

# O Motor de Indução Trifásico para Tracção Eléctrica

Manuel Vaz Guedes

Doutor Eng. Elect. UP)

Prof. Associado (FEUP)

## resumo

Como o motor de indução para tracção eléctrica é alimentado por um conversor electrónico de potência, precisa de ser estudado e projectado atendendo às novas condições de funcionamento.

## summary

*As the three-phase induction motor for electric traction is fed by an power electronic inverter, it needs to be studied and to be designed attending to the new operation conditions.*

Brevemente começarão a circular em Portugal veículos para tracção diesel-eléctrica e eléctrica, automotoras e locomotivas, accionados por motores de indução trifásicos. Abandona-se, assim, a conhecida e muito experimentada tecnologia de accionamento com motores eléctricos de colector de lâminas, quer alimentados em corrente contínua, quer alimentados em corrente alternada, de frequência reduzida, ou de frequência industrial [1].

Embora o motor de colector de lâminas, com excitação do tipo série, apresente excelentes características de funcionamento para tracção eléctrica, os seus aspectos construtivos e, essencialmente, os problemas provocados pela presença do colector de lâminas tornaram necessária a sua substituição. As despesas de manutenção que este motor acarreta, e os problemas técnicos que cria, não são compatíveis com as modernas condições de exploração das redes de transporte ferroviário, ou, mesmo, rodoviário.

Também o desenvolvimento dos novos elementos de electrónica de potência, como o tiristor GTO, e o aparecimento de novas estratégias de controlo do motor de indução trifásico, como o controlo vectorial, permitiram obter características de funcionamento, essencialmente as características electromecânicas,  $T(I)$  e  $n(I)$ , análogas às características de funcionamento do motor de colector de lâminas com excitação do tipo série.

A necessidade do motor de indução trifásico ser controlado por um conversor electrónico, obriga a que a forma de onda das grandezas de alimentação não seja

sinusoidal, e por isso o regime de funcionamento deste tipo de motor afasta-se daquele em que é tradicionalmente usado; o que tem influência sobre os aspectos construtivos dos motores de indução projectados para uma utilização em tracção eléctrica [2]. Mas, também, os parâmetros característicos do motor, cujo valor depende fortemente dos aspectos construtivos, influenciam grandemente o projecto do conversor electrónico.

Assim, o projecto dos motores de indução trifásicos utilizados em tracção eléctrica tem particularidades relevantes, que impõe que a sua realização seja assistida pelas modernas técnicas computacionais de análise do campo magnético, e por técnicas de optimização matemática.

## Tracção com Accionamento Trifásico

Um veículo para tracção apresenta uma característica de esforço resistente,  $R(v)$ , típica, com um valor do esforço de arranque elevado e com uma variação de velocidade ampla entre duas paragens. Para o motor de indução trifásico poder corresponder a estas solicitações necessita de uma família de características de funcionamento que permitam obter um esforço de tracção com o valor necessário e constante e com uma variação suave. É, por isso, necessário alterar os parâmetros da tensão de alimentação do motor, amplitude e frequência, para se conseguir a família de características necessária.

A característica mecânica do motor de indução trifásico

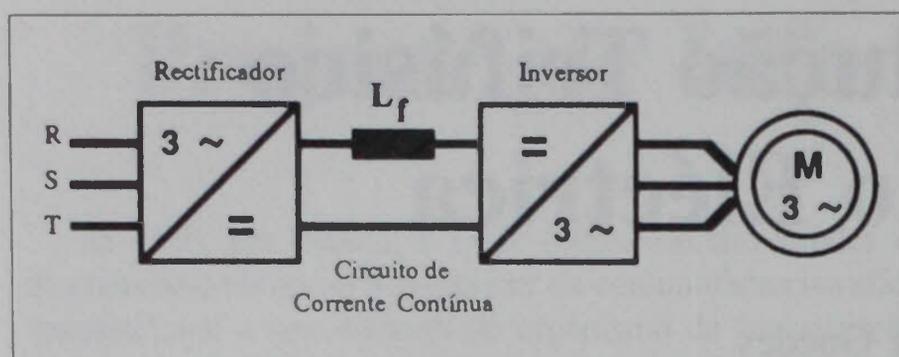


Fig. 1 - Esquemas de blocos do conversor

apresenta, ainda, a particularidade de ser fortemente inclinada nas proximidades da velocidade de sincronismo. No momento da perda de aderência das rodas motoras, e da conseqüente entrada em patinagem, o binário motor disponível diminui de valor, o que permite uma recuperação da aderência. No entanto, esta tendência natural não se aplica à família de características resultante da variação dos parâmetros da tensão de alimentação, pelo que se utilizam dispositivos anti-patinagem nos veículos para tracção com motores de indução trifásicos.

A aplicação do motor de indução trifásico no accionamento de veículos para tracção carece assim de um sistema de alimentação e controlo do motor que crie uma tensão de alimentação com parâmetros variáveis. Independentemente do tipo de tensão da rede eléctrica de alimentação em energia do veículo, tensão contínua ou alternada monofásica, o conversor electrónico de alimentação e controlo do motor deve criar um sistema de tensões trifásico.

O conversor estático de alimentação, do tipo inversor, é construído com elementos semicondutores de estado sólido de comutação forçada. É normal utilizar uma "ligação de corrente contínua", isto é, a tensão de alimentação da rede é, num primeiro estágio, transformada de forma a constituir uma baixa tensão de corrente rectificadora e filtrada na entrada para o inversor.

Este sistema conversor electrónico é responsável pela circulação, para montante, de uma corrente eléctrica com uma forma de onda rica em termos harmónicos que são susceptíveis de causar perdas eléctricas e perturbações radio-eléctricas nas instalações vizinhas da via seguida pelos veículos. O sistema conversor fornece um sistema trifásico de tensões com uma forma de onda distorcida em relação à onda sinusoidal. Por isso, o motor de indução trifásico vai ser alimentado por uma forma de onda diferente da sinusóide, com termos harmónicos de ordem ímpar.

Da presença do conversor electrónico resulta que a rede eléctrica alimentará uma carga variável, a instalação eléctrica do veículo, que apresenta um factor de potência condicionado pelo regime de funcionamento do conversor, e que apresenta uma forte poluição harmónica. O motor eléctrico de indução será alimentado por uma onda distorcida com amplitude e frequência variável.

A obtenção das características da onda de alimentação do motor necessárias, em cada instante, para desenvolver o binário motor requerido pelo serviço de tracção do veículo, é feita mediante a adopção de uma estratégia de controlo do funcionamento do inversor. Esta estratégia passa pela definição de um modo de controlo e pela sua execução através de um circuito lógico, normalmente envolvendo um microprocessador, e que estabelece o instante de entrada em condução dos tiristores. Hoje, com a utilização de tiristores GTO (gate turn off) também o momento da passagem ao estado de não condução é controlado [3].

## O Motor de Indução Trifásico

O motor de indução utilizado no accionamento dos veículos para tracção é uma máquina eléctrica assíncrona com um circuito rotórico do tipo "gaiola de esquilo". Como a onda da tensão de alimentação é rica em termos harmónicos, o funcionamento do motor de indução vem afectado pelo aumento das perdas eléctricas e magnéticas, pela existência de binários harmónicos, do tipo binário de frenagem ou binário motor, e ainda, pela possibilidade dos vários termos harmónicos de ordem diferente criarem binários de oscilação pendular.

O motor de indução trifásico, com rotor em curto-circuito, é uma máquina eléctrica com um aspecto construtivo simples. O circuito magnético é formado por um empacotamento de chapa magnética. No circuito magnético estatórico existem ranhuras, onde está distribuído um enrolamento trifásico, em fio de cobre isolado, capaz de criar uma força magnetomotriz girante, com uma velocidade de rotação dada pela expressão de sincronismo.

O circuito magnético rotórico está solidário com o veio da máquina e tem ranhuras fechadas onde existe um circuito eléctrico formado por barras de cobre, ou de alumínio, curto-circuitadas nas extremidades por anéis do mesmo material. Devido à velocidade relativa entre o campo magnético no entreferro e os condutores rotóricos vão-se induzir forças electromotrizes nos condutores do circuito rotórico, e como eles formam um circuito fechado, são percorridos por correntes eléctricas de valor elevado. A presença dessas correntes eléctricas no campo magnético indu-tor dá origem ao aparecimento de um binário que provoca o movimento do rotor, com uma velocidade ligeiramente inferior à velocidade do campo magnético [4].

Para que o motor de indução trifásico possa apresentar as características de funcionamento necessárias à tracção, é necessário que o conversor electrónico de potência tenha a capacidade de variar os parâmetros do

sistema de tensão de alimentação. Dessa forma, desprezando a queda de tensão na impedância de fugas do circuito estatórico, pode-se considerar que o fluxo magnético no motor é proporcional à razão entre a tensão de alimentação e a frequência, e o binário electromecânico é proporcional ao fluxo indutor e à corrente eléctrica nos condutores do rotor.

Variando a frequência do sistema de tensões de alimentação de tal forma que se mantenha constante a razão entre a amplitude e a frequência, isto é, mantendo o fluxo magnético indutor constante, consegue-se que o binário motor seja constante; atingido o valor nominal da tensão de alimentação pode-se variar a frequência da alimentação de tal forma que a potência fornecida pelo motor é constante.

Este regime de alimentação do motor com uma forma de onda rica em termos harmónicos, com amplitude e frequência variáveis, cria vários problemas ao funcionamento do motor e tem influência nos aspectos construtivos do motor de indução trifásico.

A presença de termos harmónicos na forma de onda da

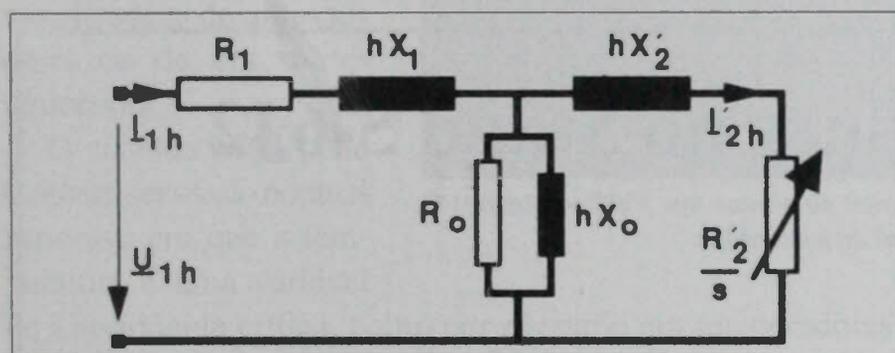


Fig. 2 - Circuito equivalente de ordem  $h$

tensão de alimentação provoca a distorção da forma de onda da corrente eléctrica e do fluxo magnético, o que cria perdas suplementares eléctricas e magnéticas. Também surgem binários parasitas, motores ou de frenagem, o que depende do seu sentido de rotação, provocados pelos harmónicos, com a mesma ordem, da corrente e do fluxo. A acção simultânea de termos harmónicos de diferentes ordens, na corrente eléctrica e no fluxo, é responsável pelo aparecimento de binários de oscilação pendular.

No projecto do motor de indução trifásico existem várias grandezas que definem o dimensionamento do motor. Assim, o binário máximo desenvolvido no arranque define a potência do motor; os semicondutores estabelecem a máxima tensão de alimentação; e os valores da frequência, tensão e potência para a velocidade máxima ajudam a definir a indutância de fugas.

O motor de indução trifásico para tracção eléctrica é projectado para ser alimentado por um sistema de tensões trifásico, e, para evitar a circulação do terceiro harmónico, tem os enrolamentos das fases do estator em

estrela. O número de polos é normalmente seis, porque assim fica reduzido o valor do passo polar e fica reduzido o tamanho das cabeças das bobinas do enrolamento estatórico. Só em casos onde se prevê que o motor terá de funcionar com um campo indutor baixo é que o número de polos é quatro.

Associado ao motor existe sempre um redutor mecânico, que pode ser simples ou duplo, conforme o valor da velocidade de rotação prevista para o motor e da velocidade linear máxima prevista para o veículo. Fixada a razão de redução e conhecida a velocidade máxima do motor, conseqüentemente está determinada a frequência máxima do sistema de tensões a criar pelo inversor.

Um valor pequeno para a indutância de fugas é umas das preocupações constantes do projectista. Uma forma de controlar, na fase de projecto, esse valor é através da análise computacional do campo magnético da máquina. A partir dessa análise é possível determinar os termos harmónicos da forma de onda da distribuição da indução magnética no entreferro da máquina; o que permite detectar os harmónicos devidos ao efeito de ranhura e à saturação de partes do circuito magnético. A partir do valor da força electromotriz induzida é possível calcular o valor da indutância de fugas. A vantagem da análise computacional do campo magnético reside na possibilidade do ensaio numérico de diferentes soluções construtivas.

O valor da indutância de fugas pode ser alterado através do dimensionamento da largura do entreferro, da inclinação das ranhuras, do número de condutores em série por ranhura ou através do número total de ranhuras. Este valor tem de ser elevado para serem atenuados os harmónicos devidos às ranhuras.

No dimensionamento da indutância de fugas atende-se, ainda, ao tipo de inversor utilizado: inversor de tensão ou inversor de corrente. Para este último tipo de inversores interessa que a indutância de fugas seja baixa para não agravar o problema da comutação dos tiristores no inversor.

Como o circuito estatórico do motor vai ser alimentado com uma forma de onda rica em termos harmónicos é necessário considerar que os condutores vão ser percorridos por correntes eléctricas com frequência elevada, o que se traduz por um aumento das perdas no cobre, e a impossibilidade de considerar linear o comportamento deste circuito eléctrico. Tem, por isso, de se abandonar o estudo através do circuito equivalente da figura 2. Também o enrolamento estatórico terá de ser construído com mais camadas, e com outra altura para o condutor, desde que se preveja a existência de efeito pelicular, devido aos harmónicos de mais alta frequência.

O desenho do circuito rotórico, e a escolha do respec-

tivo material, é condicionada por um valor do binário de arranque do motor, o que, devido ao funcionamento controlado por um conversor electrónico, não tem uma importância relevante para este tipo de motor.

O aumento das perdas eléctricas e magnéticas do motor de indução associado a um conversor electrónico de potência traduz-se por um maior aumento do aquecimento da máquina e por um maior cuidado com os materiais isolantes utilizados. Normalmente utilizam-se produtos isolantes de impregnação da classe F ou H.

Note-se, finalmente, que o valor dos parâmetros do motor de indução têm influência no funcionamento do conversor electrónico. Pelo que têm de se efectuar estudos de optimização de parâmetros para compatibilizar os diferentes componentes do sistema de accionamento.

## Conclusão

Vem aumentando a utilização do motor de indução trifásico no accionamento dos veículos motores para tracção eléctrica. Trata-se de um motor robusto, com pouca manutenção e com facilidades de controlo através

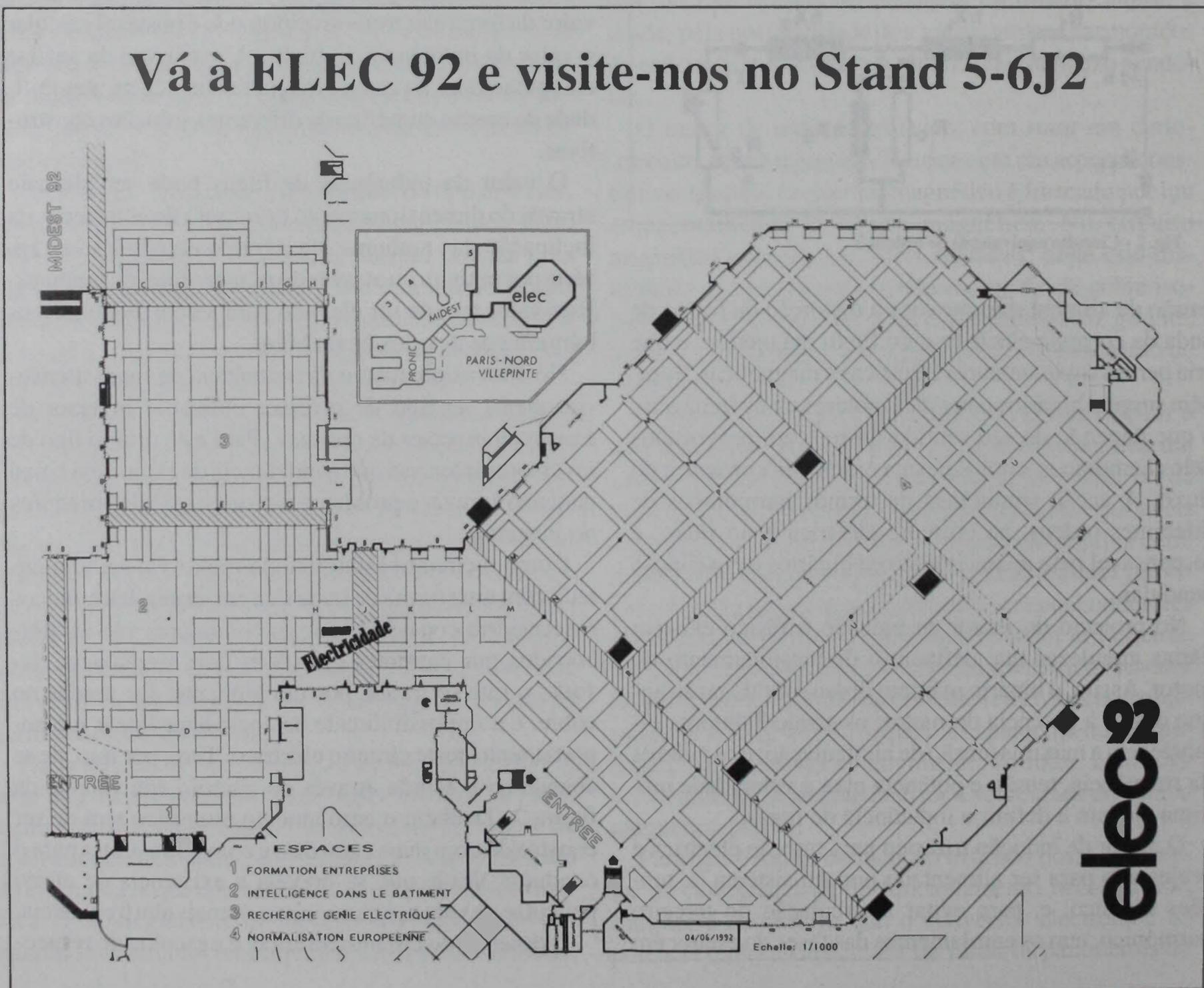
da amplitude e da frequência da forma de onda da alimentação.

Neste artigo apresentaram-se alguns dos problemas do motor de indução trifásico para tracção, porque, devido às características especiais deste tipo de utilização, este motor necessita de ser estudado e projectado atendendo às condições de funcionamento diferentes das usuais. ■

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carlos Castro Carvalho, *Motores Monofásicos Série de Colector*, dissertação de doutoramento, Porto 1960.
- [2] Manuel Vaz Guedes, *Máquinas Eléctricas para Veículos de Tracção com Accionamento Trifásico*, Seminário Tracção Eléctrica - 90, FEUP 1990.
- [3] Manuel Vaz Guedes, *O Tiristor GTO*, *Electricidade*, nº 276, p. 113, 1991.
- [4] Paul L Cochran, *Polyphase Induction Motors - analysis, design and application*, Marcel Dekker 1989.

## Vá à ELEC 92 e visite-nos no Stand 5-6J2



**elec 92**