos profundos do comportamento dos transistores de potência em comutação.

Atualmente (junho de 1986) está sendo testado no LAMEP(UFSC) um protótipo de um conversor direto monofásico de ponto médio alimentando um servomotor de corrente contínua.

Os primeiros resultados experimentais obtidos são considerados animadores. As maiores dificuldades encontradas foram aquelas causadas pela comutação, ou seja, a transferência da corrente de um interruptor para outro. Foram testadas 3 técnicas diferentes para facilitar a comutação, que serão divulgadas oportunamente.

#### 5. NOVAS TÉCNICAS EMPREGANDO A CONVERSÃO INDIRETA

Na conversão indireta deseja-se manter o chopper de 4 quadrantes alimentando o servomotor. O objetivo passa a ser a busca de conversores que alimentam o chopper a partir da rede alternada, e que seja reversível em corrente na saída, para permitir a recuperação da energia de frenagem do motor, excluindo o conversor dual representado na figura 4.

#### PRIMEIRA ESTRUTURA

A primeira estrutura proposta está representada na figura 9. O indutor L, associado em série com a tensão da rede, a transforma em fonte de corrente praticamente senoidal.

O conversor emprega 4 tiristores e 4 diodos, enquanto o conversor dual empregaria 8 tiristores. A comutação natural é mantida. Como o conversor à comutação natural clássi

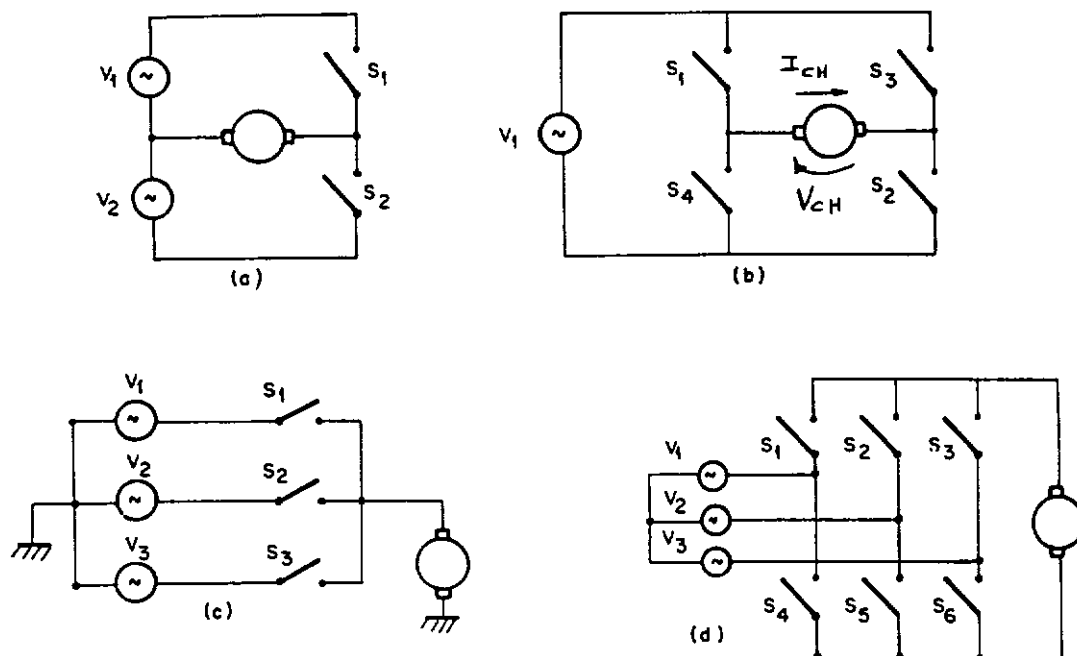


Fig. 6: Conversores Diretos:  
 a) monofásico de ponto médio [Olle,1986], b) monofásico em ponte,  
 c) trifásico de ponto médio [Rodrigues, 1984] e d) trifásico em ponte.

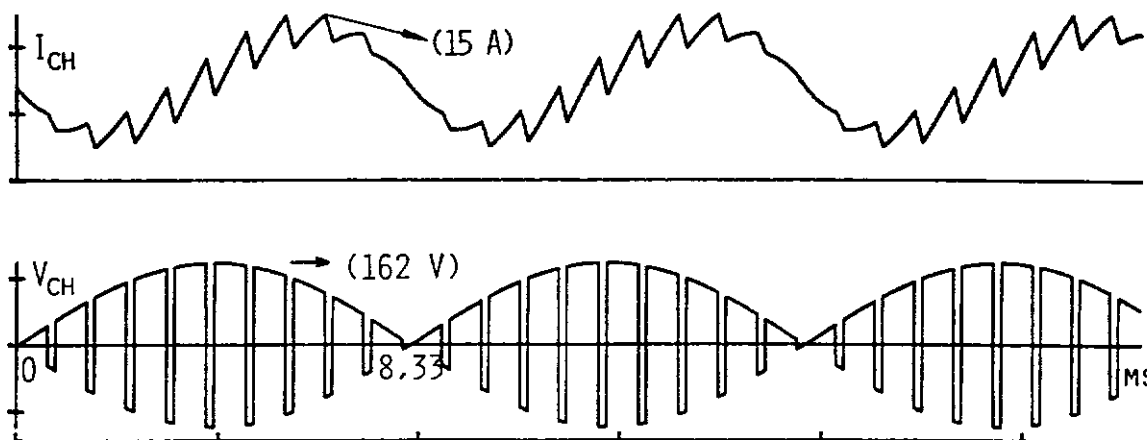


Fig. 7: Corrente e Tensão na saída do conversor da Fig.6.b, para as seguintes condições:  
 $E = 50 \text{ V}$  ,  $L = 11,3 \text{ mH}$  ,  $R = 1 \Omega$  ,  $\mathcal{R} = 0,8$  ,  $V_1 = 156 \text{ V}$  ,  $f_1 = 60 \text{ Hz}$  ,  $f_c = 1200 \text{ Hz}$ .

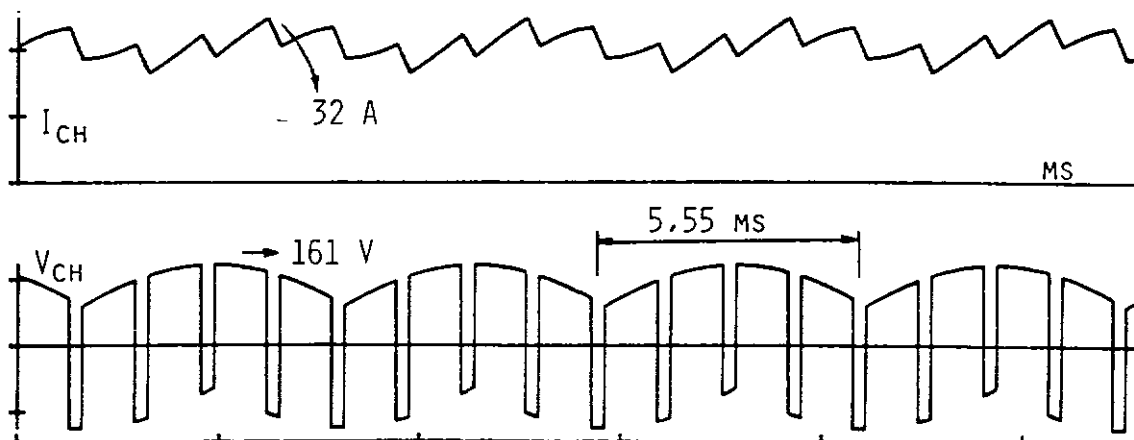


Fig. 8: Corrente e tensão na saída do conversor trifásico de ponto médio, representado na figura 6.c, para as seguintes condições:  
 $E = 50 \text{ V}$  ,  $L = 11,3 \text{ mH}$  ,  $R = 1 \Omega$  ,  $\mathcal{R} = 0,8$  ,  $V_1 = 156 \text{ V}$  ,  $f_1 = 60 \text{ Hz}$  ,  $f_c = 720 \text{ Hz}$ .

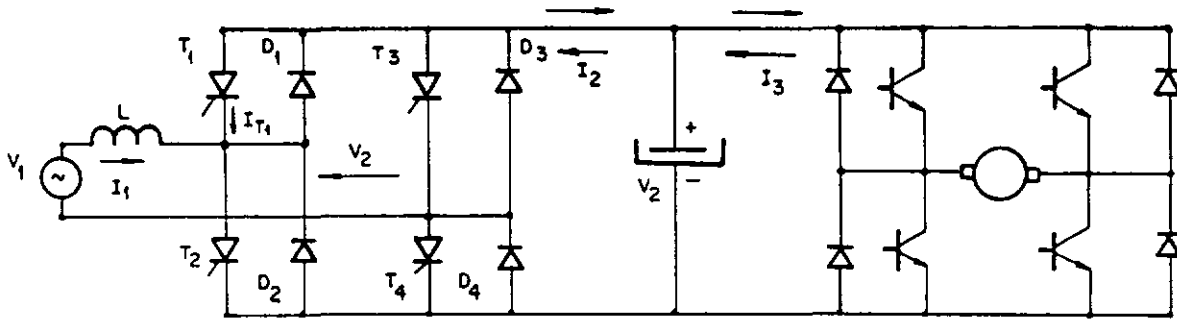


Fig. 9: Conversor para tração e frenagem recuperativa.

co reversível em tensão, na operação como in- versor pode haver problemas de estabilidade. Tal fato pode ser observado nos resultados da simulação, representados nas figuras 10 e 11.

A corrente  $I_2$  é aquela que circula no bar- ramento de tensão contínua do conversor. Ela assume valores instantâneos negativos e posi- tivos a cada ciclo de funcionamento. As cor- rentes instantâneas positivas circulam pelos diodos enquanto as negativas circulam pelos tiristores.

O tempo de aplicação da tensão inversa de um tiristor,  $T_1$  por exemplo, é igual ao tempo de condução do respectivo diodo em an- ti paralelo,  $D_1$  para  $T_1$ . Desse modo, consta- ta-se que o tempo de aplicação da tensão in- versa é proporcional a  $\alpha$ .

A potência média transferida à carga é po- sitiva quando o valor médio da corrente  $I_2$  é positivo. Isto ocorre para ângulos  $\alpha$  compre- endidos em  $90^\circ$  e  $180^\circ$ ; é negativa para ângu- los compreendidos entre zero e  $90^\circ$ .

Na figura 10 estão os resultados de uma simulação; para um ângulo  $\alpha$  igual a  $150^\circ$ . A potência média transferida à fonte  $V_3$  e con- sequentemente ao chopper e ao servomotor é positiva. Na figura 11 estão representados re- sultados semelhantes para um ângulo  $\alpha$  igual a  $30^\circ$  e a potência média é negativa. No primei- ro caso a rede fornece potência ao motor e ele opera em tração. No segundo caso o motor opera em frenagem e transfere potência para a rede.

Atualmente (junho 1986), estudos teóri- cos estão sendo realizados no LAMEP(UFSC) com o objetivo de estabelecer as características completas e o comportamento da estrutura pro- posta.

Uma das dificuldades práticas encontra- das é a inexistência de uma fonte ideal de cor- rente alternada senoidal. Por isto o sincronis- mo deve ser feito em relação à passagem por zero da tensão antes do indutor e um novo ângu- lo de comando deve ser definido.

## SEGUNDA ESTRUTURA

A segunda estrutura proposta está repre- sentada na figura 12. O primeiro estágio é constituído do conversor clássico de dois qua- drantes reversível em tensão. O segundo está- gio é constituído de um conversor reversível em corrente na saída.

Durante a tração, a tensão  $V_2$  e a corren- te  $I_3$  são positivas. Os diodos  $D_1$  e  $D_2$  condu- zem e  $T_1$  e  $T_2$  permanecem bloqueados. Durante a frenagem,  $V_2$  e  $I_3$  tornam-se negativas. Os transistores  $T_1$  e  $T_2$  conduzem enquanto  $D_1$  e  $D_2$  permanecem bloqueados. O sistema proposto é topologicamente complexo, porém o coman- do e o funcionamento são simples. O primeiro con- versor funciona em comutação natural. Os tran- sistores do segundo conversor são acionados somente quando a tensão  $V_3$  atinge um valor pré-fixado, durante as frenagens.

Na figura 13 estão representadas as for- mas de onda obtidas por simulação. No inter- valo  $(0, t_1)$  o motor opera em tração e no in- tervalo  $(t_1, t_2)$  em frenagem.

Há necessidade de se fazer estudos apro- fundados para se estabelecer as característi- cas, as vantagens e as desvantagens da estru- tura.

## TERCEIRA ESTRUTURA

A terceira estrutura proposta está repre- sentada na figura 14. O primeiro estágio é constituído de um conversor clássico reversí- vel em tensão, que associado com o indutor  $L$  o transforma em fonte de corrente contínua reversível em tensão. O segundo estágio é constituído por um chopper de corrente, com funcionamento dual do chopper de tensão apre- sentado na figura 2.

O chopper de corrente funciona com fre- quência fixa e modulação por largura de pul- so. Os interruptores  $T_{12}$  e  $T_{34}$  são comanda- dos complementarmente. Durante as frenagens a tensão  $V_2$  assume valores médios negativos.

Nas figuras 15.a e 15.b estão representa-

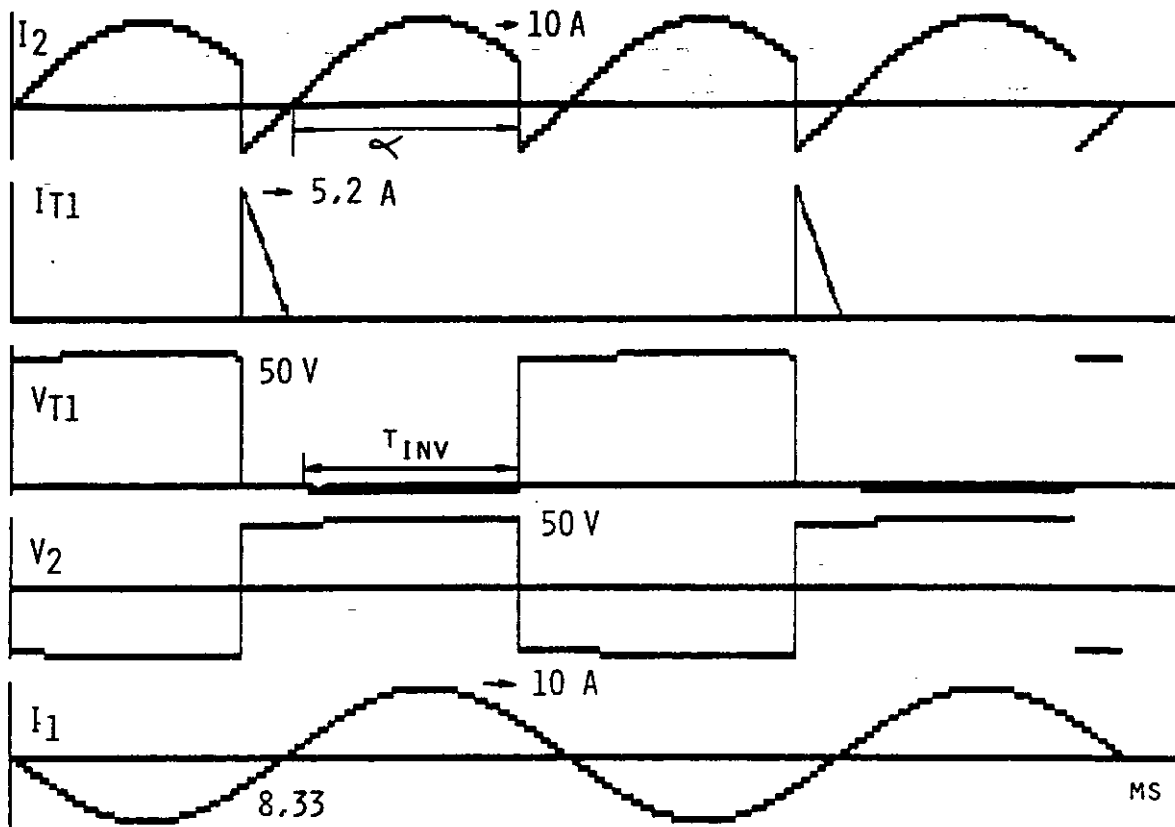


Fig. 10: Simulação da primeira estrutura em tração.

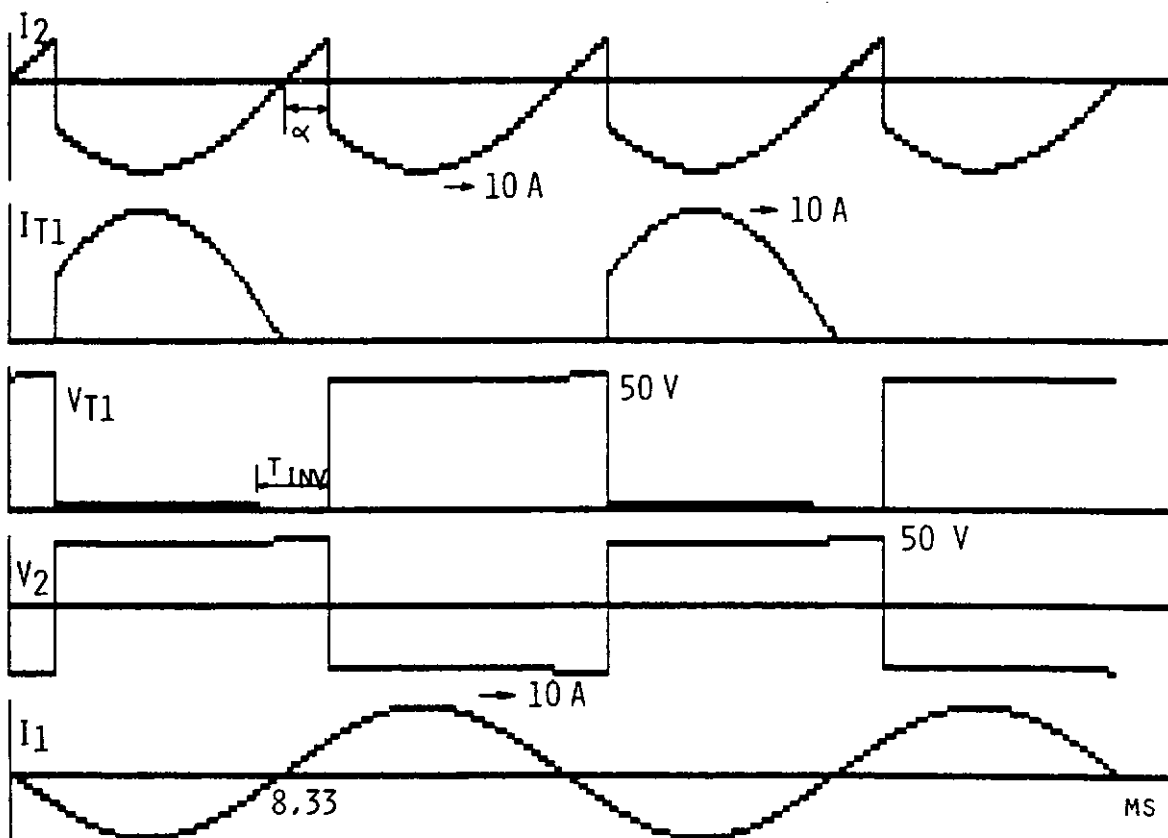


Fig. 11: Simulação da primeira estrutura em frenagem.

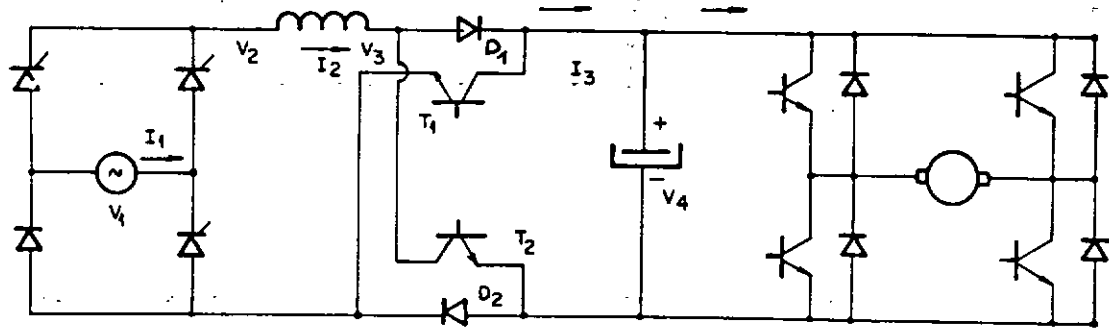


Fig. 12: Conversor para tração e frenagem recuperativa.

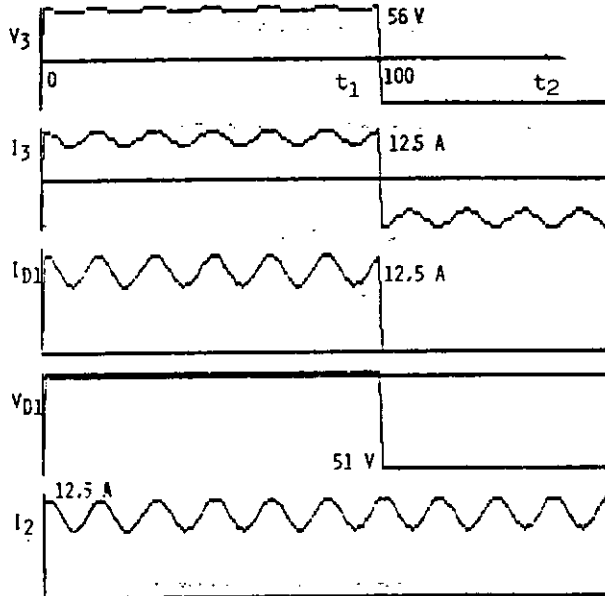


Fig. 13: Simulação do conversor representado na figura 12.

do em frenagem. Nos dois casos foram adotados os seguintes parâmetros:

$$\begin{aligned} I_1 &= 10 \text{ A} \\ R &= 1 \ \Omega \\ L &= 11,3 \text{ mH} \\ E &= 100 \text{ V} \\ C_1 = C_2 &= 5 \ \mu\text{F} \\ f_1 &= 60 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Os transistores podem ser substituídos por tiristores. Em 1984 foi construído um protótipo no LAMEP(UFSC) empregando tiristores [Machado, 1984]. Foram realizados estudos aprofundados, teóricos e experimentais. O desempenho do conjunto foi considerado ótimo, com perspectivas de ser imediatamente transformado em produto e empregado industrialmente. A maior dificuldade foi encontrada na comutação dos tiristores com o motor em alta velocidade. Devem ser empregados limitadores precisos da máxima velocidade.

Atualmente (junho 1986) estão sendo realizados estudos empregando transistores e os resultados são considerados plenamente satisfatórios.

## 6. CONCLUSÕES

Os conversores atualmente empregados no acionamento dos servomotores de corrente contínua são baseados em dois princípios básicos: o conversor dual ou o chopper de 4 quadrantes com frenagem dissipativa. O aumento crescente da automatização industrial e as especificações cada vez mais rigorosas do ponto de vista de rendimento e desempenho dinâmico justificam a busca de configurações novas.

Neste trabalho foram apresentados, além das estruturas em uso no setor industrial, estruturas novas divulgadas recentemente na literatura e estruturas novas atualmente em estudos experimentais e teóricos no LAMEP(UFSC).

Certamente várias delas poderão ser aproveitadas na indústria e apresentarão várias

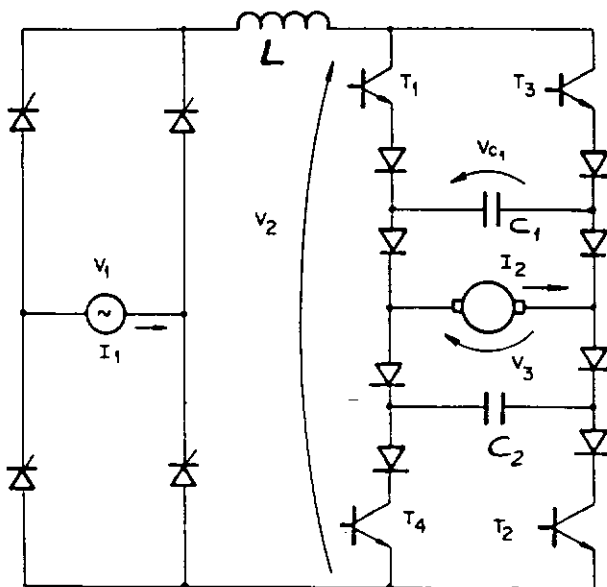
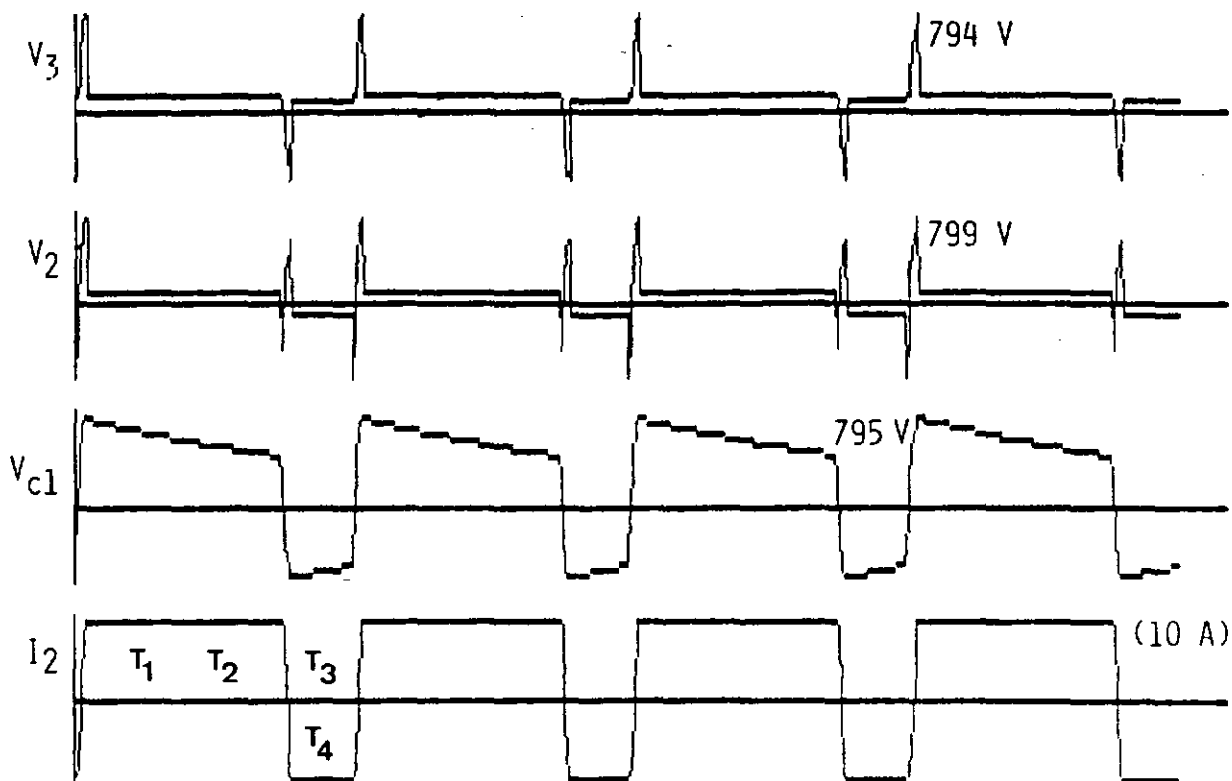
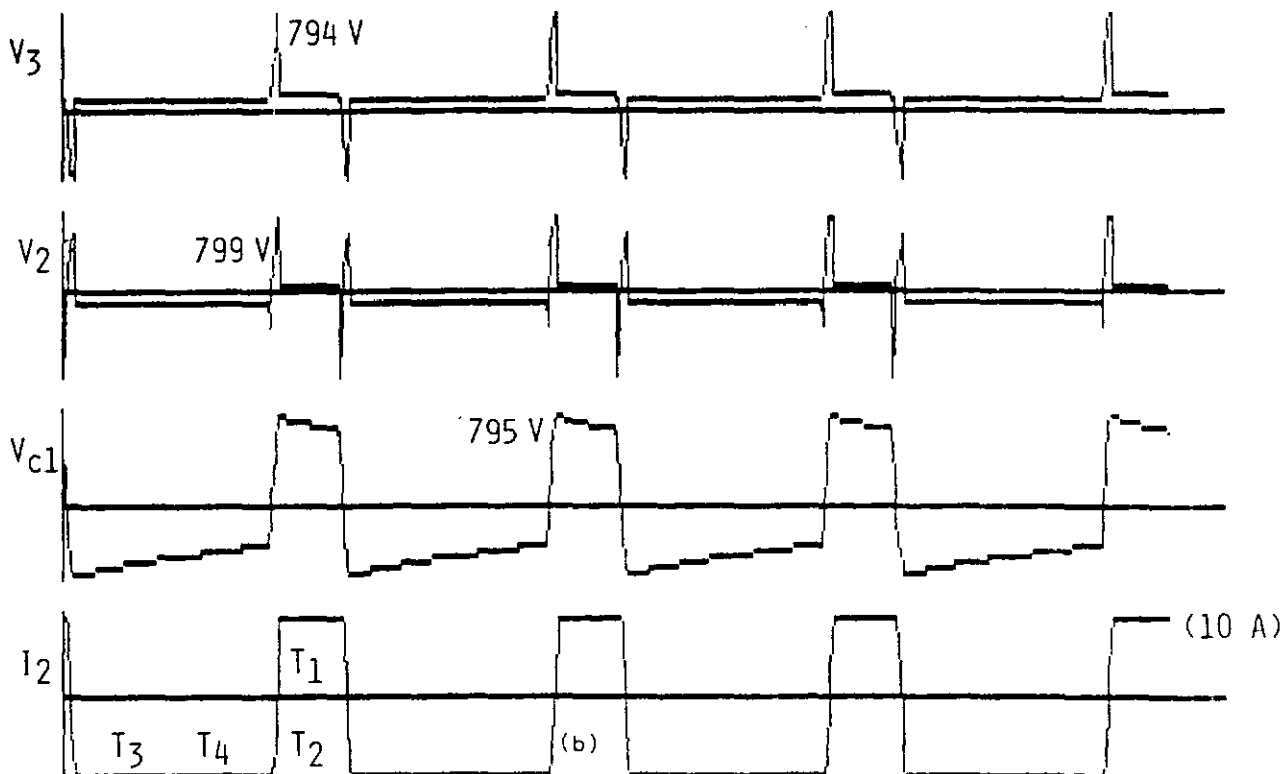


Fig. 14: Chopper de corrente para o acionamento do servomotor de corrente contínua.

dos resultados obtidos por simulação. No primeiro caso o motor opera em tração e no segun-



(a)



(b)

Fig. 15: Simulação do chopper de corrente em: (a) tração ( $R = 0,75$ ) e (b) frenagem ( $R = 0,25$ ).



vantagens em relação às técnicas tradicionais.

Acredita-se que outras configurações e técnicas poderão ser concebidas e estudadas.

#### SIMBOLOGIA

- E - força-eletromotriz do motor.
- L - indutância da armadura do motor.
- R - resistência da armadura do motor.
- $f_1$  - frequência da rede.
- $f_c$  - frequência de comutação.
- $V_1$  - tensão de pico da rede alternada.
- $\mathcal{R}$  - razão cíclica definida como o tempo de condução dividido pelo período.
- $T_{inv}$  - tempo de aplicação da tensão inversa em um tiristor.
- $\alpha$  - ângulo de disparo de um tiristor.
- C - capacitor de comutação.

#### BIBLIOGRAFIA

- Barbi, I., (1986). "Eletrônica de Potência" Editora da UFSC, Florianópolis, SC.
- Dewan, A.B., Slemon, C.R., Straughen, A., (1984). "Power Semiconductor Drives", Willey-Interscience.
- Hariharan, R., Sastry, P.A., (1979). "Position and Feed-Rate Control for Contouring Numerical-Control Systems", IEEE Trans. on Industrial Electronics and Control Instrumentation, vol. IECI-26, N° 2: 79-82.
- Machado, R. L., (1984). "Estudo e Realização de um pulsador de corrente para o acionamento de um servomotor de corrente contínua em quatro quadrantes", Dissertação de Mestrado, UFSC.
- Mohr, H. B., (1981). "Estudo e realização de um conversor dual"; Dissertação de Mestrado, UFSC.
- Olle, L. F., (1986). "Estudo de um conversor direto para o acionamento do servomotor de corrente contínua", Relatório de Dissertação de Mestrado, LAMEP, UFSC.
- Perin, A.J., (1980). "Pulsadores a tiristor de potência para o controle de máquina de corrente contínua", Dissertação de Mestrado, UFSC.
- Pelly, B. R., (1971). "Thyristor Phase-Controlled Converters and Cycloconverters", Willey - Interscience.
- Rodriguez, J., (1984). "A Four-Quadrant Three-Phase Transistor Rectifier", IEEE 1984 Industry Applications: 820-825.