

Utilização de Modernas Tecnologias no Ensino Experimental de Accionamentos Electromecânicos

Paulo Gambôa^(1,2,3), José Faria^(1,2,3), Elmano Margato^(1,2,3), João Palma^(1,2,4)

¹ Instituto Superior de Engenharia de Lisboa – DEEA, Av. Cons. Emídio Navarro, 1950 – 062 Lisboa, Portugal

² Centro de Electrotecnia e Electrónica Industrial – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
R. Conselheiro Emídio Navarro, 1 – 1950 – 062 Lisboa, Portugal

³ Centro de Automática da Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais – 1049-001 Lisboa, Portugal, Tel: +351-21-8417215, Fax: +351-21-8417167

⁴ Laboratório Nacional de Engenharia Civil – CIC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

E-mail: pjgambôa@deea.isel.ipl.pt, jdfaria@deea.isel.pt, efmargato@deea.isel.pt, jpalma@lnec.pt

Resumo: As tecnologias mais recentes de semicondutores possibilitaram o aparecimento no mercado de famílias de dispositivos de potência e de sinal destinados à construção compacta de onduladores de tensão trifásicos, especialmente vocacionados para a indústria dos accionamentos com máquinas de corrente alternada.

Todo o circuito electrónico de potência, baseado em díodos e em transistores de porta isolada (IGBT), reside num único módulo híbrido compacto. O sistema completo de guiamento (*driver*) e de auto-protecção dos semicondutores de potência de um ondulador trifásico em ponte, existe também num único circuito integrado, já adaptado aos altos desníveis de tensão entre os andares de guiamento. Para o projecto e implementação esses dispositivos são associados, constituindo conjuntos compactos e com boas características de robustez. Em alternativa, este tipo de agrupamento também já é disponibilizado por alguns fabricantes, que produzem unidades completas pré-montadas, ou seja, associações rectificador-ondulador-*chopper-driver*, com os módulos dos tipos acima referidos já montados em placas de tecnologia *Surface Mounted Devices* (SMD), e contendo condensadores intermédios, auto alimentação e várias protecções.

Esta tecnologia, em ambas as modalidades, vem simplificar enormemente a construção deste tipo de conversores estáticos. Impondo algumas condições na parte de comando, demonstra-se que os mesmos produtos permitem ainda realizar outras topologias de conversores, o que é de grande interesse para fins didácticos e para trabalhos de investigação.

Neste artigo comentam-se as características, potencialidades e exigências destas novas soluções. Fazem-se considerações e sugestões de projecto de onduladores e de conversores de contínua para contínua (*choppers*). Por fim apresentam-se resultados experimentais de ensaios efectuados em protótipos laboratoriais utilizados no ensino.

Palavras-chave: Ferramentas para educação, módulo para ensaios laboratoriais, electrónica industrial, accionamentos electromecânicos.

1. Introdução

O Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, ministra dois graus académicos com competências em engenharia electrotécnica e automação

[1], e com grande procura por parte do mercado de trabalho nesta área.

Uma sólida preparação científica aliada a uma forte componente experimental é a chave para introduzir competências a longo prazo. Desta forma, a preparação dos engenheiros para a rápida evolução tecnológica que irão encontrar na sua vida profissional é assegurada.

As vantagens da utilização de equipamento industrial em trabalhos de laboratório têm sido exploradas com sucesso desde há vários anos pelo grupo de ensino da área da electrónica de potência e accionamentos [2].

A utilização de programas de simulação em computador permite uma técnica de ensino interactiva com o aluno. Os sistemas de ensino por *e-learning* permitem uma abordagem no ensino mais fácil como complemento de estudo, contudo não substitui a componente experimental obtida com hardware.

A actualização dos currículos resultantes da modernização na área da electrónica de potência e as facilidades de aprendizagem procuradas têm levado em conta que existe uma progressiva perda de interesse por parte dos alunos nas engenharias em vários países. Algumas escolas de engenharia têm levado a cabo iniciativas para ultrapassar essa situação desfavorável, em alguns casos suportadas por políticas governamentais, tentando captar novos alunos [3].

2. Modernas Tecnologias Industriais utilizadas em Laboratório

Os trabalhos laboratoriais em electrónica de potência e accionamentos electromecânicos apresentam um campo com diferentes níveis de complexidade. Os circuitos de potência podem ser constituídos por um único dispositivo semiconductor, conversores DC/DC (*choppers*) de vários quadrantes de funcionamento ou diferentes topologias de onduladores de tensão. No processamento de energia podem ser utilizadas técnicas de comando rudimentares ou métodos mais elaborados, como a modulação de largura de impulso (PWM), com aplicação em accionamentos electromecânicos.

A utilização de dispositivos semicondutores de potência, agrupados em módulos compactos e destinados principalmente para a indústria dos accionamentos com máquinas eléctricas trifásicas, apresenta uma grande versatilidade para os objectivos do ensino.

Estes módulos compactos de potência incluem uma ponte rectificadora a diodos, um ondulador, um conversor contínua-contínua (*chopper*) de um quadrante para dissipar, em resistência exterior, a energia de retorno resultante de travagens e inversões rápidas. Possuem também dispositivos sensores de corrente e de temperatura que permitem realizar, muito facilmente, a protecção contra sobrecargas e curto-circuitos. Estes módulos podem ser utilizados para processamento de energia em accionamentos com máquinas de potência até à dezena de kW e com tensões compostas até 460V.

Para realizar as funções de ataque aos dispositivos do ondulador trifásico em ponte existem circuitos integrados, especialmente adaptados aos blocos de potência anteriores [4]. Estes *drivers* proporcionam, para além do isolamento galvânico, indispensável entre os vários andares de guiamento, margens de inibição entre dispositivos do mesmo ramo, protecção contra curto-circuitos e bloqueio em caso de insuficiência da tensão de alimentação, elevada imunidade às transições violentas de tensão entre os andares de guiamento dos vários IGBT, imunidade às perturbações veiculadas pela porta do IGBT, apresentam um consumo muito baixo e um pino de entrada (*Itrip*) para inibição em caso de curto-circuito.

Para trabalhos experimentais com técnicas (que podem ser mais ou menos sofisticadas) de comando e de controlo é preferível e vantajoso recorrer a unidades pré-montadas, que têm os principais recursos de baixo nível (guiamento e protecção).

Pelo menos um fabricante também já disponibiliza conjuntos constituídos por um módulo compacto, um integrado de *drivers*, bloco de condensadores intermédios, e respectivos sistemas de pré-carga e de descarga, alimentação comutada interna e alimentação em *bootstrap* para os andares de potencial flutuante, auto-protecção contra sobrecargas e curto-circuitos.

Esta modalidade de sistema pré-fabricado representa um passo muito importante para o desenvolvimento de protótipos de investigação e para a produção de material para comercialização, em especial destinado a accionamentos eléctricos de velocidade variável.

Por seu lado, os conjuntos pré-construídos libertam, pelo menos em parte, o utilizador da preocupação com aqueles pormenores e facilitam a preparação laboratorial de montagens para abordar essencialmente problemas de comando (p.ex. técnicas de PWM) e de controlo.

Para a implementação, de uma forma versátil, de técnicas de comando e controlo mais avançadas, estão disponíveis no mercado unidades com Processadores Digitais de Sinal (DSP) munidas de interfaces analógicas e digitais, por exemplo do fabricante dSPACE [5].

Desta forma, no ensino de accionamentos electromecânicos, os sistemas de controlo específico podem ser implementados de uma forma relativamente

fácil, utilizando software dedicado ou ferramentas do ambiente *Matlab/Simulink*, sendo depois descarregados para aquele hardware de controlo.

Os accionamentos electromecânicos com máquinas eléctricas de corrente contínua ou alternada são introduzidos em níveis mais avançados aos alunos, tendo sido construídas montagens vocacionadas para o seu ensaio e estudo.

Neste artigo são descritas em detalhe as ferramentas e métodos mais importantes para este tipo de ensino experimental e demonstradas as suas potencialidades com exemplos de trabalhos laboratoriais.

3. Módulos de potência para accionamentos electromecânicos

Presentemente existem módulos trifásicos de potência com os circuitos de guiamento (*driver*) já incorporados e destinados principalmente para máquinas eléctricas, como se apresenta na fig. 1a. A activação ou inibição dos sinais de comando para os dispositivos semicondutores, como se mostra na fig. 1b,c,d, permite a obtenção e exploração de outras topologias de conversores estáticos de potência.

Usando as unidades de controlo com DSP atrás referidas, programadas com algoritmos de comando e controlo adequados, em associação com estes módulos de potência, obtém-se estruturas específicas de diferentes tipos de accionamentos electromecânicos.

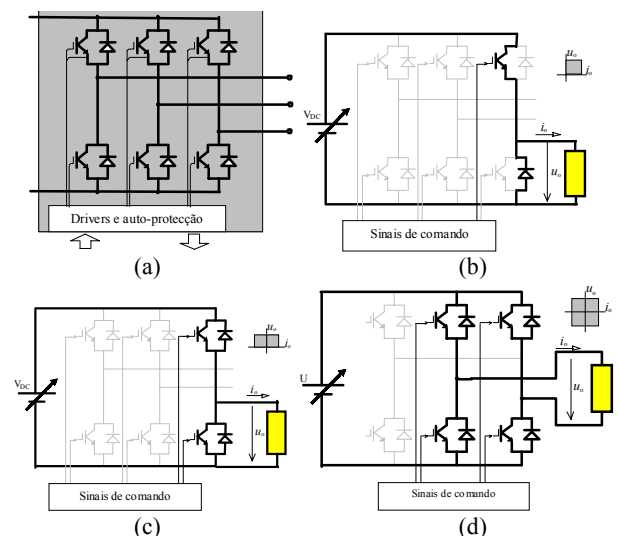


Fig. 1. a) Módulo integrado de potência, b) chopper de 1 quadrante, c) chopper de 2 quadrantes, d) chopper de 4 quadrantes.

Neste artigo mostram-se alguns dos possíveis tipos de accionamentos electromecânicos, controlados através de DSPs do fabricante dSPACE. As técnicas a utilizar nas funções de controlo são implementadas utilizando o software *Matlab/Simulink* e o seu código, após compilação, é descarregado para o DSP. Desta forma as leis e estratégias de controlo podem ser facilmente implementadas, testadas e modificadas.

Na fig.2. apresenta-se o esquema de blocos exemplificativo de todo o sistema: módulo integrado de

potência, interfaces do DSP, PC e as amostragens a partir dos sensores.

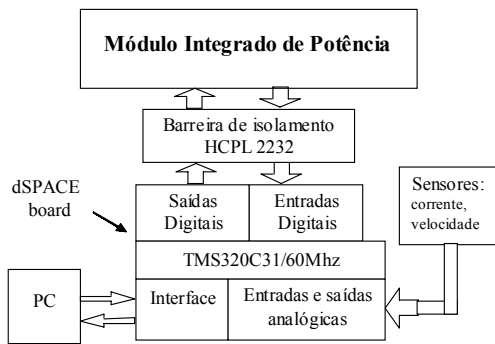


Fig.2. Esquema de blocos exemplificativo de todo o sistema: módulo integrado de potência, interfaces do DSP, PC e as amostragens a partir dos sensores.

Por razões de segurança, para a alimentação em DC aos conversores são usados níveis de tensão moderados (60V) com limitação de corrente. A amostragem da corrente na carga é feita através de sensores por efeito de Hall permitindo a obtenção de uma sinal analógico isolado do circuito de potência. Esta transdução permite a visualização temporal da corrente ou o estabelecimento sistemas de controlo em cadeia fechada.

4. Exemplo: controlo de velocidade de um accionamento electromecânico de corrente contínua

4.1. Comando unipolar da tensão de saída por PWM

Na fotografia da fig.3 apresentam-se os diferentes elementos constituintes do accionamento electromecânico DC de carácter didáctico. Este é constituído por um motor de corrente contínua com excitação por magnetos permanentes, o conversor electrónico de potência e o controlador digital de sinal.

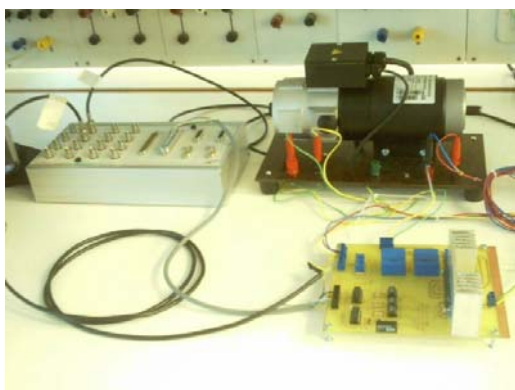


Fig.3. Fotografia com o accionamento electromecânico DC.

Os alunos iniciam o trabalho experimental utilizando o software *Simulink* para gerar os sinais de comando para cada braço, necessários para o *chopper* de quatro quadrantes, conforme apresentado na fig.4. Nesta figura está ilustrado o princípio usado na obtenção dos sinais de comando para o primeiro e segundo braços do *chopper* de 4 quadrantes, através da comparação entre a tensão de comando u_c e ondas triangulares (portadoras) v_{tri} e $-v_{tri}$.

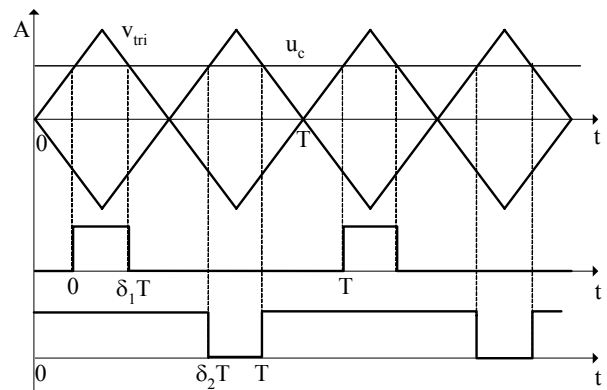


Fig.4. Obtenção dos sinais de comando.

As razões cíclicas δ_1 (primeiro braço) e δ_2 (segundo braço) são calculadas pelas equações (1):

$$\delta_1 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{u_c}{A} \right) \quad \delta_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{u_c}{A} \right) \quad (1)$$

Os sinais de comando são aplicados pelo DSP aos circuitos de guiamento permitindo o ensaio e funcionamento do conversor de potência. Inicialmente o desempenho do conversor de potência é ensaiado em cadeia aberta com os sinais de comando gerados pelo DSP.

4.2. Controlo de velocidade do accionamento DC

O controlo da velocidade em cadeia fechada é implementado com anel subordinado de corrente conforme apresentado na fig. 5. Os blocos associados ao conversor de potência e máquina eléctrica correspondem a hardware. Os blocos de controlo são implementados em software e a necessária interface está disponível na placa do DSP. Para a amostragem da velocidade e da corrente são utilizados respectivamente um gerador taquimétrico e um sensor por efeito de Hall.

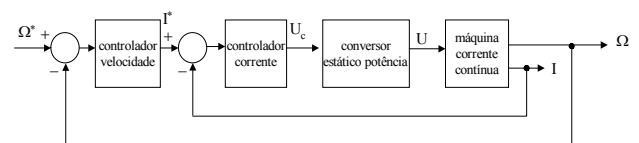


Fig.5. Diagrama de blocos de controlo da velocidade no accionamento DC.

Na fig. 6 são apresentada em ambiente *Simulink*, a geração dos sinais de comando por PWM para os dispositivos semicondutores do conversor de potência (equação (1) e bloco *DS1104SL_DSP_PWM3*), os controladores de velocidade e corrente do tipo proporcional integral e a geração das referências de velocidade.

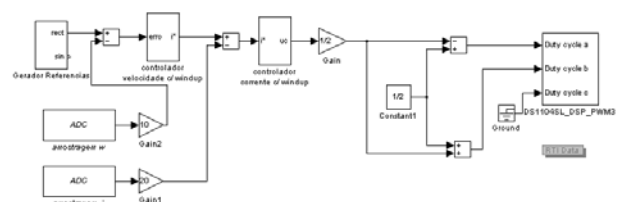


Fig.6. Implementação com o controlador dSPACE da função de controlo do accionamento DC.

Utilizando os blocos de interface disponíveis pelo *Control Desk*, tais como ganhos fixos, ganhos variáveis, interruptores e a opção de visualização das diferentes grandezas através de gráficos ou *displays*, o aluno cria a sua própria interface com o sistema a controlar. Na fig.7 é apresentado o exemplo de um *layout*.

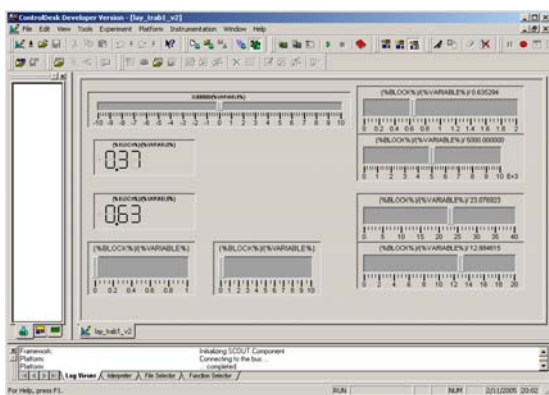


Fig.7. Exemplo do *layout* com o dSPACE Control Desk

4.3. Resultados experimentais e análise teórica

Na fig. 8 são apresentados resultados experimentais com o controlo de velocidade obtidos com o accionamento electromecânico de corrente contínua para duas referências de velocidade: sinusoidal e rectangular.

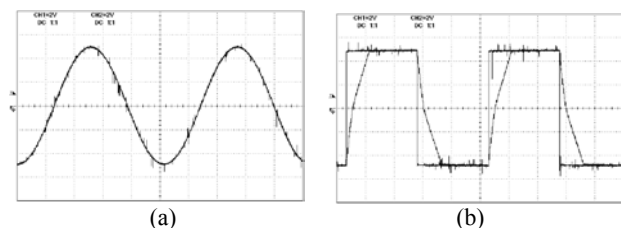


Fig.8. Resultados experimentais com o controlo de velocidade:
a) referência sinusoidal; b) referência rectangular; escalas:
tempo (1s/div), velocidade (800rpm/div).

Inicialmente os alunos já tinham utilizado as ferramentas do *Simulink* e os conhecimentos teóricos para desenvolver o modelo global do accionamento e efectuar a sua simulação numérica. Posteriormente e em laboratório este é ensaiado permitindo validar a simulação numérica.

O relatório escrito com a análise teórica, resultados de simulação numérica e experimentais é posteriormente analisado e discutido com os professores. Este tipo de metodologia foi iniciado durante o ano lectivo de 2004/2005, obtendo-se bons resultados e boa aceitação por parte dos alunos.

5. Conclusões

A utilização da tecnologia industrial moderna da electrónica de potência (módulos integrados e circuitos de guiamento) pode constituir uma forte contribuição para o desenvolvimento de estratégias no ensino aos alunos na área dos accionamentos electromecânicos e respectivo controlo, não descuidando os pormenores relacionados com toda a parte física.

Foram construídos conjuntos de sistemas didácticos de forma a criar utensílios com as apropriadas interfaces para que, de uma forma fácil e segura, possam ser utilizados e manuseados pelos alunos em ambiente laboratorial.

Uma parte destes sistemas didácticos presta-se igualmente à utilização com outros tipos de máquinas eléctricas e controladores, permitindo, desta forma, uma grande flexibilidade para ensaiar e estudar o controlo de accionamentos electromecânicos diversificados.

A abordagem e estratégia aqui descritas foram já utilizadas com sucesso no ensino experimental dos accionamentos electromecânicos no último ano lectivo.

6. Apêndice

Seguem-se alguns detalhes do equipamento utilizado na construção dos sistemas didácticos de accionamentos electromecânico de corrente contínua:

Convertor estático de potência

Módulo integrado de potência IRAMS10UP60B da *International Rectifier*
Transdutores por efeito de *Hall* LA25NP.

Máquina de corrente contínua de magnetos permanentes

Modelo DCM3B 35/06 A2 B3 da *Control Techniques*
Binário nominal 0,93Nm
Velocidade nominal: 3500rpm
Corrente nominal 7A
Constante de binário de 0,13Nm/A

Processador digital de sinal – DSP

Modelo DS1104 do fabricante *dSPACE*
Processador TMS320C31/60MHz
Entradas e saídas analógicas: 8, entradas digitais: 2
Software Matlab/Simulink.

References

- [1] Palma, J.; Margato, E. – "Industrial Automation Curriculum in an Electrical Engineering Course: A Challenge to Face Technology Evolution", *Proc. of the 11th EAEEIE Conference*, Ulm 2000.
- [2] Palma, J.; Margato, E., "On the Use of Industrial Purpose Equipment and Devices for Experimental Training on Industrial Electronics and Automation", *Proc. of the 10th EAEEIE Conference*, Capri 1999.
- [3] Panaitescu, R., Mohan, N., Robbins, W., Undeland, T., Jose, P., Henze, C., Persson, E., and Begalke, T., "An Instructional Laboratory for the Revival of Electric Machines and Drives Courses", *Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Cairns, Australia, 2002.
- [4] "IRAM modules", Integrated Power Module Technology for Appliance Motor Drives – International Rectifier.
- [5] DSPACE Company website www.dspace.de.