

Regulação da velocidade de uma máquina de corrente contínua de excitação independente

JOÃO SANTANA

Doutor Eng. Elect. (I.S.T.)

Secção de Máquinas Eléctricas (I.S.T.)

JORGE ESTEVES

Eng. Elect. (I.S.T.)

Secção de Máquinas Eléctricas (I.S.T.)

ELMANO MARGATO

Eng. Elect. (I.S.T.)

Laboratório de Electrónica (ISEL)

JOSÉ DELGADO

Eng. Elect. (I.S.T.)

CTT

resumo

Este artigo tem como objectivo a apresentação de um estudo sobre a regulação da velocidade de uma máquina de corrente contínua de excitação independente. O assunto não é inédito(*), no entanto a falta de publicações na literatura portuguesa dedicadas ao estudo da associação de Electrónica de Potência às Máquinas Eléctricas leva-nos à divulgação deste trabalho.

A realização deste estudo foi efectuada no âmbito da disciplina de Complementos de Máquinas Eléctricas do Curso de Engenharia Electrotécnica do Instituto Superior Técnico. A montagem e os ensaios experimentais deste trabalho pedagógico foram efectuados na Secção de Máquinas Eléctricas do Instituto Superior Técnico.

1. Introdução

O aparecimento dos semicondutores de potência comandados teve como primeiro impacto, no campo dos accionamentos eléctricos de velocidade variável,

abstract

In this paper, a study about the speed control of a separately excited D.C. machine is presented. The lack of portuguese-written literature on the association power electronic-electrical machines have given raise to the present paper.

This work was been developped in the subject of «Complementos de Máquinas Eléctricas» of the Electrical Engineering Course (I.S.T.). The experimental arrangement and tests was made in the «Secção de Máquinas Eléctricas» at the «Instituto Superior Técnico».

(*) Referências [1, 2, 3].

a substituição dos geradores de corrente contínua por fontes electrónicas com tensão de saída variável.

O conjunto formado pela associação de pontes de rectificação controladas à máquina de corrente

contínua de excitação independente realiza o «Ward-Leonard Estático». O objectivo deste trabalho é o estudo deste sistema.

Em regime permanente, a velocidade de um motor de corrente contínua é dada pela expressão:

$$N = \frac{U_a - R_a I_a}{K \Phi_f} \quad (1)$$

Com a variação da resistência R_a consegue-se o controlo da máquina. No entanto, preocupações de ordem energética e de facilidade de regulação desaconselham, na maior parte das situações, aquele tradicional método de variação de velocidade.

É sobre as variáveis tensão de entrada U_a e fluxo de excitação Φ_f que devemos actuar para regular o sistema.

Com fluxo de excitação nominal, a variação da tensão de zero até ao valor nominal permite variar a velocidade até ao valor que poderemos chamar de base. Mantendo a tensão nominal, a diminuição do fluxo de excitação permite estender o funcionamento para além daquele valor de base. Com este critério de actuação nas variáveis U_a e Φ_f , temos que, com a variação da tensão, o binário nominal se encontra disponível enquanto que a diminuição do fluxo se realiza com a potência nominal disponível.

Actualmente, as fontes de alimentação quer do circuito do induzido quer do indutor são realizadas recorrendo à utilização dos elementos semicondutores de potência. No sistema que vamos estudar o fluxo de excitação é mantido constante (ponte de rectificação a diodos) e assim a variável de entrada é a tensão aplicada ao induzido. Para gerar U_a , entre as diferentes soluções industrialmente utilizadas, escolheu-se a ponte de rectificação totalmente controlada.

Com a introdução da Electrónica de Potência no clássico domínio das Máquinas Eléctricas entre outras vantagens existe uma que vamos explorar: facilidade de controlo. Utilizando tiristores o controlo do sistema é transferido para a electrónica de baixa potência.

A velocidade de rotação do motor é a grandeza que vamos regular. A rapidez de resposta da fonte de alimentação, favorável ao comportamento dinâmico do sistema, determina que devemos tomar precauções relativamente à corrente de induzido. Assim, é habitual utilizar como protecção o controlo daquela corrente. A implementação das cadeias de retroacção da corrente e da velocidade são realizadas com o recurso às técnicas de servomecanismos de modo a

se determinar as condições de optimização do sistema, quer do ponto de vista do erro estático, quer da velocidade de resposta do conjunto.

2. Descrição do sistema de potência

A Electrónica de Potência torna possível a realização de fontes de alimentação que associadas às máquinas de corrente contínua permitem a variação da tensão numa forma rápida, contínua e quase sem perdas. Uma das montagens mais utilizadas é a ponte de rectificação controlada, que ligada a uma rede de tensão alternada estabelece à saída uma tensão de valor médio variável. A solução mais usual é a ponte de rectificação trifásica totalmente controlada (fig. 1).

Controlando o momento de disparo dos tiristores consegue-se variar o valor médio de U_a . Se admitirmos condução não-lacunar e reactância de comutação nula, o valor da tensão U_a em regime permanente é dado por:

$$U_a = U_o \cos \alpha \quad (2)$$

com
$$U_o = \frac{3 \sqrt{6}}{\pi} V.$$

A relação entre o sinal de comando α e a saída U_a é não linear, no entanto escolhendo um circuito

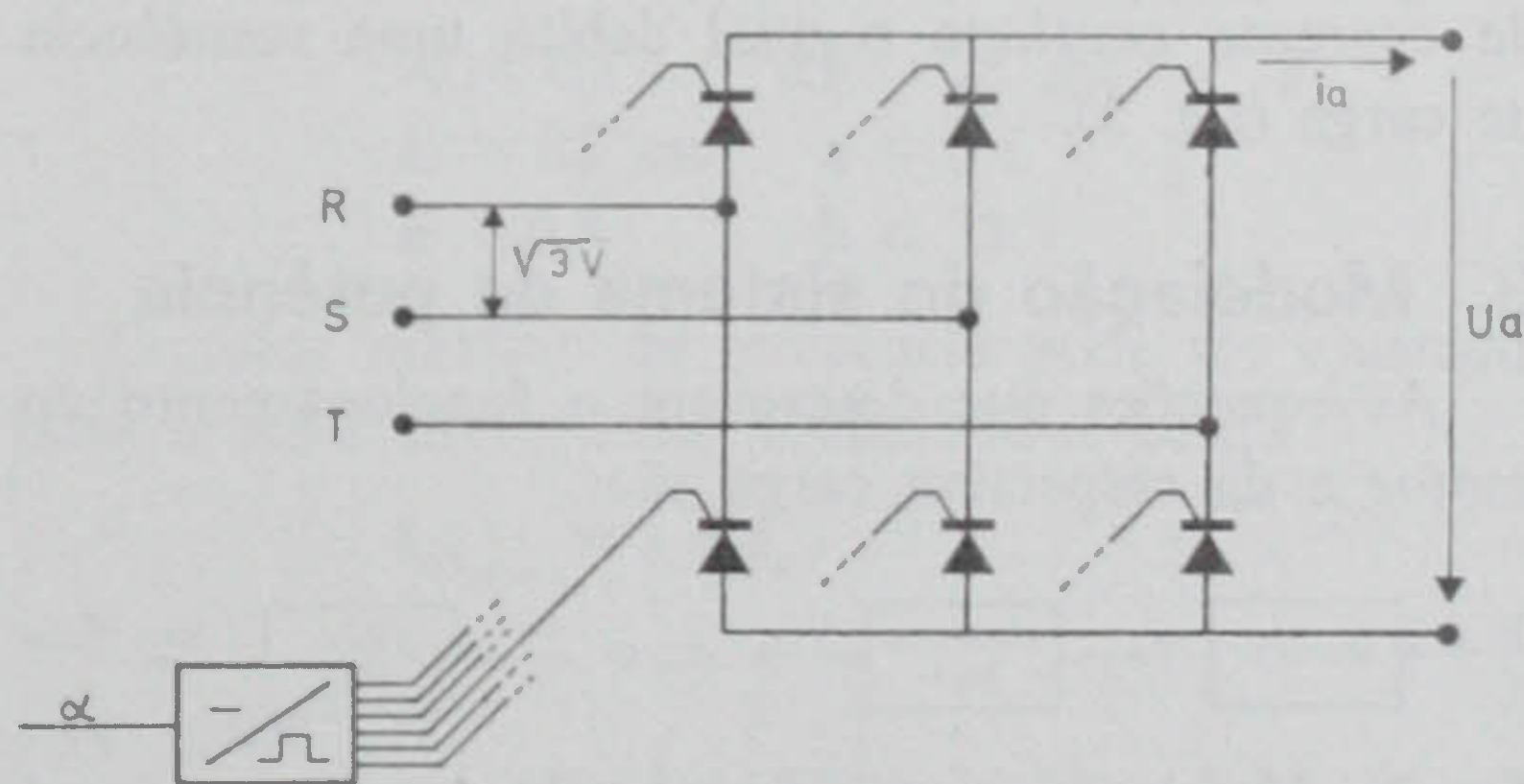


Fig. 1 — Ponte de rectificação trifásica totalmente controlada

de comando conveniente $\arccos \alpha$ obtém-se uma relação linear entre a entrada U_c e a saída U_a :

$$U_a = \frac{U_o}{b} U_c$$

sendo b o valor de U_c para se obter $\alpha = 0$.

Com o circuito de comando preconizado a ponte de rectificação em regime permanente tem uma acção de amplificação de ganho constante.

A descrição daquela fonte de alimentação em situações transitórias altamente variáveis é mais complexa. Contrariamente aos geradores de corrente contínua clássicos, na ponte de rectificação trifásica o número de fases é pequeno e assim durante um certo intervalo de tempo ($\simeq 20/6$ ms) existirá uma dada configuração do circuito de potência que não se altera instantaneamente com a variação do ângulo α .

Estatisticamente poderíamos definir um atraso na resposta da saída da ponte de rectificação de modo a traduzir a indefinição do instante da variação da tensão de saída provocada pela variação do ângulo α . Desta forma a ponte seria descrita por um sistema de 1.ª ordem.

O método preciso para modelar a ponte de rectificação é aceitar a acção discreta do seu comando, recorrendo-se então à transformada Z para obter um modelo matemático para o sistema. Com esta representação local é possível encontrar a justificação para certo tipo de instabilidades intrinsecamente associadas ao carácter discreto do comando quando associado a cadeias de retroacção de acção muito rápidas [4].

A representação indicada na figura 2, que traduz a ponte de rectificação como um amplificador, é conhecido por «modelo industrial», o qual é habitualmente utilizado pelos construtores de sistemas de conversão electromecânica de velocidade variável. Mercê da sua simplicidade, vamo-lo adoptar no nosso estudo.

O motor de corrente contínua acciona um gerador de corrente contínua o qual debita uma resistência de carga (fig. 3).

3. Modelação do sistema de potência

As equações que descrevem o funcionamento do motor e da respectiva carga são:

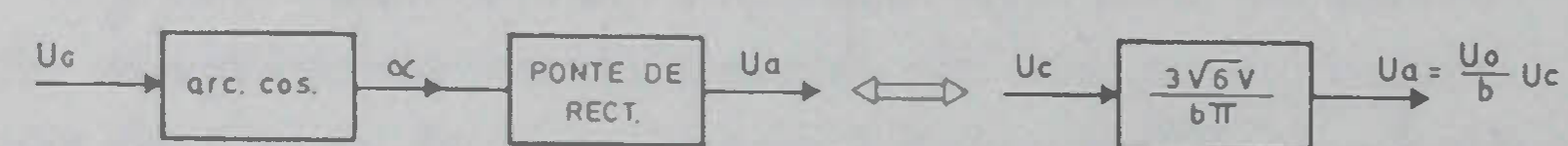


Fig. 2 — Modelo do circuito de comando

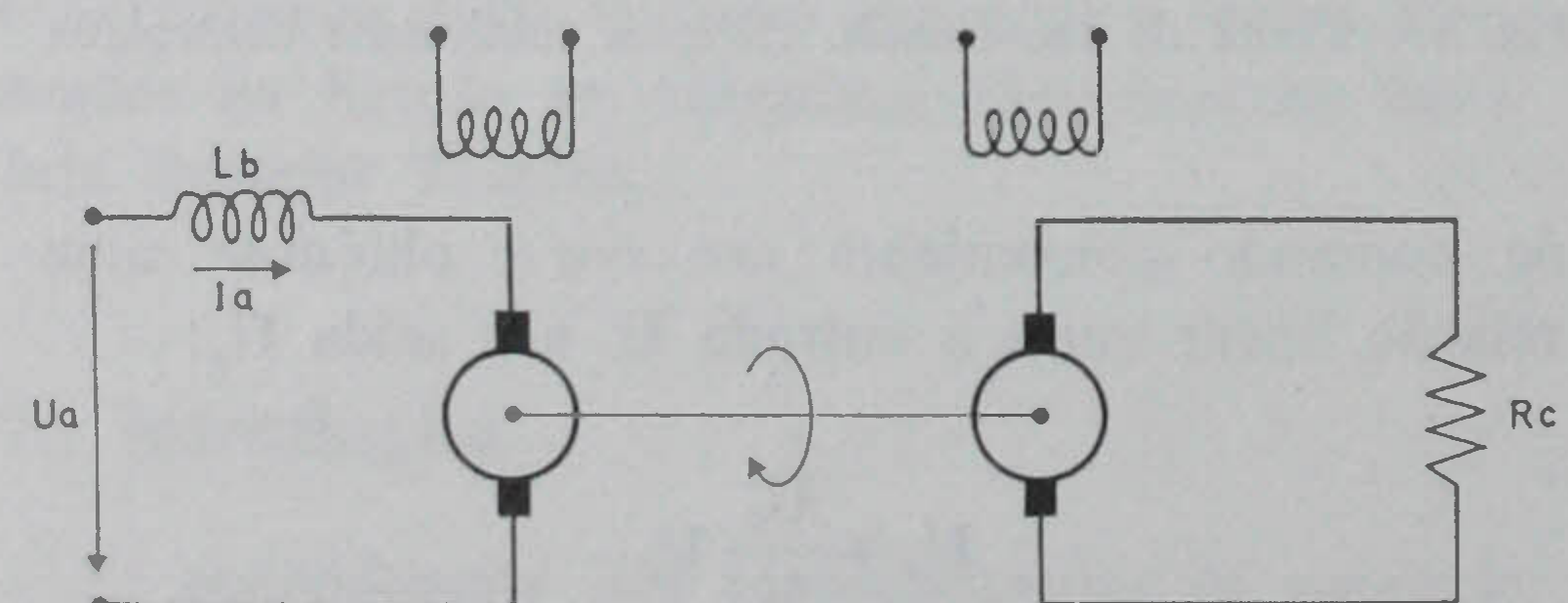


Fig. 3 — Conjunto do motor de accionamento e respectiva carga

$$U_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_1 \Phi_f \omega_r \quad (3)$$

$$U_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (4)$$

$$T_e = T_R + J \frac{d\omega_r}{dt} + D \omega_r; T_e = K \Phi_f i_a \quad (5)$$

No nosso estudo admitiu-se binário de atrito desprezável ($D \simeq 0$) e binário resistente constante. Este último facto corresponde à situação mais desfavorável, já que desta forma não se entra com o factor de amortecimento associado ao termo proporcional à velocidade

$$T_R = C \quad (6)$$

Nas condições anteriores e a fluxo constante (motor de excitação independente), a dinâmica do motor é descrita pelo diagrama de blocos da figura 4, em que

$$\begin{aligned} K &= K_e \Phi_f \\ L &= L_a + L_b \\ K &= K_e \Phi_f \end{aligned}$$

4. Regulação do sistema

A principal função da regulação de um sistema é conseguir que as grandezas sob controlo se mantenham tão próximas quanto possível dos valores desejados.

Com o recurso à Automação vamos regular a velocidade do sistema anteriormente descrito.

A rapidez da velocidade de resposta da ponte de rectificação controlada determina que preocupações especiais se devem colocar relativamente à evolução de certas variáveis do sistema. Exceptuando as pequenas máquinas para as quais o arranque directo é normalmente possível, para potências superiores a regulação de qualquer grandeza deve ser realizada vigiando a corrente do induzido. Existem diferentes tipos de regulação de velocidade que se distinguem

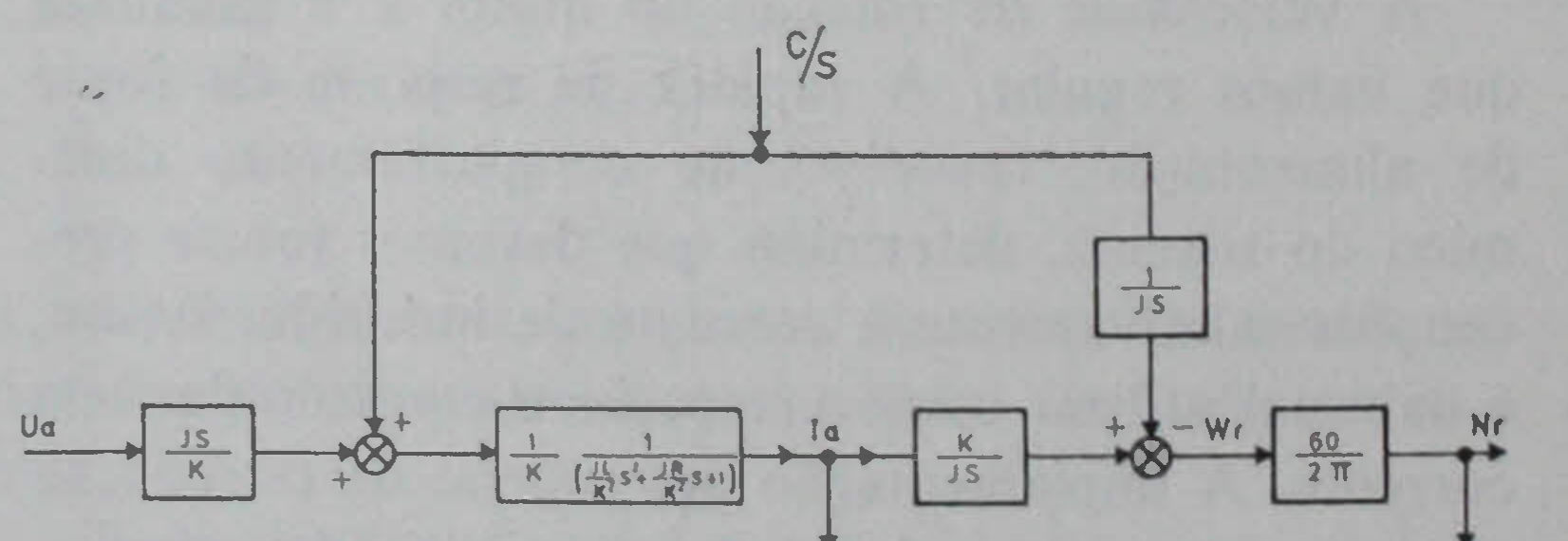


Fig. 4 — Diagrama de blocos do motor e respectiva carga

entre si pela forma como se incorpora a acção de protecção sobre a corrente de induzido. O mais utilizado industrialmente, e que vai ser objecto do nosso estudo, é o «sistema em cascata» (fig. 5).

A cadeia de retroacção externa destina-se a regular a velocidade do motor. A velocidade instantânea, obtida por um gerador taquimétrico, é comparada com o valor desejado. O erro obtido é a entrada do regulador de velocidade.

A saída do regulador de velocidade estabelece o valor de referência ao Controlo da corrente. Esta retroacção interna funciona como protecção do sistema. Sempre que a diferença entre as velocidades pretendida e instantânea estabelece valores da corrente de referência superiores a um dado nível existirá saturação da variável I_{ref} , o que conduz ao funcionamento apenas da cadeia interior. O abandono deste modo de funcionamento, à corrente máxima constante, verifica-se quando o erro das velocidades for pequeno de modo que não se verifique saturação à saída do regulador principal.

A constante de tempo do induzido da máquina de corrente contínua é normalmente insuficiente para garantir um bom alisamento da corrente e evitar o funcionamento lacunar da ponte de rectificação. A bobina de alisamento L_b colocada em série com o induzido do motor é a adaptação que se exige para diminuir o teor harmónico da corrente. A introdução deste filtro nas equações do motor é considerada alternando os parâmetros do seu circuito de induzido.

A materialização do sistema, esquematicamente representado na figura 5, teve em conta:

- a separação dinâmica entre as duas cadeias de retroacção impõe que a interna seja mais rápida que a de velocidade;

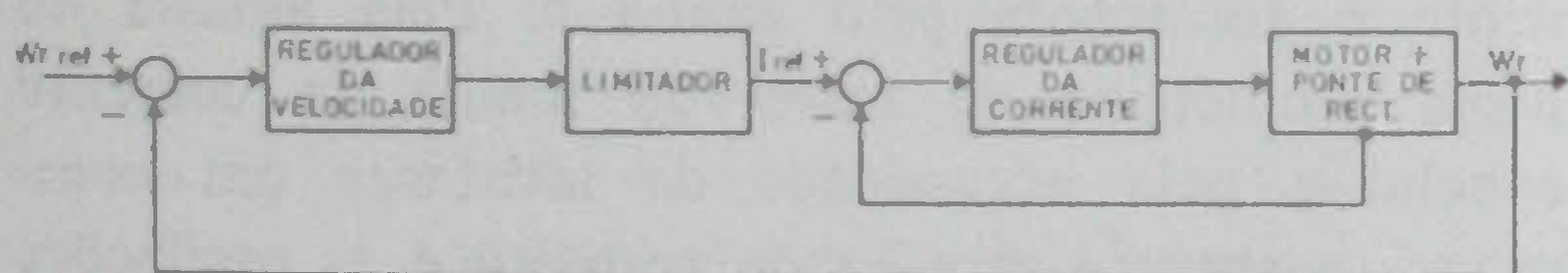


Fig. 5 — Sistema de regulação de velocidade em cascata

$$FT_1 = \frac{N(S)}{N(S)_{ref}} = \frac{\alpha\beta \frac{3\sqrt{6}V}{b\pi} \frac{30K}{\pi} (1 + aTS) (1 + ES)}{K^2 \left(\frac{JL}{K^2} S^2 + \frac{JR}{K^2} S + 1 \right) (1 + TS) (1 + ES) + [AJ (1 + TS) (1 + ES) S + FK \alpha \frac{30}{\pi} \left(1 + aTS \right) \beta \frac{3\sqrt{6}V}{b\pi}]} \quad (7.1)$$

$$FT_2 = \frac{N(S)}{C(S)} = \frac{\frac{30}{\pi J} (1 + TS) (1 + ES) \frac{1}{S} \left\{ \left[1 - \left(\frac{JL}{K^2} S^2 + \frac{JR}{K^2} S + 1 \right) \right] - \frac{A\beta}{K^2} \frac{3\sqrt{6}V}{b\pi} JS \right\}}{\left(\frac{JL}{K^2} S^2 + \frac{JR}{K^2} S + 1 \right) (1 + TS) (1 + ES) + \frac{\beta}{K^2} \frac{3\sqrt{6}V}{b\pi} [AJ (1 + TS) (1 + ES) S + FK \alpha \frac{30}{\pi} (1 + aTS)]} \quad (7.2)$$

- a utilização de um regulador com um comportamento proporcional-integral de modo a anular o erro estático na regulação de velocidade.

Com as condições anteriores, o diagrama de blocos do sistema realizado corresponde à figura 6, sendo **A** e **F** os ganhos das cadeias de retroacção de corrente e velocidade.

Admitindo que o sistema é linear, de forma a ser possível a aplicação do teorema da sobreposição, a resposta do sistema às perturbações na velocidade e no binário serão descritas pelas funções de transferência (7.1) e (7.2).

5. Implementação e resultados

Fez-se a análise em regime permanente e dinâmico do sistema. Os resultados experimentais foram obtidos utilizando um motor de C.C. ASEA cujas características são:

$$\begin{aligned} P_N &= 1,8 \text{ kW} \\ U_a &= 220 \text{ V} \\ N_n &= 1500 \text{ r.p.m.} \\ R_c &= 3,5 \Omega \\ L_c &= 35 \text{ mH} \end{aligned}$$

Os outros parâmetros que nos mereceram atenção foram:

$$\begin{aligned} J &= 0,0684 \text{ N.m}^2 \\ K &= 1,3 \text{ v.rad.s}^{-1} \\ R &= R_a + R_b = 4,5 \Omega \\ L &= L_a + L_b = 174 \text{ mH} \\ V &= 110 \text{ V} \end{aligned}$$

No sistema de comando

$$\begin{aligned} A &= 0,1 & aT &= 25 \text{ ms} \\ E &= 82 \text{ ms} & a &= 0,5 \\ F &= 0,5 & b &= 12 \end{aligned}$$

O valor máximo de referência pode ser ajustado para o valor pretendido. Trabalhou-se com

$$I_{ref_{max}} = 1,4 I_n$$

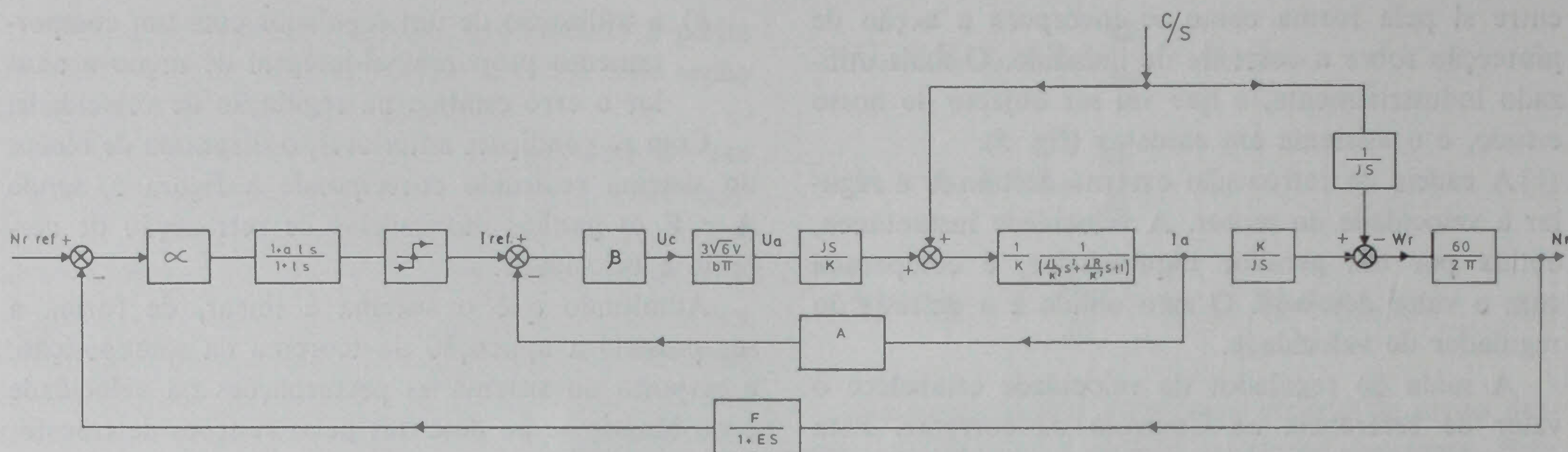


Fig. 6 — Diagrama de blocos do conjunto

5.1. Comportamento em regime permanente

O erro estático em regime permanente é dado por

$$e = 1 - K_0 \quad (8)$$

sendo K_0 o ganho estático.

Como o objectivo é conseguir um erro de posição nulo, o ganho estático associado à entrada da velocidade de referência $K_{0(1)}$ deverá ser unitário. Pela mesma razão o referente à entrada do binário $K_{0(2)}$ terá que ser nulo.

De (7.1) e (7.2) obtém-se

$$K_{0(1)} = \frac{1}{\frac{K \cdot \pi^2 \cdot b}{\alpha \cdot \beta \cdot 3 \sqrt{6} \cdot V \cdot 30} + F} \quad (9.1)$$

$$K_{0(2)} = \frac{K - J \cdot R - A \cdot \beta \cdot \frac{3 \sqrt{6}}{b \cdot \pi} \cdot V \cdot J}{\frac{\pi \cdot J \cdot K}{30} + \alpha \cdot \beta \cdot F \cdot K \cdot \frac{3 \sqrt{6}}{b \cdot \pi} \cdot V \cdot J} \quad (9.2)$$

Da análise das equações anteriores conclui-se que o erro do sistema em regime permanente está intimamente associado ao valor do ganho da cadeia de retroacção de velocidade F . O seu ajuste é conseguido à custa dos ganhos α e β do sistema. Por outro lado, para que as perturbações no binário de carga não se reflectam em variações da velocidade é necessário uma escolha criteriosa de β . Do ponto de vista da implementação impôs-se um pequeno ganho da cadeia de retroacção da corrente β e um valor elevado no resultado do produto $\alpha \cdot \beta$.

Para minimizar as perturbações exteriores sobre a grandeza controlada utilizou-se um compensador de atraso de fase com o qual não se atinge o erro estático nulo teórico. Consegue-se, e de uma forma simples, atenuar o erro devido às perturbações.

Os resultados experimentais estão expressos na figura 7, donde se observa o erro de posição a carga nominal:

- com regulação (curvas 1) = 0,7%
- sem regulação (curvas 2) = 16,7%

5.2. Comportamento em regime dinâmico

5.2.1. Arranque

Na resposta a um escalão de grande amplitude N_{ref} , o comportamento do sistema é fundamentalmente determinado pelo regulador de corrente (fig. 8). Justifica-se na medida em que o erro de velocidade é elevado, o que impõe um funcionamento com limitação da corrente.

A forma como a corrente atinge o regime permanente é controlada pelo ganho β . Pela análise do lugar geométrico de raízes da malha de corrente conclui-se pela necessidade de satisfazer um compromisso entre a rapidez de resposta e as oscilações introduzidas.

5.2.2. Passagem da situação de vazio a plena carga

Apresenta-se na figura 9 os resultados experimentais da passagem instantânea da situação de vazio a plena carga.

6. Conclusões

Interessa realçar a característica pedagógica de que este trabalho se revestiu e os resultados práticos que se atingiram.

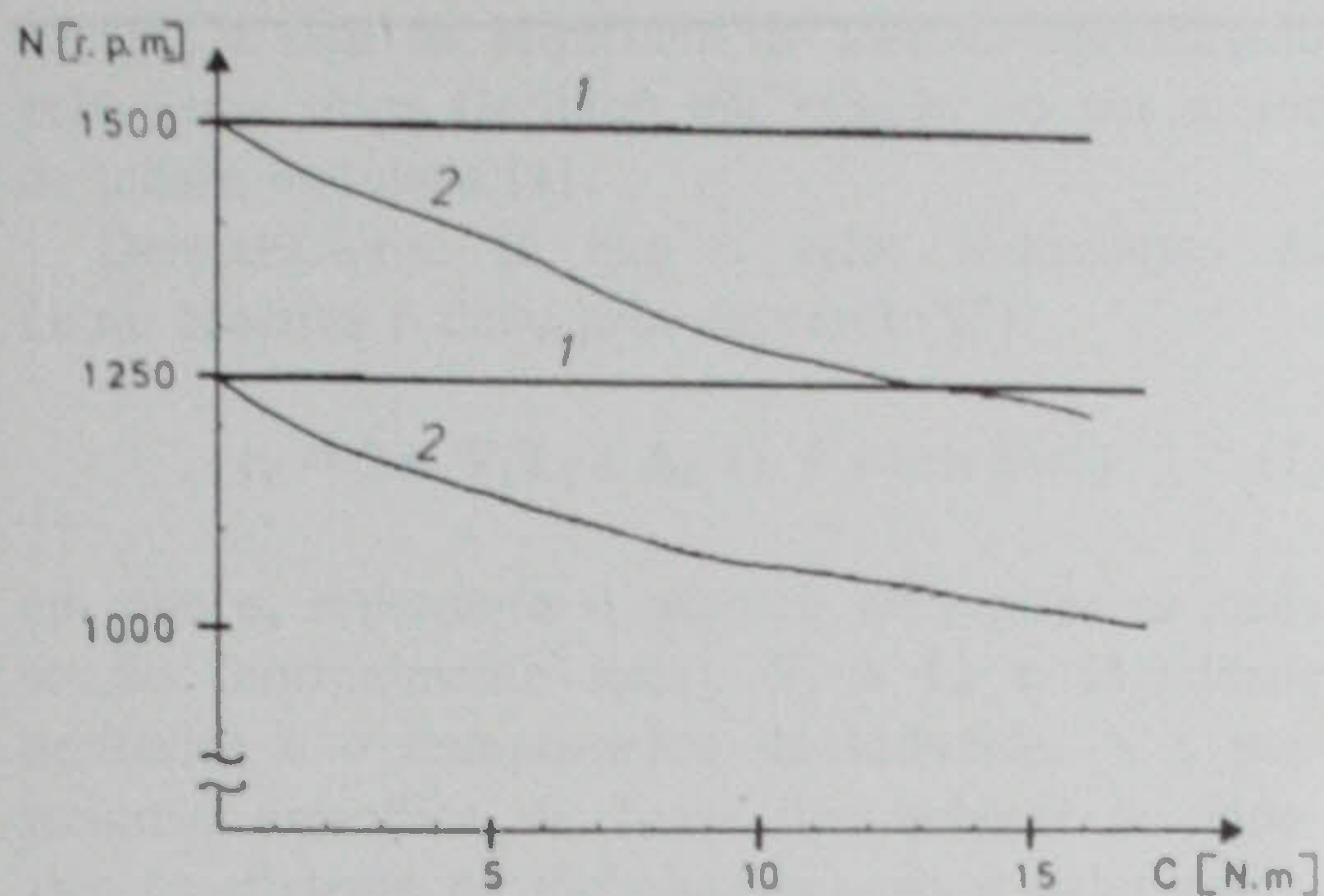


Fig. 7 — Características electromecânicas do motor com e sem controlo de velocidade

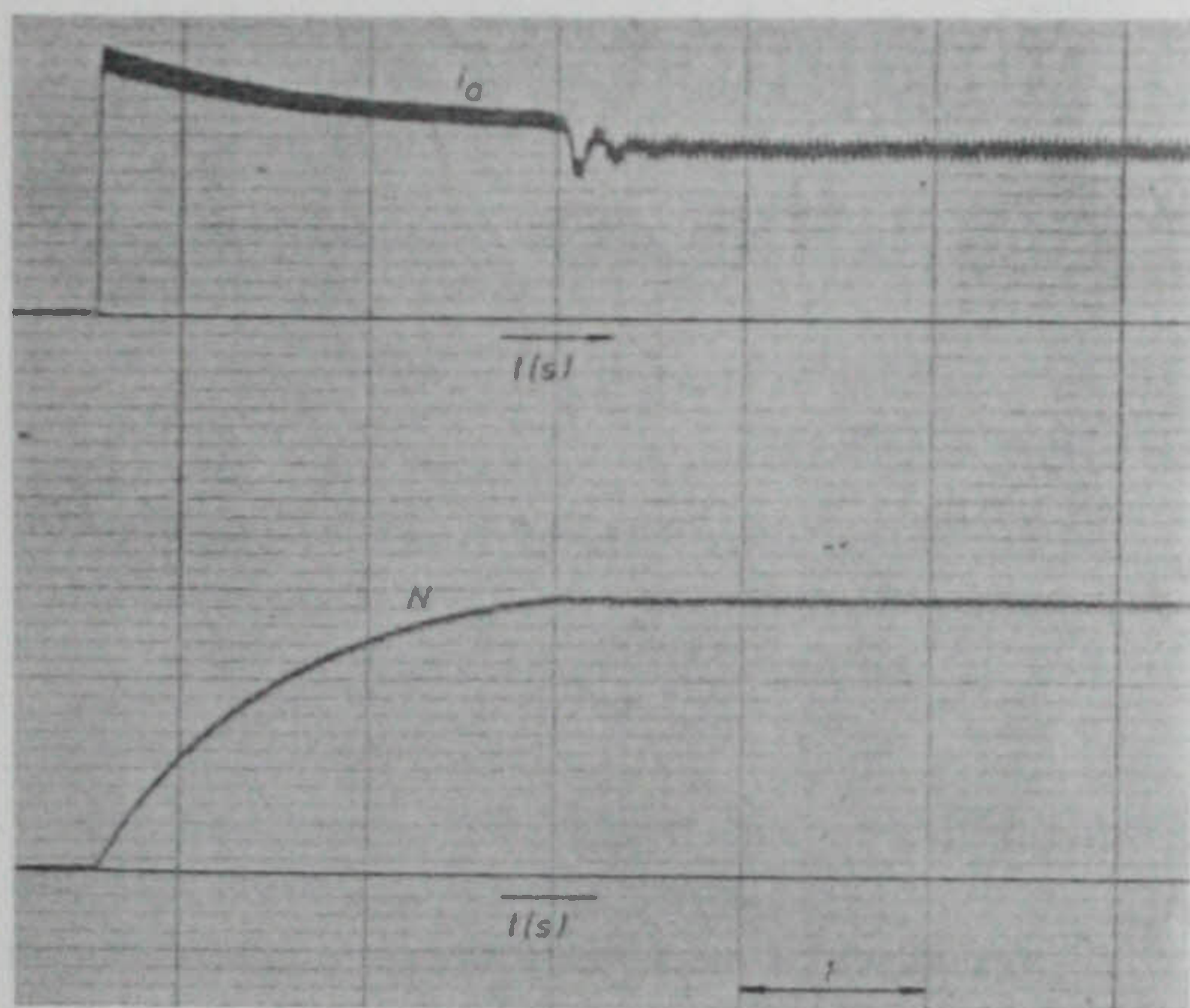


Fig. 8 — Resposta da corrente e velocidade a um escalão de N_{ref} (arranque)

$N = 1500$ r.p.m.

$i_a = 8,5$ A

Limitação de corrente = 11,6 A

Quanto ao sistema de regulação propriamente dito, constatamos o seu interesse em aplicações em que, com o objectivo da regulação de velocidade, não tenhamos necessidade de erro estático absolutamente nulo. A sua grande qualidade é a simplicidade de concepção do sistema de regulação em cascata.

Queremos no entanto realçar, que ao apresentar este artigo sobre a regulação de velocidade de máquinas de corrente contínua, pensamos não ser esta a solução actual no domínio da regulação de velo-

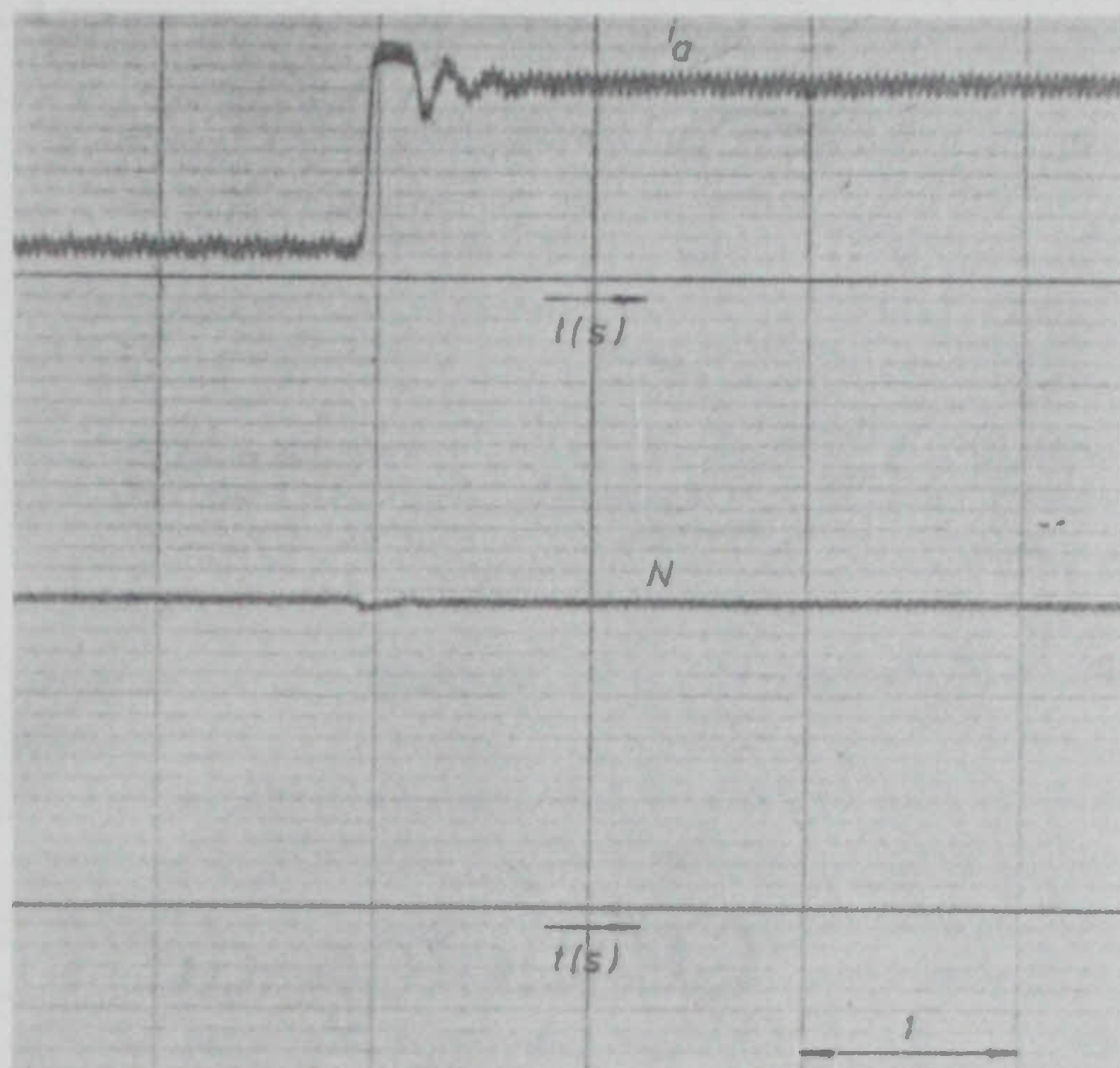


Fig. 9 — Passagem instantânea da situação de vazio a plena carga

$N = 1500$ r.p.m.

$i_a = 8$ A

Limitação de corrente = 11,6 A

cidade de máquinas eléctricas. A evolução da electrónica de potência faz-nos acreditar que face ao aumento da sua gama de utilização, da sua fiabilidade e da descida relativa de preços, seja a electrónica de potência aplicada às máquinas de corrente alternada a solução promissora no domínio da regulação de velocidade [5]. No entanto, o trabalho apresentado justifica-se pelos resultados pedagógicos conseguidos num assunto intrinsecamente interdisciplinar.

BIBLIOGRAFIA

- 1 — R. CHAUPRADE: *Commande électronique des moteurs à courant continu*, Ed. Eyrolles, 1975.
- 2 — *Comparison of speed controlled DC drives with and without subordinate current loop*, H. Grotstollen, Control in Power Electronics and Electrical Drives, IFAC 1977.
- 3 — *Entrainements de moteurs à courant continu par convertisseurs statiques de puissance*, F. Labrique, Curso Mestrado EEC/Energia I. S. T.
- 4 — *Estabilidade de sistemas com retroacção incorporando conversores estáticos controlados*, J. P. Sucena Paiva, *Electricidade* 102, Abril 1974, pp. 221-237.
- 5 — *Present trends in variable speed AC drives*, V. R. Stefawovic, IPEC — Tokyo'83.