

# Sistema Electrónico de Condicionamento e Processamento, em Tempo Real, das Tensões e Correntes do Motor de Indução Trifásico Alimentado por Conversores de Frequência

Vicente Leite <sup>(1)</sup>, Henrique Teixeira <sup>(1)</sup>, Rui Araújo <sup>(2)</sup>, Diamantino Freitas <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Escola Superior de Tecnologia e de Gestão  
do Instituto Politécnico de Bragança  
Campus de Sta. Apolónia - Apartado 134  
5301-857 Bragança, Portugal  
avtl@ipb.pt, hteixeira@ipb.pt

<sup>(2)</sup> Faculdade de Engenharia  
da Universidade do Porto  
Rua Dr. Roberto Frias s/n  
4200-465 Porto, Portugal  
raraujo@fe.up.pt, dfreitas@fe.up.pt

## Resumo

Este trabalho apresenta um sistema integrado, baseado em módulos electrónicos, desenvolvido para condicionamento, filtragem e processamento das tensões e intensidades das correntes do motor de indução trifásico, alimentado por conversores de frequência. O sistema é constituído, basicamente, por um conjunto de módulos que permitem adaptar e isolar os sinais captados relativamente aos sinais de potência, realizar a função de filtragem *anti-aliasing* com frequência de corte regulável, obter o ângulo da posição do rotor via codificador incremental e realizar a transformação dos sistemas trifásicos de tensões e correntes em sistemas bifásicos equivalentes, em quadratura e efectuar a mudança de coordenadas entre o referencial do estator e do rotor, isto é, realizar as transformadas de *Clark* e *Park*, respectivamente. Os sinais processados, referidos ao estator ou ao rotor ou outro referencial, podem ser visualizados e armazenados para processamento *off-line*, ou utilizados em processamento de sinal para estimação, controlo, monitorização e diagnóstico, em tempo real, principalmente na área dos accionamentos electrónicos de velocidade variável.

**Palavras chave:** Filtragem *anti-aliasing*, conversor de frequência, motor de indução trifásico, transformadas.

## 1. Introdução

Num passado não muito longínquo o motor de indução trifásico era o mais utilizado em aplicações de velocidade fixa pelas razões já referidas em [1]. Contudo, em aplicações de desempenho mais exigente e/ou velocidade controlada, apresentava algumas desvantagens em resultado da maior complexidade do seu controlo face aos motores c.c. e síncrono de ímanes permanentes, tendo como consequência um custo mais elevado nos conversores de frequência associados. Todavia, o desenvolvimento científico e tecnológico verificado nas últimas décadas tem permitido por um lado, uma contínua melhoria dos métodos de controlo e, por outro, uma assinalável redução de custos dos conversores possibilitando

assim que o motor de indução trifásico venha a ser, desde 1990, o mais utilizado em aplicações industriais de velocidade controlada.

Para um elevado e eficiente desempenho do motor de indução, exige-se a utilização de controlo do tipo vectorial, em que as grandezas controladas são manipuladas simultaneamente em amplitude e fase. Uma das situações mais correntes consiste na obtenção indirecta da orientação do fluxo do rotor a partir da sua estimação, sem recorrer à utilização de sensores de fluxo, sendo para tal utilizados estimadores ou observadores com e sem medida da velocidade/posição. Estas metodologias de controlo do motor de indução, apoiam-se sempre num modelo parametrizado. A imprecisão do conjunto de parâmetros e/ou a sua variância no tempo influenciam negativamente o desempenho do método de controlo. Este segundo aspecto, obriga a identificar os parâmetros do motor em tempo real, de modo que o modelo seja permanentemente adaptado às alterações que resultam de vários factores, como referido em [2].

Em geral, um procedimento de identificação requer a aquisição de sinais de entrada e saída do sistema, sendo, neste caso, vulgarmente utilizadas as tensões, as correntes e a velocidade/posição ou um subconjunto destes sinais, de modo conveniente. Para o efeito, é imprescindível a existência de um sistema electrónico que realize a interface entre os sinais de potência e os sinais a adquirir e tratar por processadores, designadamente processadores digitais de sinal, em diversificadas aplicações, nomeadamente na área dos accionamentos electrónicos de velocidade variável.

Normalmente, o sistema trifásico de tensões ou correntes, gerado para alimentação do motor de indução, não é utilizado directamente, sendo necessário obter previamente os sistemas bifásicos equivalentes do ponto de vista magnético, em quadratura, referidos a um referencial fixo em relação ao estator, solidário com o rotor, ou síncrono com o campo girante, sendo estes, os referenciais habitualmente utilizados para descrever as equações do motor.

Com vista a aplicações genéricas, o sistema electrónico desenvolvido utiliza as três tensões e as três intensidades das correntes, no caso do referencial do estator, sendo também necessária a posição rotórica para o caso do referencial do rotor. Assim, com o sistema desenvolvido é possível obter, em tempo real, as componentes directa e em quadratura dos fasores espaciais da tensão e intensidade de corrente, devidamente isoladas, adaptadas e transformadas, referidas a um referencial geral que é possível escolher.

A medida com precisão das grandezas anteriormente referidas apresenta diversas dificuldades, apresentadas em [1]. Qualquer conversor de frequência provoca harmónicos, em percentagem e a frequências variáveis, dificultando assim a aquisição de medidas directas sem ocorrência de *aliasing*, daí a importância e a necessidade do sistema electrónico agora desenvolvido. Por outro lado, a aquisição de dados e o condicionamento de sinal decorrem num ambiente de forte interferência electromagnética.

Na literatura encontram-se poucos trabalhos que se debruçam sobre o projecto e implementação prática destes sistemas de interface e esse facto parece-nos constituir uma razão importante para a publicação do presente trabalho, que vem na sequência de outros trabalhos realizados pelos autores, como por exemplo [1] e [3], ao longo de vários anos de investigação.

## 2. Arquitectura

O sistema electrónico é apresentado na figura 1, sendo constituído, basicamente, por quatro módulos interligados por um barramento próprio para distribuição de sinais.

O primeiro módulo permite adaptar e isolar os sinais captados relativamente aos sinais de potência e utiliza os transdutores *LV 100-400* para as tensões e *LTS 25-NP* para as intensidades das correntes, ambos do fabricante *LEM*. O segundo realiza a função de filtragem *anti-aliasing* dos sinais adaptados e isolados, implementado com os filtros activos passa-baixo, elípticos, de 5ª ordem, com frequência de corte regulável, *MAX7411* da *MAXIM*.

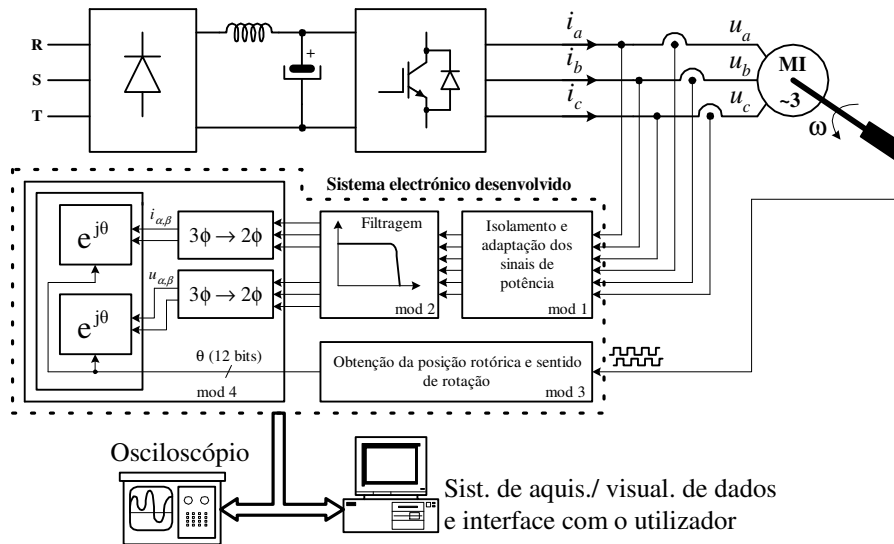


Figura 1. Diagrama de blocos do sistema global.

O terceiro módulo determina o ângulo da posição do rotor e o sentido de rotação através dos sinais provenientes de um codificador incremental com resolução de 1024 impulsos por rotação. A frequência dos impulsos é multiplicada por quatro e o sinal de onda quadrada resultante é utilizado para relógio de um contador que disponibiliza, à sua saída, uma palavra binária que corresponde directamente à posição angular do rotor, com uma resolução de 12 bits. O contador incrementa ou decreta o seu valor actual de acordo com o sentido de rotação.

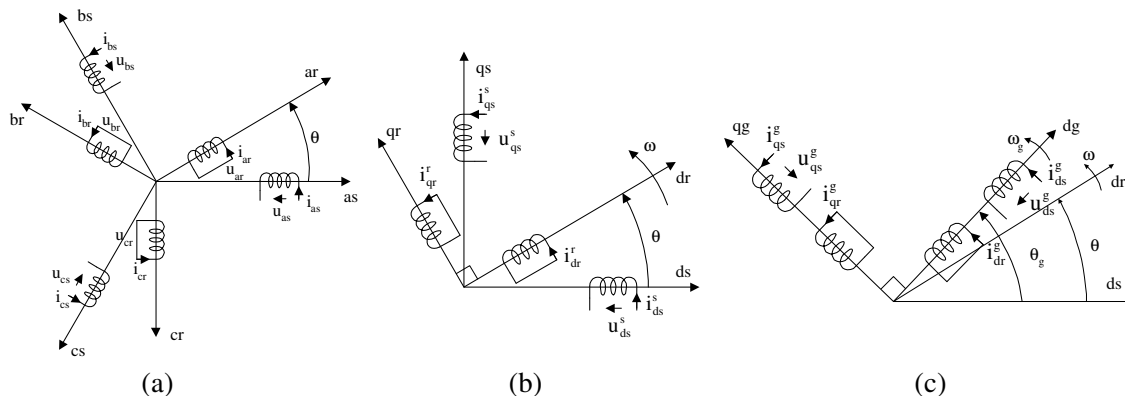


Figura 2. Transformada de *Clark* - de (a) para (b) e transformada de *Park* - de (b) para (c).

O quarto módulo realiza a transformação dos sistemas trifásicos de tensões e de intensidades das correntes nos sistemas bifásicos que lhes são equivalentes do ponto de vista magnético, com as suas componentes em quadratura *dq* e faz a mudança de referencial

entre o rotor e o estator ou outro, com base no ângulo  $\theta_g$ , entre os referenciais, fornecido em formato digital de 12 *bits*. Estas duas operações são habitualmente designadas por transformadas de *Clark* e *Park*, esquematizadas na figura 2, sendo a aplicação sucessiva descrita pela equação (1), na qual a variável  $x$  representa quer a tensão quer a intensidade de corrente.

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta_g & \cos\left(\theta_g - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_g + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta_g & -\sin\left(\theta_g - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_g + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

O núcleo deste módulo é baseado em dois circuitos integrados específicos da *Analog Devices*, *AD2S100*, um para as tensões e outro para as correntes.

No desenvolvimento das especificações do sistema desenvolvido, um dos critérios fundamentais é o da largura de banda proporcionada aos sinais recolhidos em face dos dois aspectos essenciais: o conteúdo relevante dos mesmos distribuídos em frequência e a frequência de amostragem a usar no sistema de aquisição. Se em algumas tarefas de medição é suficiente e apenas deve ser contemplado o conteúdo da frequência fundamental dos sinais, noutras aplicações tal é manifestamente insuficiente comprometendo até o seu bom desempenho. São os casos do estudo da composição harmónica dos sinais e das tarefas de identificação paramétrica nas quais o conteúdo harmónico de ordens relativamente elevadas pode assumir um carácter essencial. Assim, adoptou-se uma concepção do módulo de filtragem com a frequência superior da banda passante regulável de 1Hz a 15kHz através de uma onda quadrada TTL proveniente de um gerador de sinais ou de um *clock* interno.

### 3. Resultados experimentais

Os resultados experimentais apresentados a seguir foram obtidos com um motor de indução trifásico de potência e velocidade nominais 3KW e 1430rpm, respectivamente, alimentado através do conversor de frequência *ACS-601-0006-3* da *ABB*.

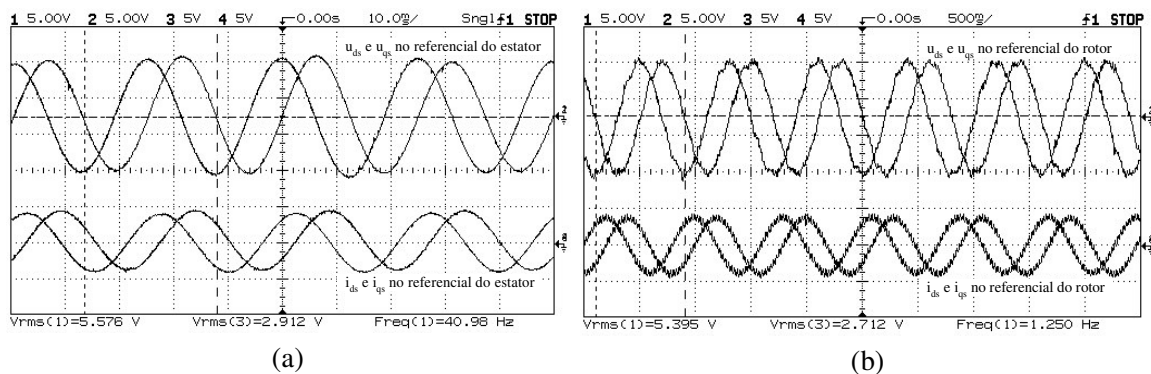


Figura 3. Componentes directa e em quadratura dos fasores da tensão e corrente do estator, no referencial: (a) do estator e (b) do rotor. Motor alimentado a 40Hz e frequência de corte igual 50Hz.

Os sinais ilustrados, foram adquiridos com o osciloscópio digital *HP54601B* com interface de comunicação *RS-232* e o *software HP Benchlink Scope* e as figuras apresentadas ilustram algumas das potencialidades do sistema implementado.

A figura 3 foi adquirida com o motor alimentado à frequência de 40Hz, binário de carga igual a 14Nm e a frequência de corte dos filtros programada para 50 Hz. Como se pode verificar na figura 3(b), a frequência dos sinais no referencial do rotor é muito baixa, cerca de 1,3Hz para o valor do binário de carga imposto e diminui com a diminuição deste por diminuição do deslizamento, enquanto que no referencial do estator a frequência dos sinais é a da alimentação do motor, como mostra a figura 3(a).

No caso da figura 4, os sinais foram adquiridas com a frequência de corte dos filtros igualmente programada para 50Hz, mas com o motor alimentado à frequência de 10Hz, e sem carga aplicada.

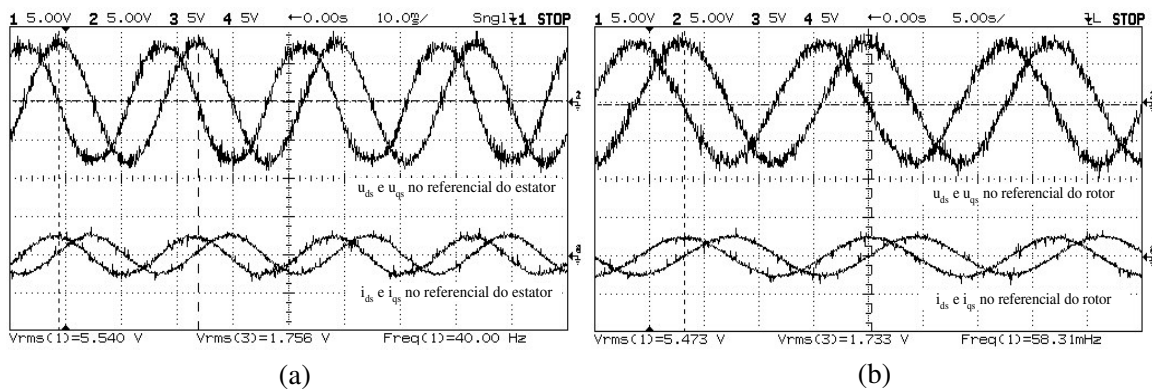


Figura 4. Componentes directa e em quadratura dos fasores da tensão e corrente do estator, no referencial: (a) do estator e (b) do rotor. Motor alimentado a 10Hz e frequência de corte igual 50Hz.

Na figura 5, com o motor alimentado de novo à frequência de 40Hz, mas continuando em vazio, a frequência de corte dos filtros foi programada para 3kHz. Como se pode constatar através da análise da figura 5(b), comparativamente com a figura 3(b), com o motor agora em vazio e em consequência o deslizamento no seu valor mínimo, a frequência dos sinais no referencial do rotor reduz-se a cerca de 0,4Hz enquanto que com um binário de carga igual a 14Nm a sua frequência era cerca de 1,3Hz.

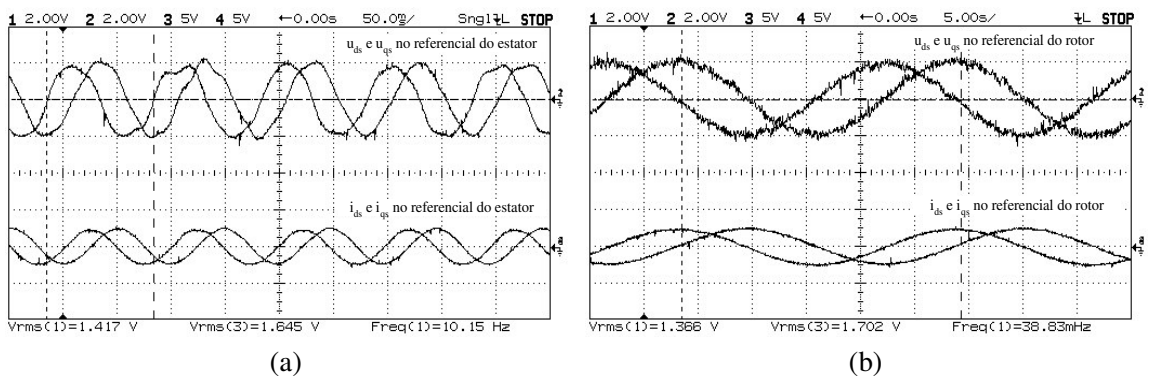


Figura 5. Componentes directa e em quadratura dos fasores da tensão e corrente do estator, no referencial: (a) do estator e (b) do rotor. Motor alimentado a 40Hz e frequência de corte igual 3kHz.

Por outro lado, verifica-se também pela análise da figura 5(a) que o conteúdo harmónico introduzido pelo conversor até à frequência de 3kHz, nas condições do teste, não é muito significativo o que já não se observaria se a frequência de corte fosse aumentada para 4kHz ou superior. Efectivamente, com a componente fundamental (frequência de alimentação do motor) igual a 40Hz, o conteúdo harmónico acima de 3kHz é bastante significativo e a sua análise diferenciada torna-se possível por este ajuste da frequência de corte.

#### 4. Conclusões

Foi apresentado um sistema electrónico de condicionamento e processamento de sinais, que permite captar os sinais de tensão e intensidade de corrente que alimentam o motor de indução trifásico, isolados, condicionados e filtrados para monitorização em tempo real, ou armazenamento e posterior processamento, potenciando diversificadas aplicações de elevado interesse didáctico e científico.

O sistema permite visualizar os sinais de potência antes e depois da filtragem *anti-aliasing*, devidamente adaptados e isolados, bem como obter a posição do rotor através de um codificador incremental. Após o processamento, por aplicação das transformadas de *Clark* e de *Park*, os sinais de tensão e de intensidade de corrente podem ser visualizados no referencial fixo do estator. Através da obtenção da posição rotórica é também possível referir os mesmos sinais ao referencial do rotor e abrir novas perspectivas de aplicação que podem ainda ser amplamente alargadas uma vez que os sinais podem ser referidos a um referencial geral bastando, para isso, dispor do respectivo ângulo de rotação, como por exemplo o do campo girante.

Assim, com este conjunto de sinais, ou parte deles, torna-se possível desenvolver novos módulos e alargar a utilização do sistema a aplicações que requerem a estimação e monitorização, em tempo real, de diversas grandezas electromagnéticas e mecânicas como por exemplo, tensões, correntes e fluxos, referidas a diferentes referenciais, deslizamento, velocidade/posição, binários, potências, bem como desenvolver novos módulos de monitorização e estimação paramétrica, diagnóstico e verificação de condições de funcionamento como sugerido em [2] e [3].

#### Referências

- [1] Vicente Leite, Henrique Teixeira, Rui Araújo e Diamantino Freitas, *Interface para Condicionamento das Tensões e Correntes à Saída de Conversores de Frequência*, Actas das 6.<sup>as</sup> Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica, EDINOVA, vol. 4, pp. 195-202, Lisboa, 7- 9 de Julho de 1999.
- [2] Peter Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*, Oxford Science Publications, 1993.
- [3] Rui Araújo, Diamantino Freitas e José Gonçalves, *An Instrument for Measurement of Induction Motor drives Based on Phasor and Modelling Techniques*, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 14, nº 3, pp. 704-711,1999.