

O motor série em tracção eléctrica.

Análise comparativa do ponto de vista do binário

CARLOS MANUEL PEREIRA CABRITA

Eng.^o Electrotécnico (I. S. T.)

Assistente (I. S. T.)

RESUMO

Apresenta-se um estudo comparativo das características de funcionamento dos motores shunt e série, evidenciando-se as excelentes qualidades deste último motor para a tracção eléctrica.

São igualmente deduzidas e analisadas as expressões do valor instantâneo e do valor médio do binário do motor série de tracção operando em corrente contínua, em corrente monofásica, em corrente ondulada e sob tensão ondulada.

1 — O MOTOR SÉRIE COMO MOTOR DE TRACÇÃO POR EXCELENCIA

Há sensivelmente uma centena de anos, ao pensar-se na aplicação da electricidade ao caminho de ferro, surgiu concerteza a questão de qual haveria de ser o tipo ideal de motor de tracção a utilizar, tendo sido o motor de corrente contínua com excitação série, por ser uma máquina com uma grande maleabilidade de características, obedecendo aos requisitos exigidos, o motor escolhido.

De facto, o motor série impôs-se universalmente, tanto na tracção em corrente contínua como na tracção em corrente monofásica, devido à sua superioridade em relação aos restantes tipos de motores, como se verá na análise que a seguir se apresenta onde se comparam qualitativamente as características de exploração de um motor série com as de um motor shunt, de construção idêntica (o mesmo estator e o mesmo induzido), e com coincidência dos pontos de funcionamento em regime nominal.

Se bem que os modernos processos de regulação da tensão, tornados realidade pelo emprego dos tiristores de potência, permitam a utilização do motor com excitação separada, parece-nos interessante salientar que sendo de tal ordem importantes as vantagens do motor série, é dada àquele motor uma característica série, isto é, apesar da sua excitação ser separada ele funciona por assim dizer à imagem do motor série.

ABSTRACT

A comparison of characteristics of shunt and series motors is presented, showing the excellent qualities of the series motor for the electric traction.

The formulas of the instantaneous and mean values of the torque in direct-current, single-phase current, undulatory current and undulatory voltage series traction motors are also deduced and analysed.

1.1 — Características de binário

Dado que o binário M é proporcional ao produto do fluxo Φ pela corrente de alimentação I , enquanto que no motor shunt M é proporcional a I , pois o termo Φ é sensivelmente constante, uma vez que depende da tensão na linha, no motor série Φ é função crescente de I o que, para um funcionamento não saturado, faz com que M seja, em primeira aproximação, proporcional ao quadrado de I . Só com o motor francamente saturado é que o binário é proporcional à intensidade da corrente. Por conseguinte, o motor série é capaz, no arranque, de fornecer um binário superior ao do motor shunt, ou seja, para o mesmo valor do binário exigido naquele período, o pedido de corrente à rede por parte do motor série é inferior ao do motor shunt (fig. 1).

Constata-se ainda que para uma mesma variação do binário ΔM , a corrente pedida à rede pelo motor série sofre uma variação mais fraca que a do motor shunt. Por conseguinte, o motor série é a máquina mais indicada para trabalhar sob regimes com variações bruscas e frequentes da carga, bem como com arranques frequentes.

1.2 — Características mecânicas

Enquanto que no motor série a velocidade varia apreciavelmente com a carga, no motor shunt ela mantém-se

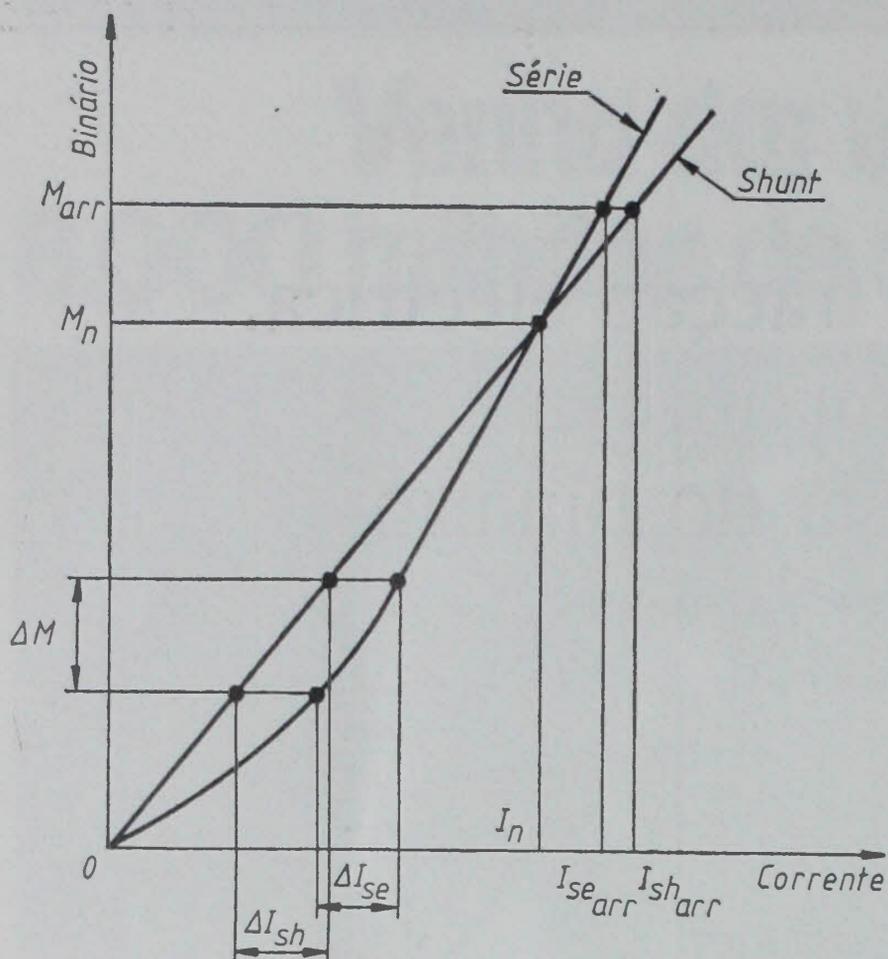


Fig. 1 — Características de binário dos motores shunt (sh) e série (se)
 Valores nominais: M_n, I_n
 Valores no arranque: $M_{arr}, I_{searr}, I_{sharr}$
 $I_{searr} < I_{sharr}$ e $\Delta I_{se} < \Delta I_{sh}$

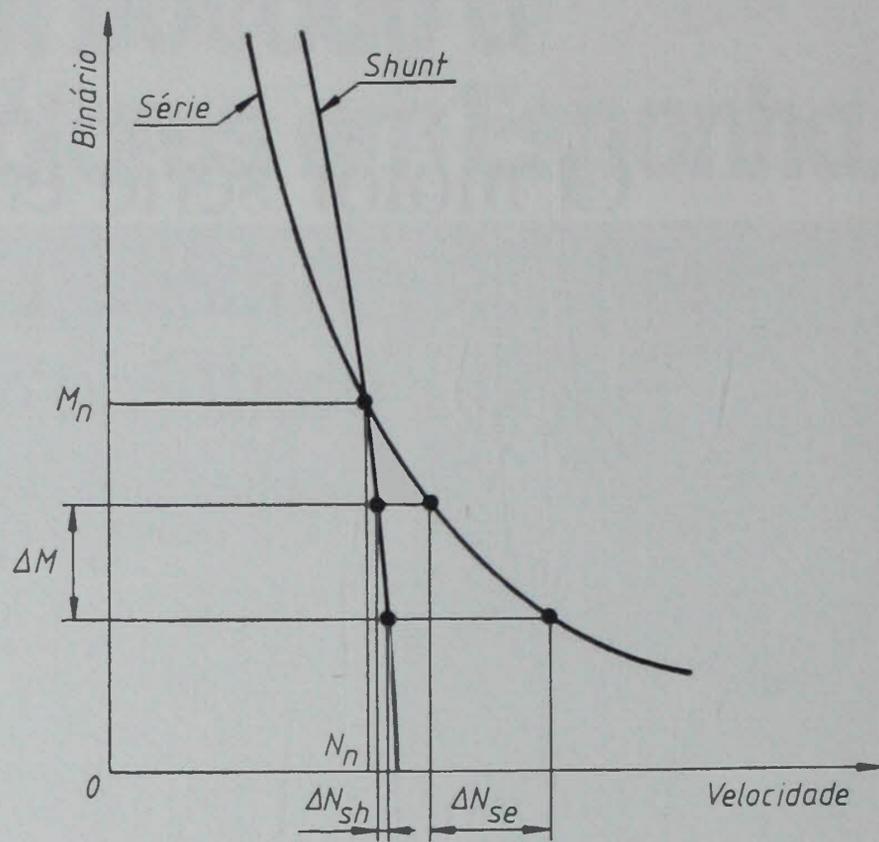


Fig. 2 — Características mecânicas dos motores shunt (sh) e série (se)
 Valores nominais: M_n, N_n
 $\Delta N_{sh} \approx 0$ e $\Delta N_{se} \gg \Delta N_{sh}$

sensivelmente invariante, sofrendo apenas uma pequena variação, compreendida entre 5 e 10 %, desde o vazio até à plena carga. Quer isto dizer que para uma mesma variação do binário ΔM , a velocidade do motor shunt mantém-se praticamente constante enquanto que a do motor série sofre uma variação bastante significativa, como se conclui da figura 2.

Por conseguinte, como o motor série funciona com uma velocidade que é tanto mais reduzida quanto maior for a carga, as variações da potência mecânica e consequentemente da potência eléctrica pedida pela máquina à rede, são de muito menor amplitude que as que se verificam no motor shunt, uma vez que a velocidade deste motor se pode considerar insensível às variações do binário.

Deste modo, e contrariamente ao motor shunt, o motor série presta-se a assegurar serviços variados, como sejam a tracção de comboios pesados a baixas velocidades ou de comboios ligeiros a altas velocidades (fig. 3 a). Além disso, nas linhas ferroviárias cujo traçado apresente perfis variados, e em que as cargas a rebocar são dimensionadas em função do declive da rampa máxima a vencer, a velocidade duma locomotiva equipada com motores série é maior em patamar que em rampa, ao passo que com motores shunt a sua velocidade seria em patamar sensivelmente igual à que teria em rampa (fig. 3 b).

Como se constata da figura 4, uma ligeira diferença entre os diâmetros das rodas motoras duma locomotiva altera as suas características mecânicas, só que com motores shunt o desvio da força de tracção ΔF_{sh} seria muito acentuado, correndo-se o risco de alguns deles funcionarem bastante sobrecarregados, enquanto que com motores série o desvio ΔF_{se} é muito mais fraco.

1.3 — Variação da tensão na rede

Nos regimes transitórios, enquanto que no motor shunt é o induzido a suportar praticamente só as variações de tensão, no motor série as variações de tensão aos terminais do induzido são muito mais fracas, devido à forte reactância do enrolamento indutor. Este facto torna o motor shunt mais sensível aos flashes, isto é, aos escorvamentos ao longo do colectore. Além disso, o binário do motor shunt depende, por intermédio do fluxo, da tensão na rede.

Constata-se ainda (fig. 5) que para uma mesma variação de tensão ΔU a correspondente variação da corrente ΔI é, no motor shunt, bastante maior que a verificada no motor série.

Conclui-se assim, da análise apresentada, que o motor série é utilizado na tracção devido aos seguintes factores:

- Possui um elevado binário de arranque;
- Para variações bruscas e importantes do binário, como é característico na tracção, as variações de corrente são as mais fracas possíveis;
- A sua velocidade varia acentuadamente com a carga;
- Presta-se para serviços variados de tracção (reboque de comboios pesados e de comboios ligeiros, em perfis variados, a velocidades diferentes);
- Para diâmetros ligeiramente diferentes das rodas motoras duma locomotiva as forças de tracção são muito iguais.

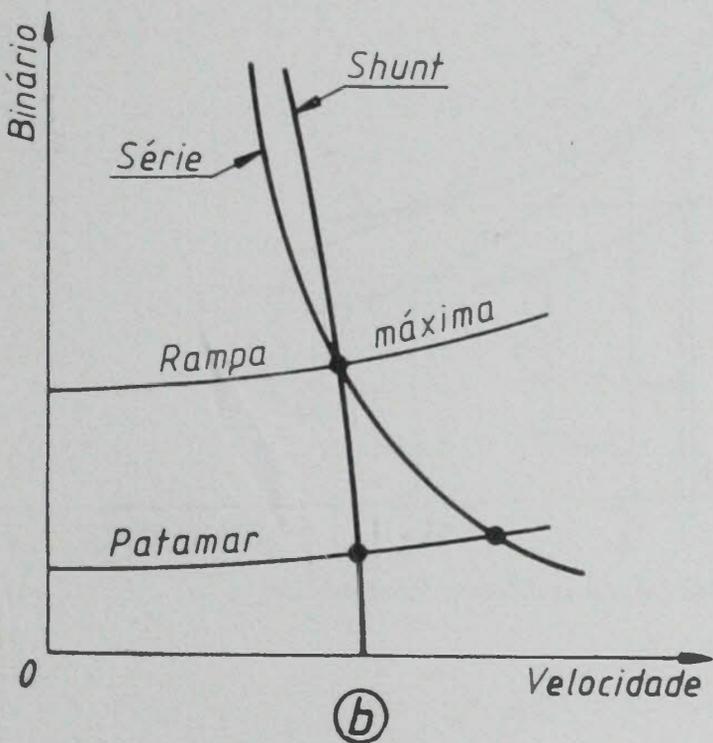
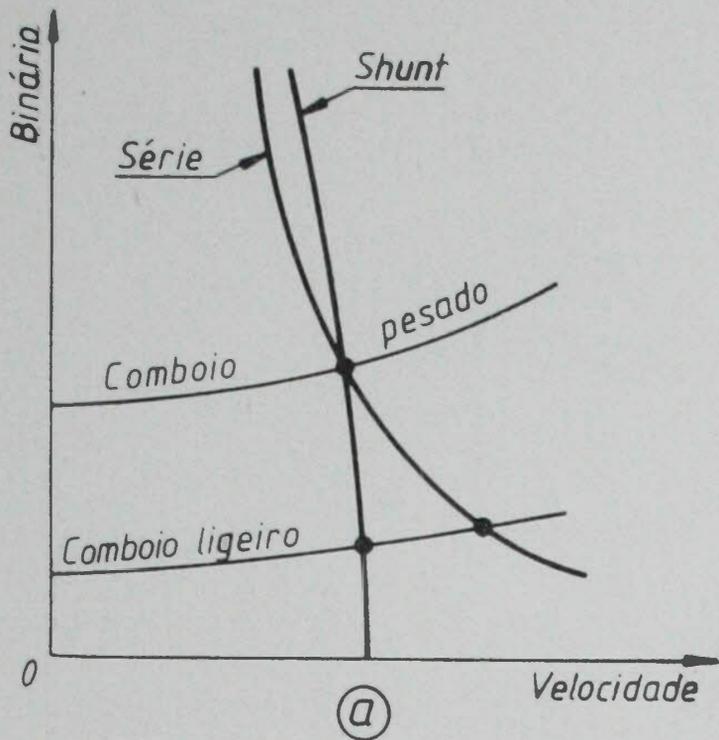


Fig. 3 — Velocidades dos motores shunt e série
a) Serviços variados
b) Perfis variados

2 — O BINÁRIO DO MOTOR SÉRIE NOS DIFERENTES SISTEMAS DE TRACÇÃO ELÉCTRICA

Nesta segunda parte analisar-se-á, sob o ponto de vista do binário, o comportamento do motor série de tracção nos diferentes sistemas de corrente.

À parte as perdas magnéticas e mecânicas, o valor instantâneo do binário m é dado, genericamente, pela expressão

$$m = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{c} n \phi i \quad (1)$$

sendo p o número de pares de pólos, c o número de pares de circuitos derivados do induzido, n o número total de condutores periféricos, ϕ o valor instantâneo do fluxo útil por pólo e i o valor instantâneo da corrente absorvida.

2.1 — Motor de corrente contínua

É o motor exclusivo da tracção em corrente contínua, sendo a variação da sua velocidade processada por controlo reostático. Atendendo a que a intensidade da corrente I bem como o fluxo Φ são invariantes no tempo, o binário também o será, sendo dado pela expressão

$$M = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{c} n \Phi I. \quad (2)$$

No entanto, prevemos que a substituição dos equipamentos reostáticos por conversores estáticos à base de tiristores se verifique a curto prazo na tracção em corrente contínua, pois as vantagens daí resultantes, e que a seguir se apresentam, são bastantes significativas:

- A tensão aplicada aos motores pode ser regulada continuamente desde zero até ao seu valor nominal;
- Os motores podem ser ligados permanentemente em paralelo, esquema mais vantajoso para reduzir as velocidades de embalamento nas patinhagens;
- Como as variações do binário se processarão de um modo contínuo a aderência pode ser utilizada em pleno, isto é, para um mesmo peso aderente o binário e a aceleração serão mais elevados;
- Maior fiabilidade no funcionamento, com intervalos entre manutenções mais alargados;
- Maior economia de energia, sobretudo nos veículos motores que efectuem arranques frequentes, uma vez que as perdas reostáticas são suprimidas.

Na figura 6 esquematiza-se o princípio de funcionamento do talhador («hacheur» em francês e «chopper» na literatura inglesa), que é um conversor estático que assegura a transformação directa corrente contínua-corrente contínua. Assim, sendo t_c o tempo de condução, T o período de cada ciclo e U_e a tensão contínua da catenária, o valor médio da tensão aplicada aos motores será

$$U_{med} = U_e \frac{t_c}{T} = U_e t_c f. \quad (3)$$

Como se conclui desta fórmula, a regulação da tensão pode ser efectuada por dois processos distintos:

- Fazer variar o tempo de condução t_c mantendo o período T constante; é o funcionamento a frequência constante;
- Fazer variar o período T mantendo o tempo de condução t_c constante; é o funcionamento a frequência variável.

A corrente no motor não é perfeitamente contínua mas sim ondulada, sendo a sua taxa de ondulação, dada pela expressão (4), tanto menor quanto maior for a indutância total do motor e quanto mais elevada for a frequência

$$\mu(\%) = \frac{100 \Delta I_M}{2 I_{M,med}}. \quad (4)$$

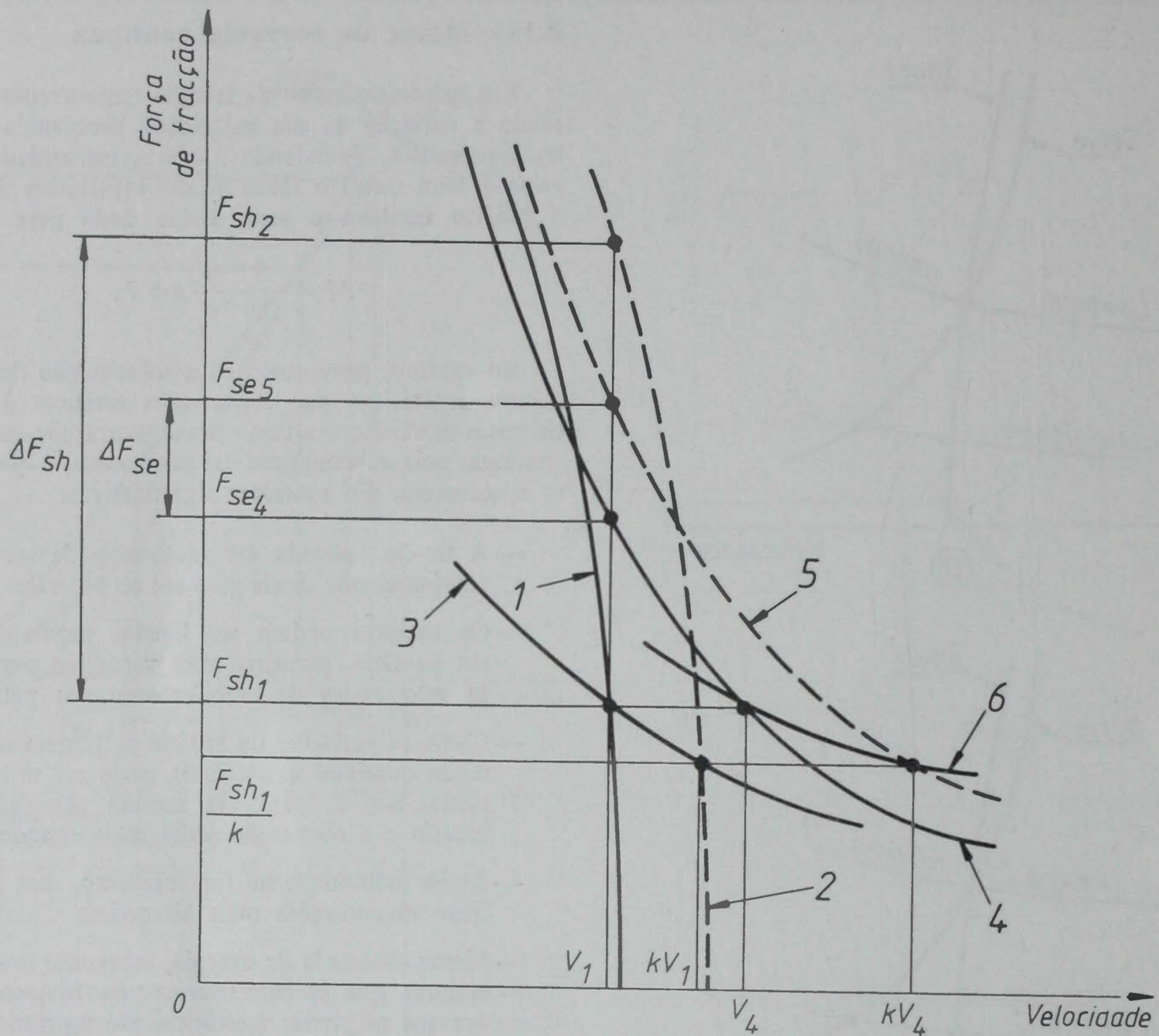


Fig. 4 — Alteração das características mecânicas quando os diâmetros das rodas motoras diferem ligeiramente

- | | | |
|-----------------------------------|--|--|
| Motores shunt | $\left\{ \begin{array}{l} 1 - \text{Diâmetro das rodas} = D \\ 2 - \text{Diâmetro das rodas} = kD > D \\ 3 - \text{Hipérbole da potência constante} \end{array} \right.$ | |
| Motores série | | $\left\{ \begin{array}{l} 4 - \text{Diâmetro das rodas} = D \\ 5 - \text{Diâmetro das rodas} = kD > D \\ 6 - \text{Hipérbole da potência constante} \end{array} \right.$ |
| $\Delta F_{sh} \gg \Delta F_{se}$ | | |

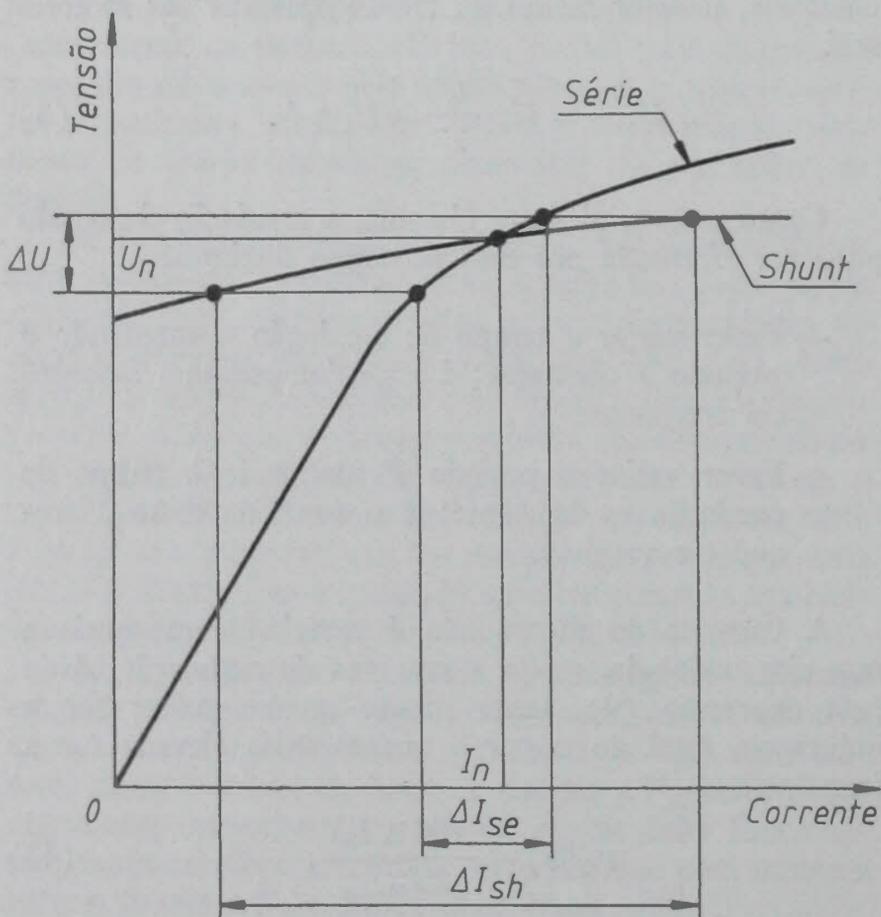
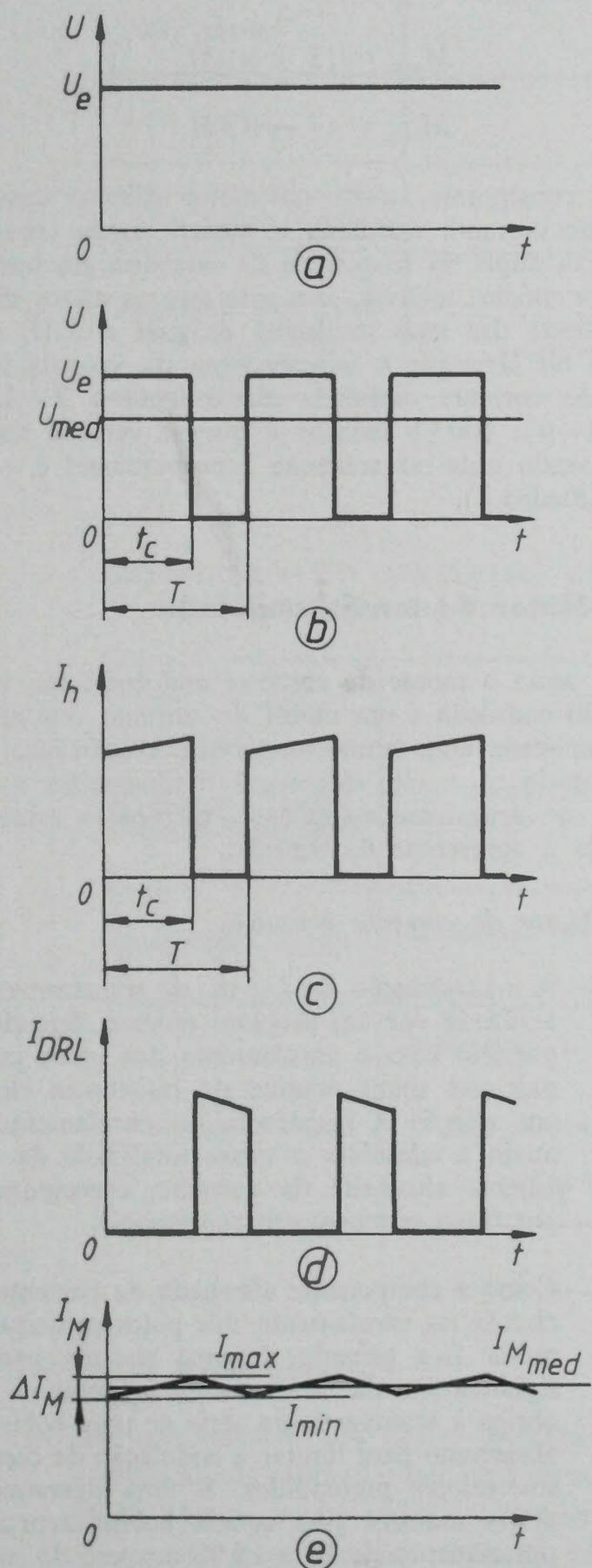
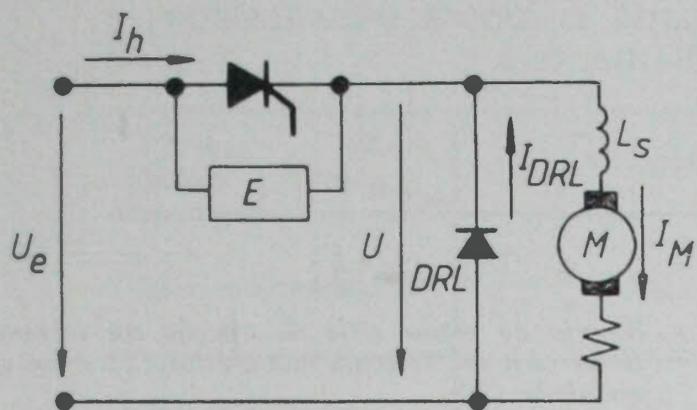


Fig. 5 — Comparação entre os pedidos de corrente à rede para uma mesma variação de tensão, nos motores shunt (sh) e série (se)

Valores nominais: U_n, I_n
 $\Delta I_{sh} \gg \Delta I_{se}$



Por conseguinte, o binário é igualmente ondulado sendo o seu valor médio dado pela expressão (2) desde que se considerem os valores médios do fluxo e da corrente.

2.2 — Motor monofásico (motor directo)

Tem sido o motor standard nas electrificações em corrente monofásica de frequência especial, isto é 11 000 V — 25 Hz nos Estados Unidos e 15 000 V — 16 2/3 Hz na Europa (Alemanha, Suíça, Áustria, Noruega e Suécia). É comumente designado por motor directo por utilizar directamente a corrente alternada da catenária, apenas a uma tensão transformada.

Devido à sua má comutação, mais propriamente à f. e. m. de transformação induzida nas secções em curto-circuito, o seu dimensionamento é tanto mais dificultado quanto mais elevada for a frequência, facto que contribuiu para o seu completo abandono ao fim de poucos anos na tracção à frequência industrial, apesar de terem sido tentadas várias soluções: utilização de dois motores por eixo, de motores com duplo induzido, de escovas divididas, de ligações resistentes e de enrolamentos imbricados duplos.

Nestes motores a variação da velocidade é efectuada a carga constante, por simples variação da tensão.

Sendo os valores instantâneos do fluxo útil por polo e da intensidade de corrente respectivamente

$$\phi = \sqrt{2} \Phi_{ef} \sin \omega t \quad (5)$$

$$i = \sqrt{2} I_{ef} \sin \omega t \quad (6)$$

o valor instantâneo do binário será

$$m = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{c} n \Phi_{ef} I_{ef} (1 - \cos 2\omega t). \quad (7)$$

Conclui-se deste modo que o binário é pulsatório, oscilando com uma frequência dupla da frequência da catenária em torno do seu valor médio

$$M = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{c} n \Phi_{ef} I_{ef} \quad (8)$$

e entre os limites (fig. 7)

$$M_{\max} = 2M = \frac{1}{\pi} \frac{p}{c} n \Phi_{ef} I_{ef}$$

$$e \quad M_{\min} = 0.$$

Fig. 6 — Princípio de funcionamento do talhador

E — Dispositivo de extinção

L_s — Bobina de alisamento

DRL — Diodo em roda livre

a) Tensão na rede

b) Tensão ao motor

c) Corrente no talhador

d) Corrente no DRL

e) Corrente no motor

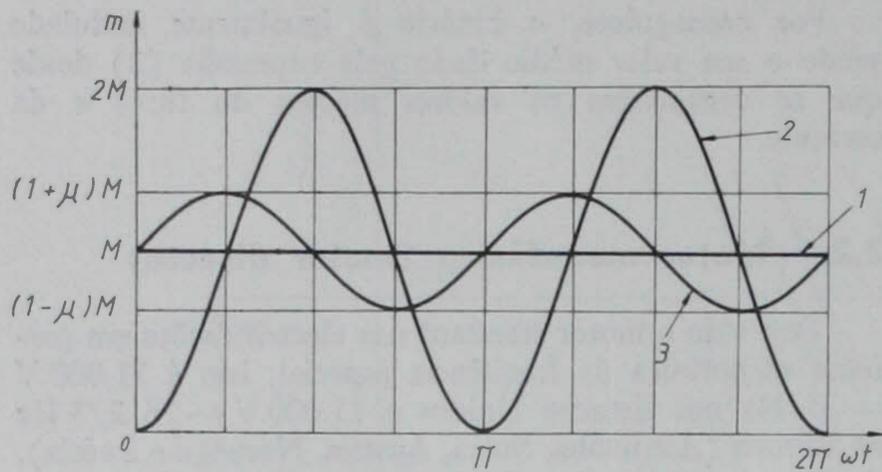


Fig. 7 — Binário do motor série na tracção em corrente contínua (1), em corrente monofásica (2) e em corrente ondulada (3)

2.3 — Motor de corrente ondulada

Actualmente é o motor de tracção por excelência à frequência industrial, sendo também já utilizado à frequência especial, como é o caso, por exemplo, da Suécia e dos Estados Unidos.

Na prática, este motor mais não é que um motor de corrente contínua alimentado a partir da catenária monofásica por intermédio de um conversor estático monofásico-contínua, sendo designado por motor de corrente ondulada pelo facto da corrente não ser exactamente contínua mas sim igual à soma duma componente contínua com uma componente alternada sinusoidal de frequência dupla da frequência da catenária e de amplitude I_2 ,

$$i = I_{\text{med}} + I_2 \text{ sen } 2\omega t$$

ou
$$i = I_{\text{med}} (1 + \mu \text{ sen } 2\omega t) \quad (9)$$

sendo $\mu = I_2/I_{\text{med}}$ o seu factor de ondulação.

A primeira utilização deste sistema remonta a 1951 quando a firma americana «Westinghouse» construiu duas poderosas locomotivas monofásicas a 11 000 V — 25 Hz de 6000 CV cada uma, destinadas à companhia «Pennsylvania Railroad», mais tarde «Penn Central», após a sua fusão com uma outra grande companhia, a New York Central. A conversão da corrente monofásica em corrente contínua era assegurada por rectificadores mono-anódicos de vapor de mercúrio, os ignitrões.

Nestes motores a f. e. m. de transformação é neutralizada ligando em paralelo com o enrolamento dos polos principais um shunt óhmico de modo a «desviar» a quase totalidade da componente alternada da corrente. Nestas circunstâncias o valor instantâneo do fluxo útil por polo será

$$\varphi = \Phi_{\text{med}} + \Phi_{2_{\text{res}}} \text{ sen } (2\omega t - \pi/2) \quad (10)$$

sendo $\Phi_{2_{\text{res}}}$ a amplitude da componente alternada residual, mas como $\Phi_{2_{\text{res}}} \ll \Phi_{\text{med}}$ pode-se considerar $\varphi = \Phi_{\text{med}}$.

O valor instantâneo do binário será assim

$$m = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{c} n \Phi_{\text{med}} I_{\text{med}} (1 + \mu \text{ sen } 2\omega t) \quad (11)$$

oscilando com uma frequência dupla da frequência da catenária em torno do seu valor médio

$$M = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{c} n \Phi_{\text{med}} I_{\text{med}} \quad (12)$$

e entre os limites (fig. 7)

$$M_{\text{max}} = (1 + \mu) M$$

e

$$M_{\text{min}} = (1 - \mu) M.$$

Por conseguinte, tanto no motor directo como no motor de corrente ondulada o binário oscila com uma frequência dupla da frequência da catenária em torno do seu valor médio; todavia, enquanto que no motor directo a amplitude das suas oscilações é igual a $2M$, sendo máxima no arranque e independente da velocidade, no motor de corrente ondulada ela é igual a $2\mu M$, ou seja, $(1-\mu) \cdot 100\%$ inferior à que se verifica naquele motor, sendo nula no arranque e proporcional à velocidade (Quadro I).

2.4 — Motor de tensão ondulada

Tal como o motor de corrente ondulada, um motor de tensão ondulada é um motor de corrente contínua ao qual é aplicada uma tensão monofásica rectificada. Existem contudo entre eles diferenças fundamentais no que respeita ao seu dimensionamento, diferenças essas que passamos a apresentar de seguida:

a) Motor de corrente ondulada

— A neutralização da f. e. m. de transformação é realizada por um processo estático, ligando em paralelo com o enrolamento dos polos principais um shunt óhmico de resistência elevada em relação à resistência do enrolamento, de modo a «desviar» a quase totalidade da componente alternada da corrente, conseguindo-se um fluxo praticamente contínuo;

— Como a componente alternada da corrente não circula no enrolamento dos polos principais, o motor fica privado de uma parcela bastante significativa da sua reactância total, o que obriga à montagem em série de uma bobina de alisamento para limitar a ondulação da corrente aos valores pretendidos. É uma desvantagem destes motores pois aquela bobina representa um aumento de 10 a 15% no peso do motor, sendo igualmente necessário dispor de espaço no veículo motor para a sua montagem.

QUADRO I

COMPARAÇÃO ENTRE O BINÁRIO DO MOTOR DE CORRENTE ONDULADA E O BINÁRIO DO MOTOR DIRECTO

<i>Binário</i> / <i>Motor</i>	<i>Corrente ondulada</i>	<i>Directo</i>
Valor instantâneo: m	$\frac{1}{2\pi} \frac{p}{c} n \Phi_{med} I_{med} \cdot (1 + \mu \text{sen } 2\omega t)$	$\frac{1}{2\pi} \frac{p}{c} n \Phi_{ef} I_{ef} \cdot (1 - \cos 2\omega t)$
Valor médio: M	$\frac{1}{2\pi} \frac{p}{c} n \Phi_{med} I_{med}$	$\frac{1}{2\pi} \frac{p}{c} n \Phi_{ef} I_{ef}$
Valor máximo	$(1 + \mu)M$	$2M$
Valor mínimo	$(1 - \mu)M$	0
Frequência das oscilações (f -freq. da rede)	$2f$	$2f$
Amplitude das oscilações $M_{max} - M_{min}$	$2\mu M$ nula no arranque proporcional à velocidade	$2M$ máxima no arranque independente da velocidade

QUADRO II

ORDENAÇÃO DO MATERIAL CIRCULANTE MOTOR EM EXPLORAÇÃO NA REDE ELECTRIFICADA DA CP, SEGUNDO OS TIPOS DOS MOTORES DE TRACÇÃO

<i>Tipo de motor</i>	<i>Material circulante motor</i>	<i>Sistema de corrente</i>
Corrente contínua (controlo reostático)	Automotoras Bo-Bo das unidades múltiplas eléctricas em serviço na linha suburbana de Lisboa, entre Cais-do-Sodré e Cascais	1500 V corrente contínua
Monofásico directo	Automotoras Bo-Bo das unidades triplas eléctricas da série 2000	
Corrente ondulada	Automotoras Bo-Bo das unidades triplas eléctricas da série 2100 Locomotoras Bo-Bo das séries 2500 e 2550 Locomotoras B-B da série 2600	25 000 V 50 Hz corrente monofásica

b) *Motor de tensão ondulada*

— Os enrolamentos dos polos principais e de comutação são shuntados por uma mesma resistência óhmica, sendo assim a neutralização da f. e. m. de transformação realizada, tal como nos motores directos, por um processo dinâmico. Com efeito, a corrente que circula no

enrolamento dos polos de comutação possui duas componentes, uma em fase e outra em atraso de 90° relativamente à corrente do induzido, destinando-se a primeira à neutralização da f. e. m. reactiva e a segunda à neutralização da f. e. m. de transformação. Esta solução é um pouco mais complexa do ponto de vista do dimensionamento que a adoptada nos motores de corrente ondulada;

— Como o shunt óhmico enfraquece apenas um pouco o campo principal, a reactância do enrolamento dos polos principais é praticamente toda aproveitada para limitar a ondulação da corrente, não sendo necessária a utilização de bobinas de alisamento. É esta a grande vantagem do motor de tensão ondulada, pela economia de peso e de espaço que ela representa, o que faz com que este motor não seja mais pesado que um motor de corrente contínua com as mesmas características.

Que tenhamos conhecimento, o único material circulante equipado com motores de tensão ondulada são as automotoras A1A-A1A das unidades múltiplas eléctricas Trans-Europ-Express (TEE), construídas pela casa suíça Oerlikon para os Caminhos de Ferro Federais Suíços e postas ao serviço em 1961 nas ligações rápidas Zurique-Gotardo-Milão e Milão Simplon-Paris. Por sinal, estas unidades foram o primeiro material quadricorrente do mundo, aptas para funcionarem nos quatro sistemas de corrente existentes na Europa, isto é, 1500 V e 3000 V corrente contínua e 15 000 V, 16 2/3 Hz e 25 000 V, 50 Hz corrente monofásica.

Nestes motores o binário é igualmente pulsatório, sendo o seu valor médio dado pela expressão

$$M = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{c} n (\Phi_{med} I_{med} + \Phi_{2ef} I_{2ef}). \quad (13)$$

Como conclusão pode-se afirmar que, do ponto de vista do binário, o motor de tensão ondulada corresponde à sobreposição de um motor de corrente contínua, caracterizado pelo primeiro termo, independente da velocidade,

$$M_1 = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{c} n \Phi_{med} I_{med} \quad (14)$$

com um motor directo, caracterizado pelo segundo termo, devido às componentes alternadas do fluxo e da corrente, sendo crescente com a velocidade,

$$M_2 = \frac{1}{2\pi} \frac{p}{c} n \Phi_{2ef} I_{2ef} : \quad (15)$$

Devido à contribuição deste segundo termo para o valor médio do binário, poder-se-á dizer que este motor é mais bem aproveitado que o motor de corrente ondulada.

No Quadro II é apresentada uma ordenação de todo o material circulante motor em exploração na rede electricificada da Companhia dos Caminhos de Ferro Portugueses, ordenação essa realizada segundo os tipos de motores de tracção que equipam esse material.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. M. P. CABRITA: *A comutação nos motores monofásicos de colector e causas do seu abandono à frequência industrial*; *Electricidade* 149, Março 1980, p. 122-130.
- [2] C. M. CABRITA: *A comutação do motor de corrente ondulada*; *Electricidade* 151, Maio 1980, p. 219-224.
- [3] C. M. PORTELA: *Máquinas Eléctricas*; I. S. T., 1973.
- [4] LEYVRAZ, DÜNNER: *Les moteurs de traction des rames électriques quadricourants Trans-Europ-Express RAe 1051-1054 des Chemins de Fer Fédéraux Suisses*; *Bulletin Oerlikon* 349/350, Dezembro 1962, p. 11-16.
- [5] R. BOILEAU: *Traction Électrique*; *Techniques de l'Ingénieur*.

RENOVAÇÃO DA ASSINATURA DE

Electricidade

energia - electrónica

envie cheque ou vale postal de 500\$00 à EDEL

R. D. Estefânia, 48-3.º, Esq.

1000 LISBOA