Tracção Eléctrica

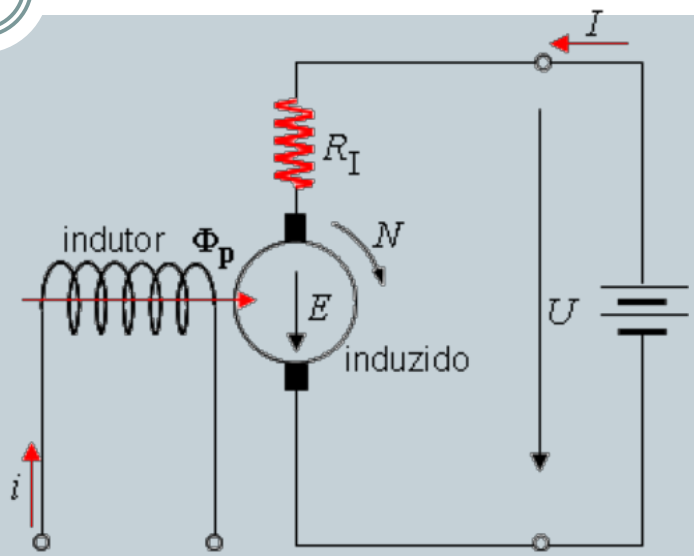
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

JOÃO MARTINS

MÁQUINA DC
2018/2019

Tracção eléctrica em corrente contínua





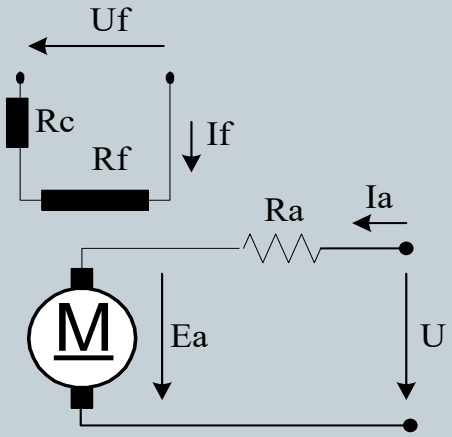
Esquema equivalente

$$T = k_a \, \phi \, I_a$$

$$E_a = k_a \phi \omega_m$$

$$E_a = U_a - R_a \, I_a$$

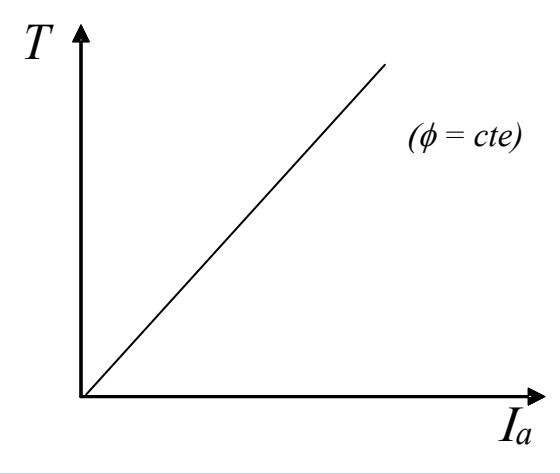
Motor DC (excitação independente)



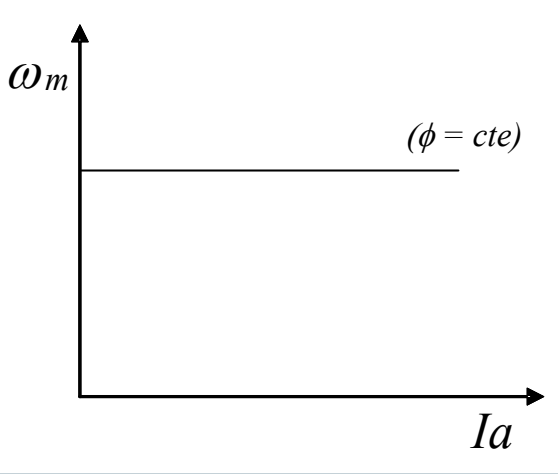
$$T = k_a \, \phi \, I_a$$

$$\omega_m = \frac{U_a - R_a \, I_a}{k_a \, \phi} \approx \frac{U_a}{k_a \, \phi}$$

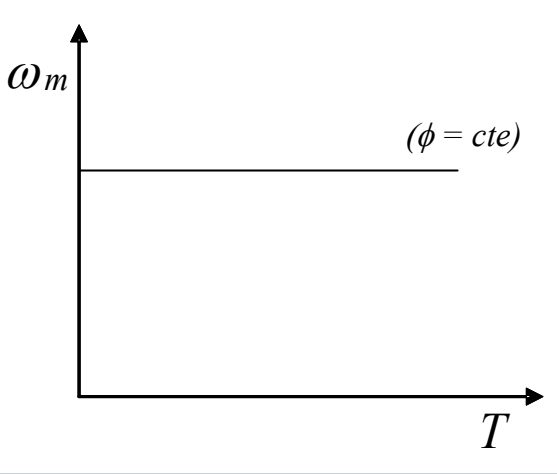
Característica electromecânica de binário



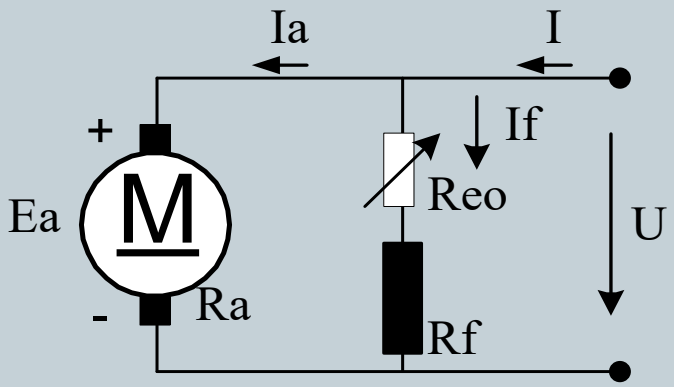
Característica electromecânica de velocidade



Característica mecânica

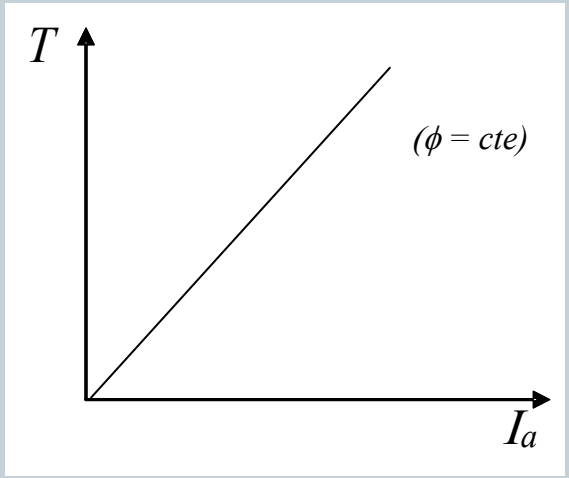


Motor DC (excitação derivação)

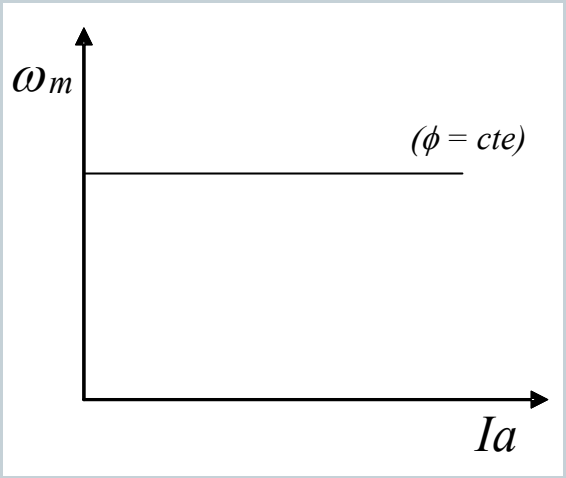


Admitindo que a tensão aplicada não varia que a corrente de excitação se mantêm constante as características deste motor são em tudo idênticas às do motor de excitação independente.

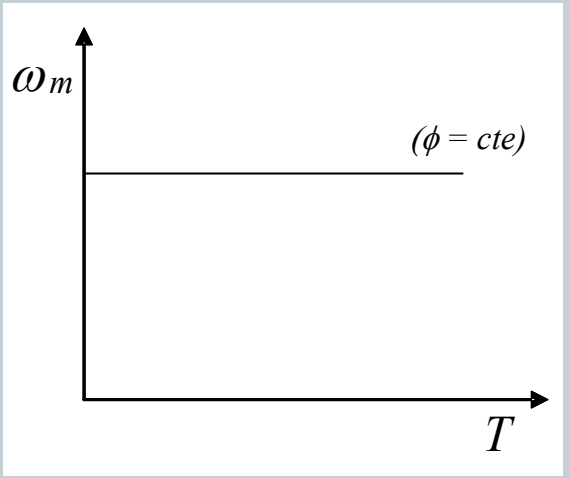
Característica electromecânica de binário



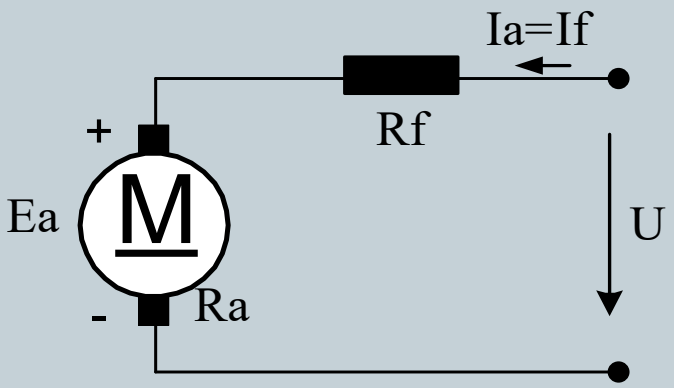
Característica electromecânica de velocidade



Característica mecânica



Motor DC (excitação série)

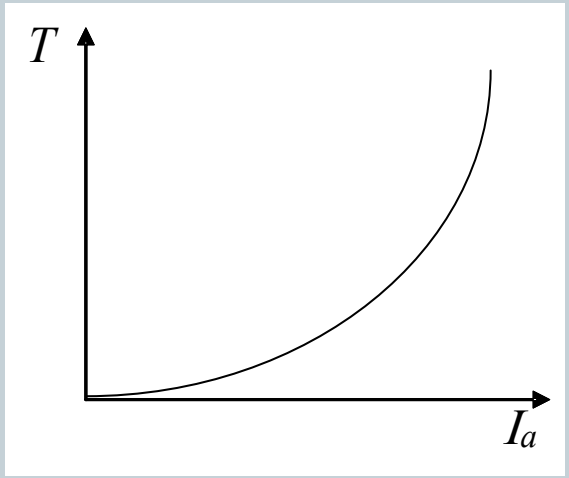


$$T = k_a \, \phi \, I_a = k_a k_\phi I_a^2$$

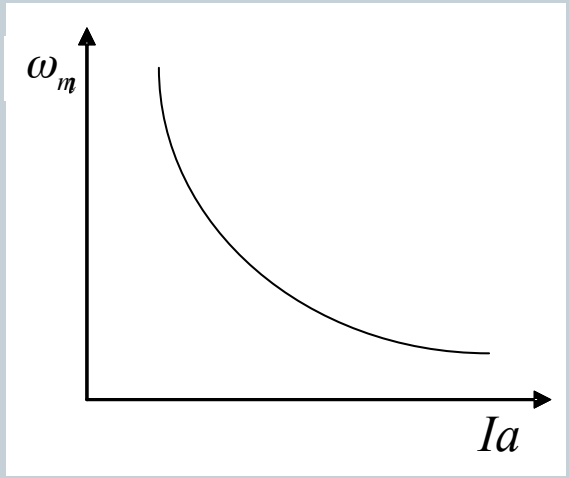
$$\omega_m = \frac{U_a - R_a I_a}{k_a \, \varphi} = \frac{U_a - R_a I_a}{k_a \, k_\varphi I_a} \approx \frac{k''}{I_a}$$

$$T \approx \frac{k'''}{\omega_m^2}$$

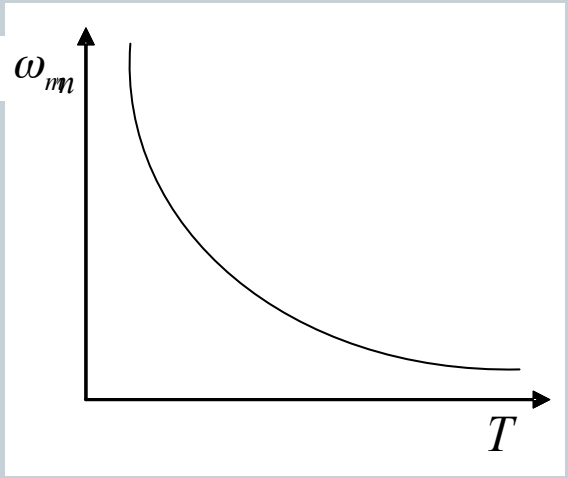
Característica electromecânica de binário



Característica electromecânica de velocidade



Característica mecânica

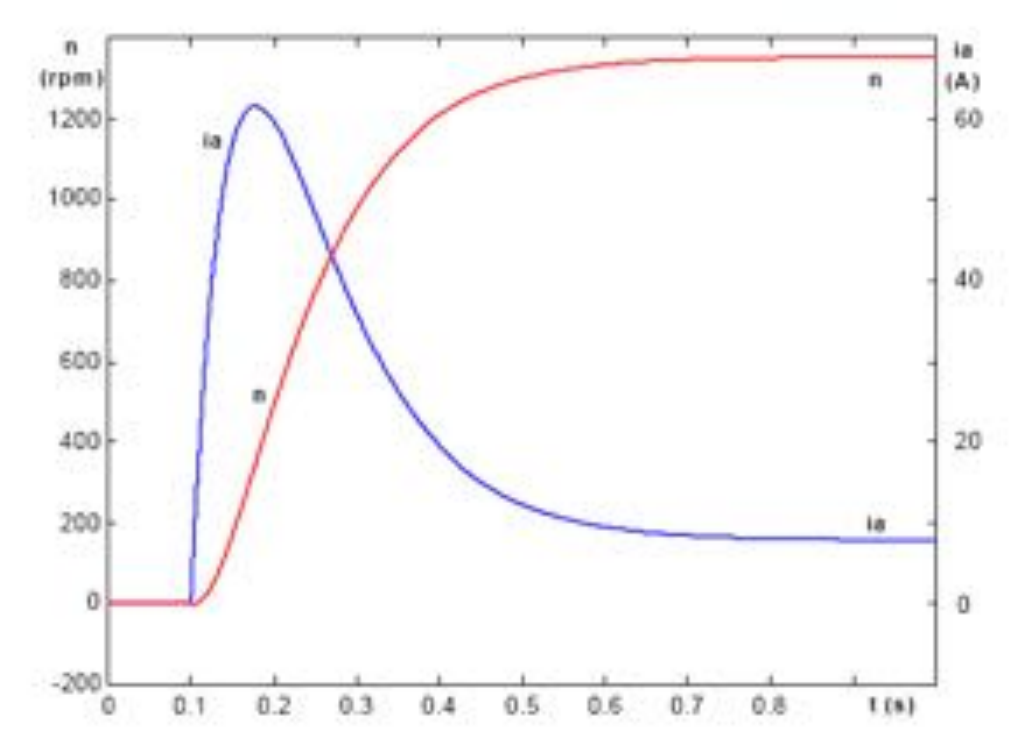


Motor DC (Arranque)

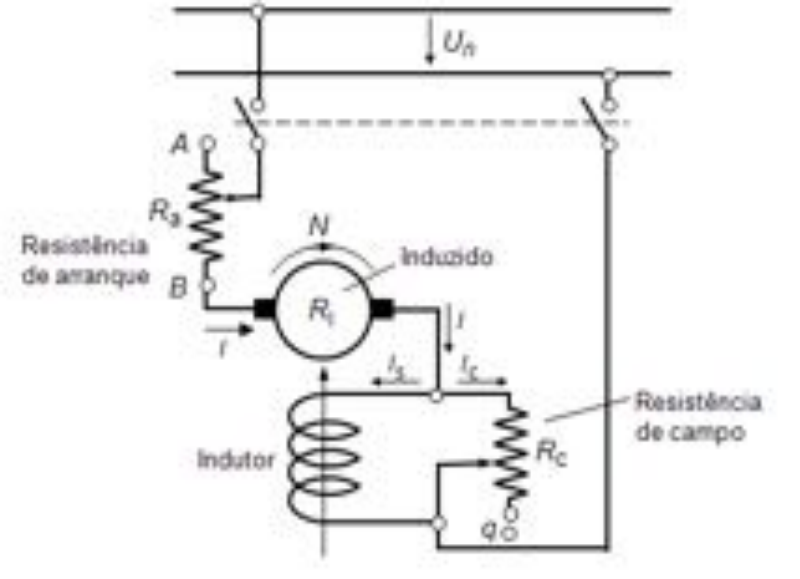
$$U = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k_T \omega \phi$$

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_r$$

Arranque



Motor DC (Arranque)

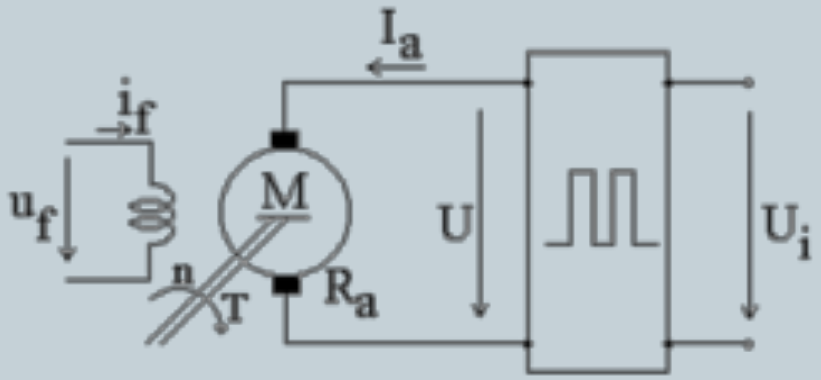


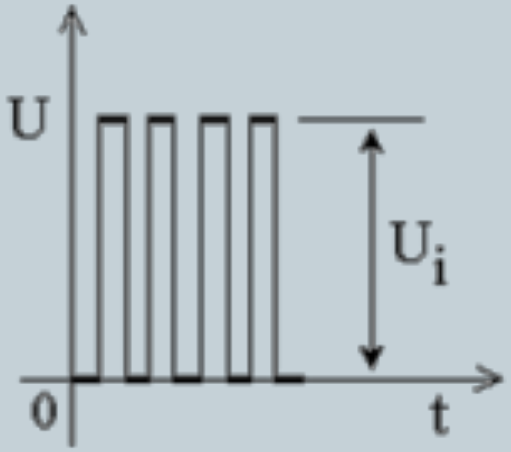
Arranque

Processos de arranque:

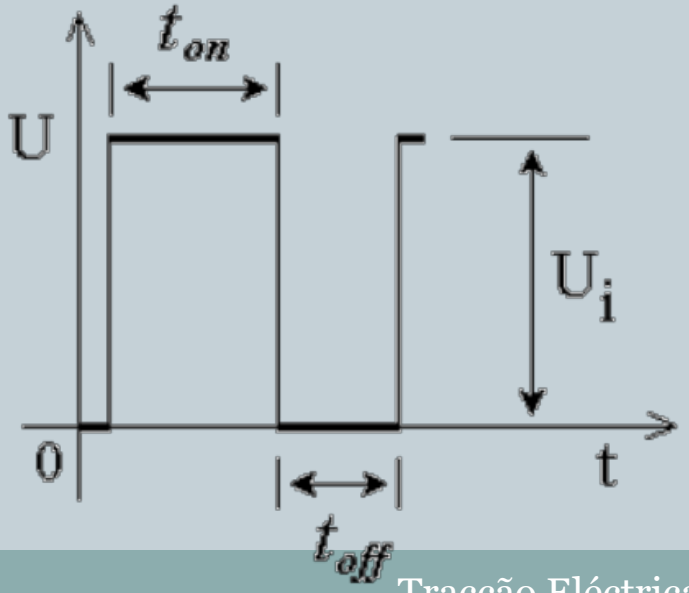
- Arranque reostático
- Arranque por variação de tensão
- Arranque electrónico

Motor DC (Arranque)



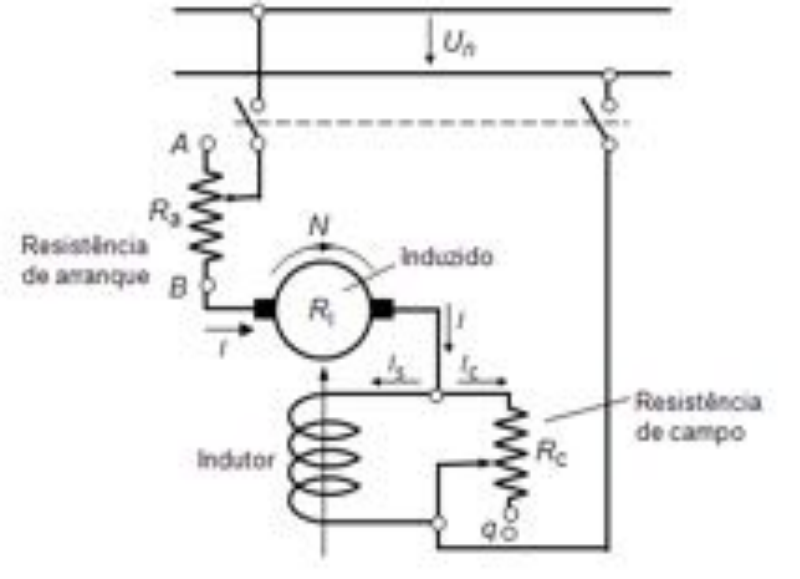


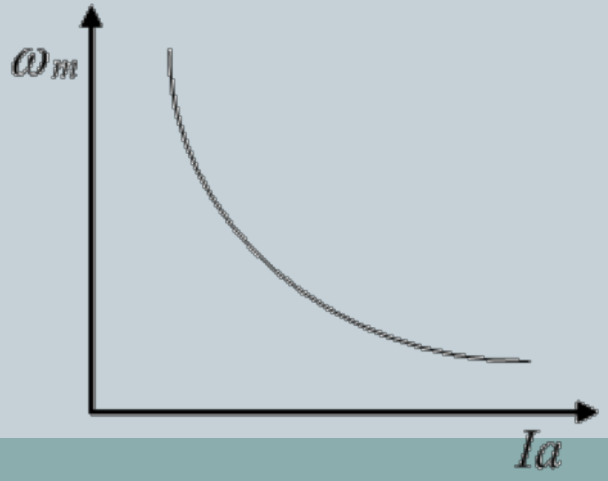
Arranque electrónico

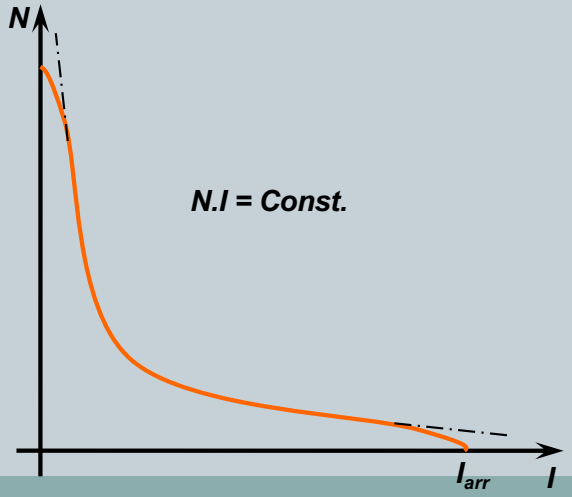


Motor DC (excitação série)

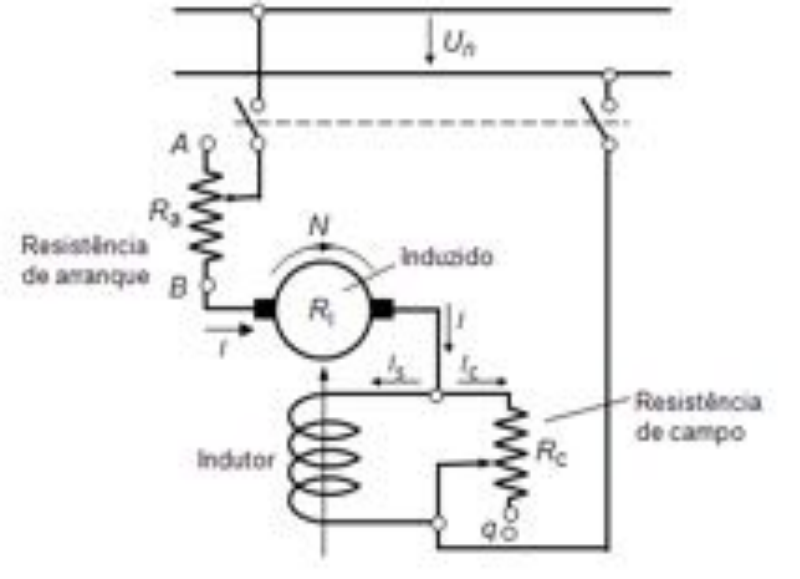
Características reais





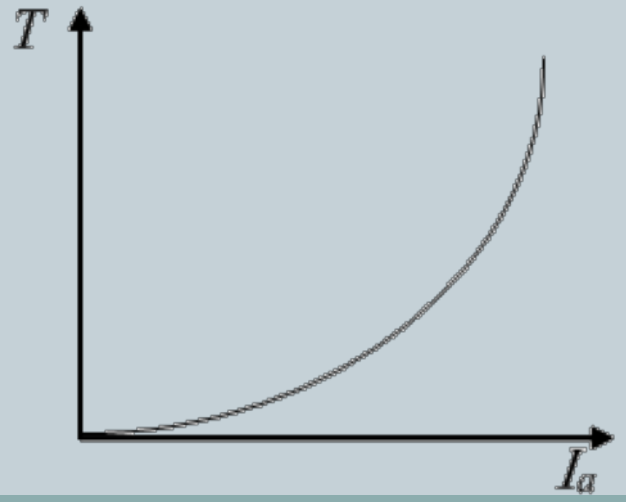


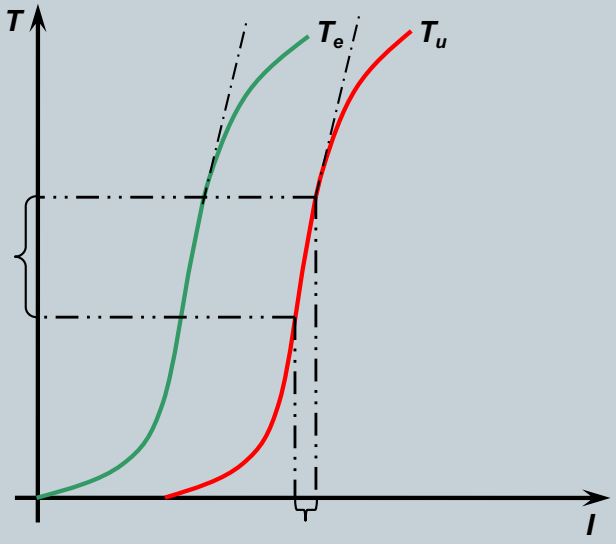
Motor DC (excitação série)



Características reais

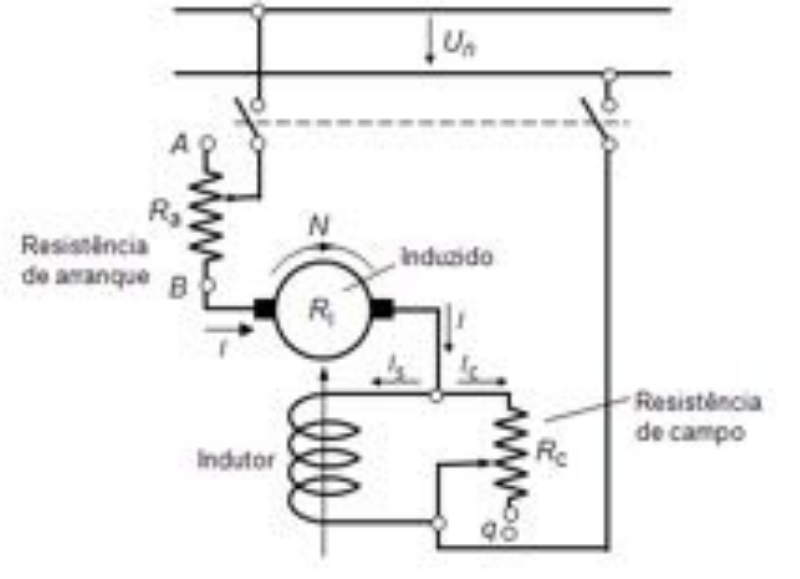
(Relação ΔT/ΔI)

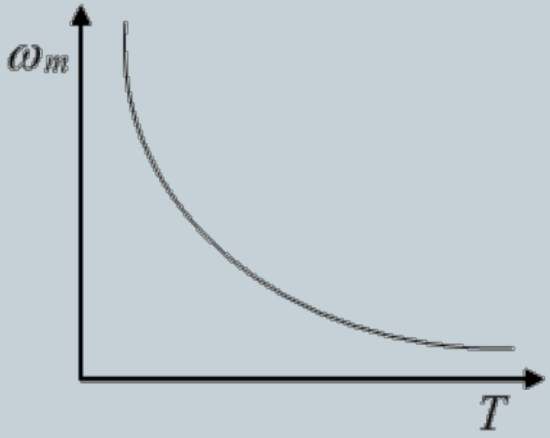


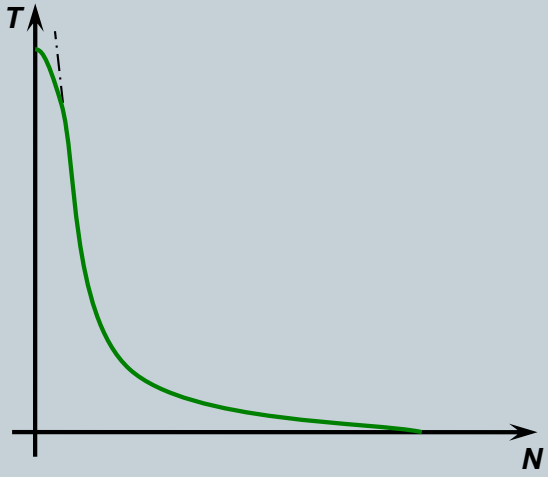


Motor DC (excitação série)

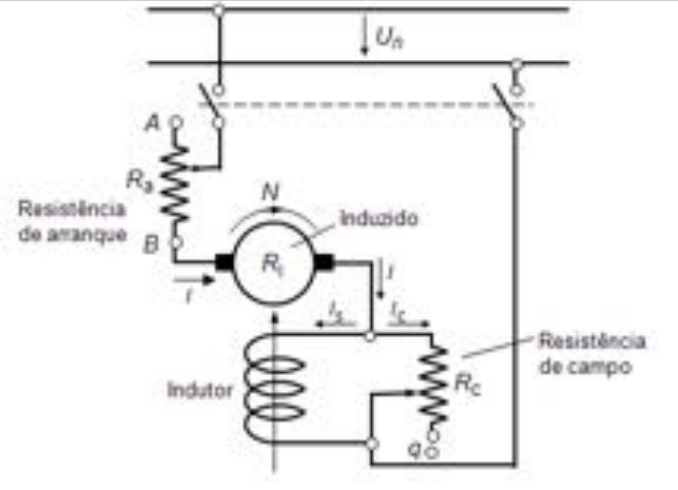
Características reais

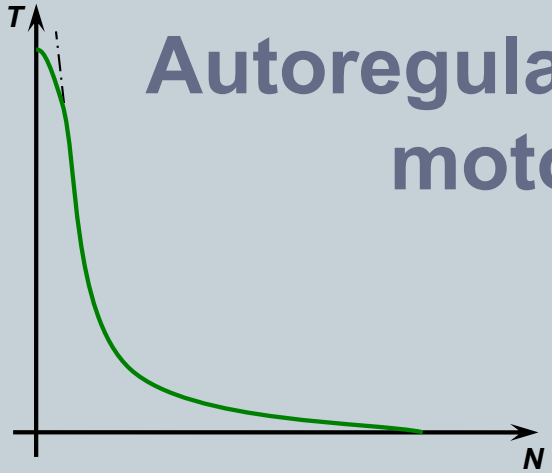






Motor DC (excitação série)





Autoregulação do motor série

Para uma tensão da rede ($V = Const.$) a potência absorvida pelo motor ($P = V.I$) é directamente proporcional à corrente, ora um aumento de corrente traduz-se numa diminuição de velocidade e consequentemente num aumento do binário relativamente maior.

Como a potência mecânica é dada por:

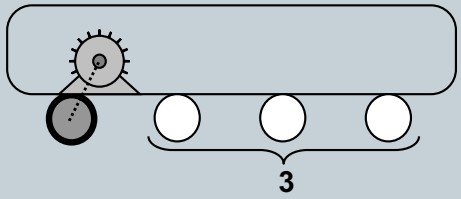
$$P_{mec} = T.N$$

isto significa que o motor série, na tracção eléctrica, absorve à rede sensivelmente uma potência constante, quer o comboio circule numa via plana ou inclinada.

Associação de motores DC

$$T = k_a \, \phi \, I_a = k_a k_\phi I_a^2$$

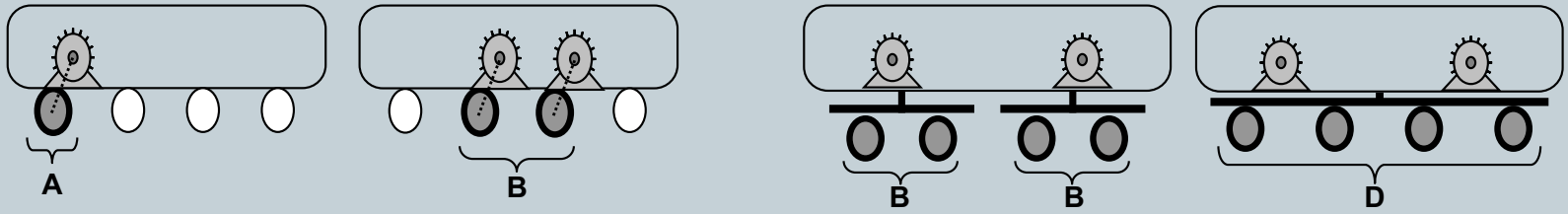
$$\omega_m = \frac{U_a - R_a I_a}{k_a \, \phi} = \frac{U_a - R_a I_a}{k_a \, k_\phi I_a} \approx \frac{k''}{I_a}$$



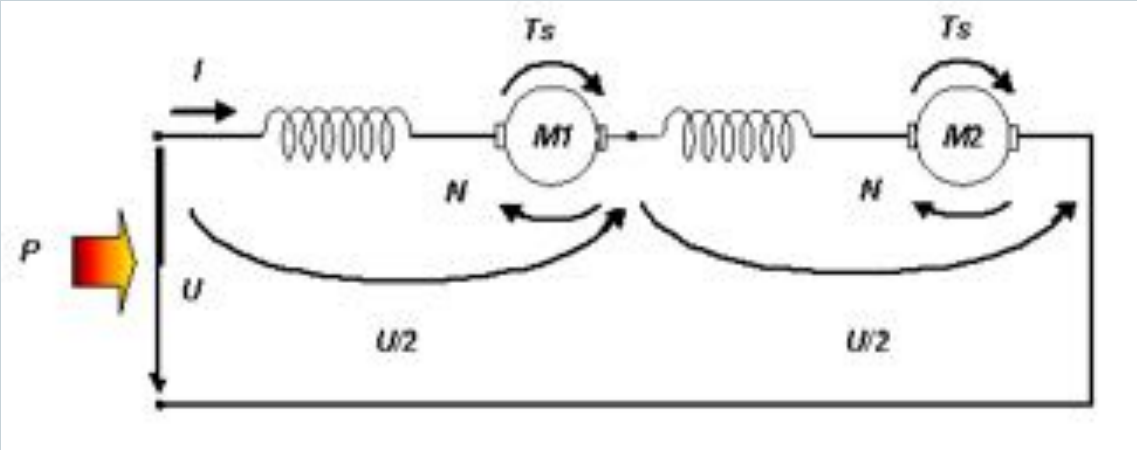
Paralelo

???

Série



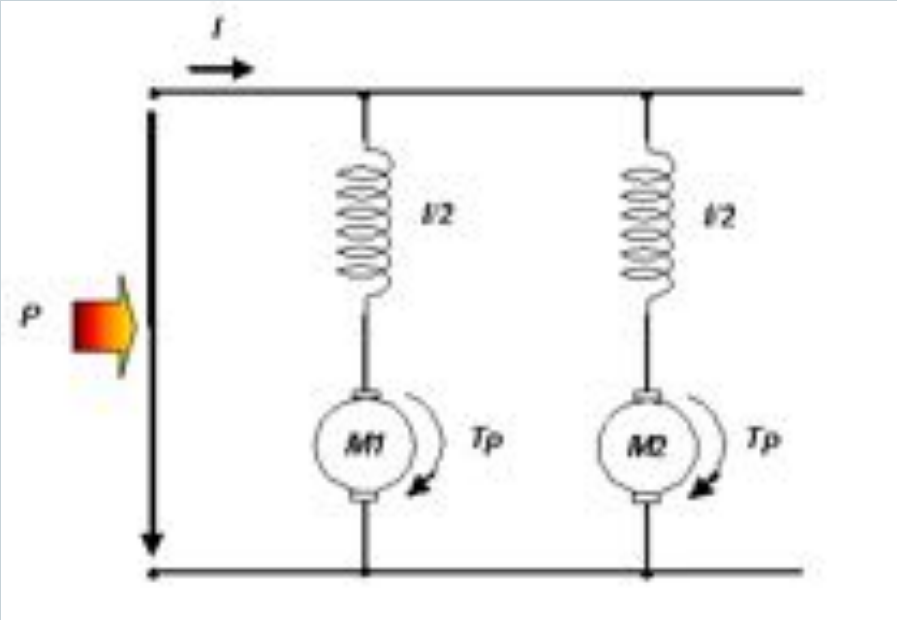
Associação série de motores DC



$$T_s = K_0 I^2$$

$$N_s = K_0^{'} \frac{U}{2I}$$

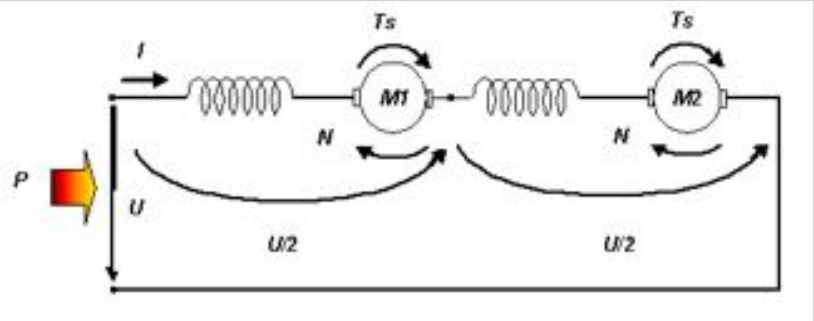
Associação paralelo de motores DC

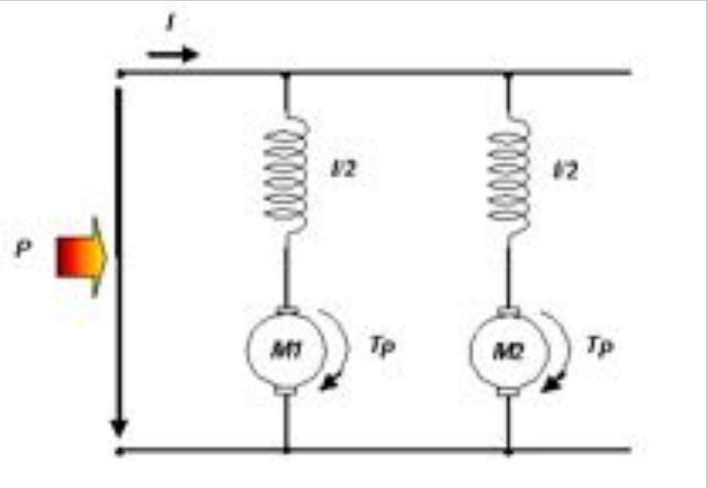


$$T_p = K_0 \left(\frac{I}{2} \right)^2$$

$$N_p = K_0^{'} \frac{2U}{I}$$

Associação de motores DC





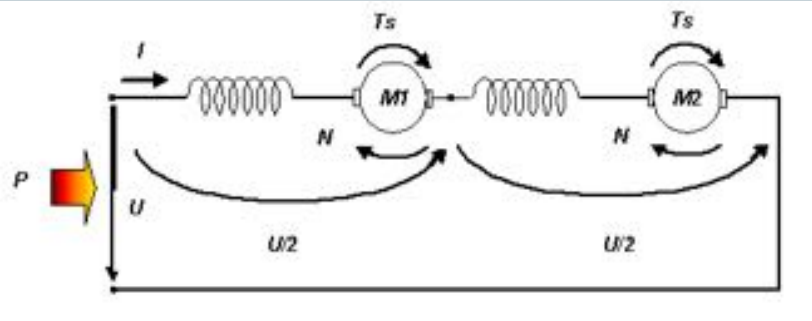
$$\frac{T_s}{T_p} = \frac{K_0 I^2}{K_0 \frac{I}{4}^2} = 4$$

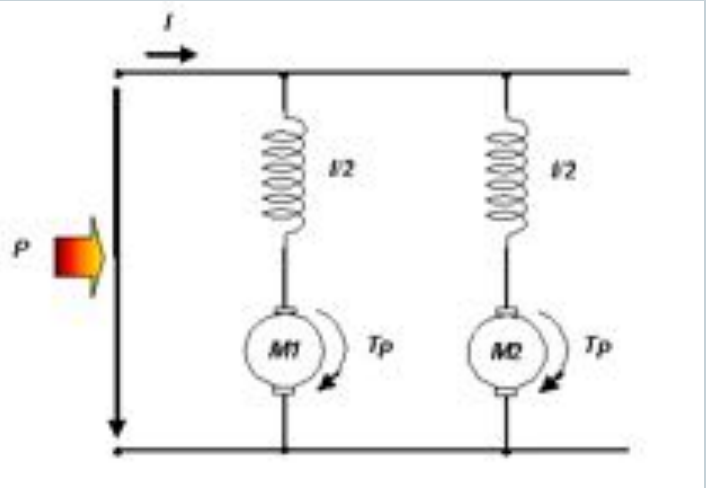
$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{K_0 \frac{U}{2I}}{K_0 \frac{2U}{I}} = \frac{1}{4}$$

$$T_s = 4T_p$$

$$N_s = \frac{1}{4} N_p$$

Associação de motores DC





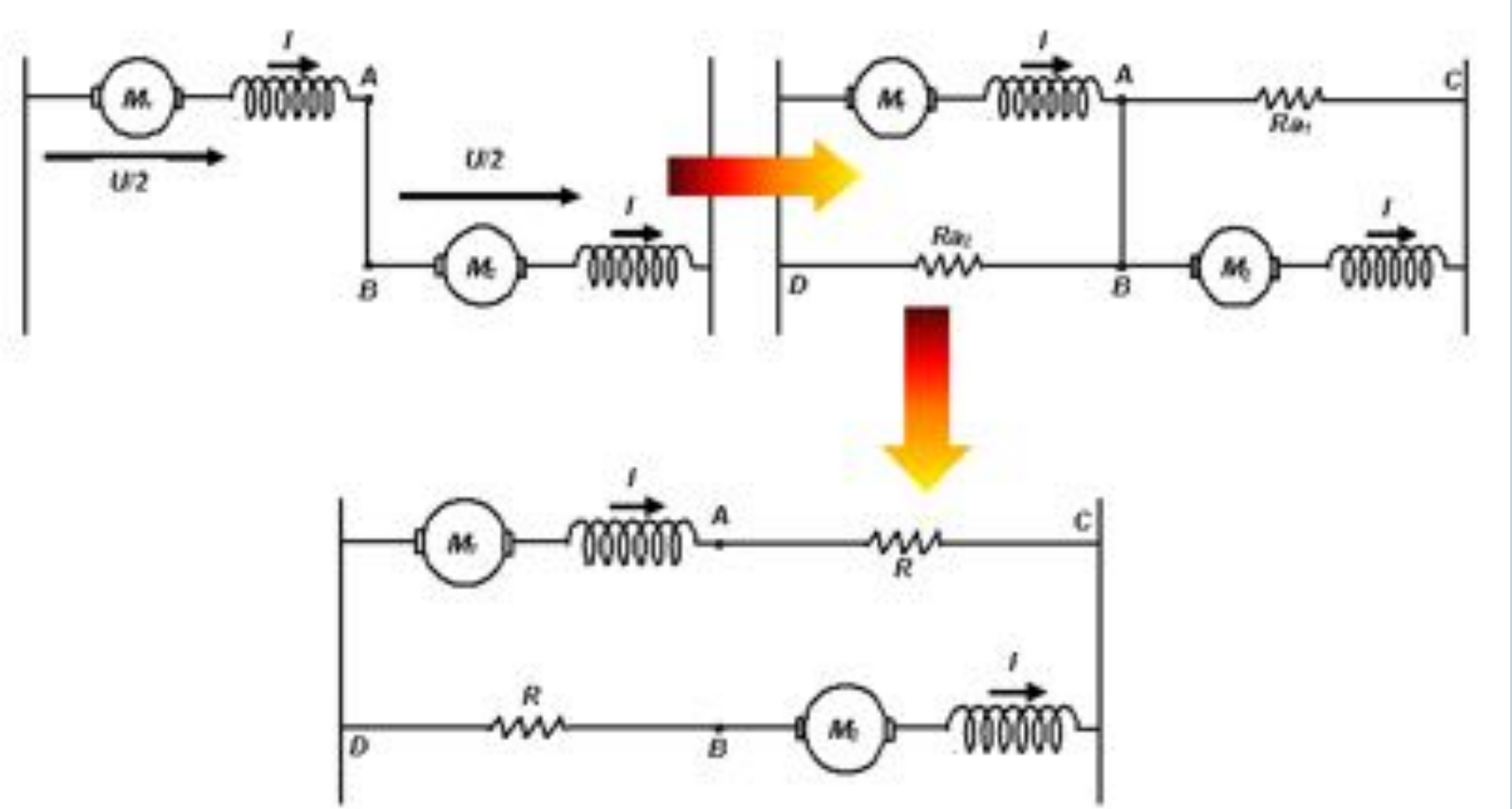
Conclusões...

$$T_s = 4T_p$$

$$N_s = \frac{1}{4} N_p$$

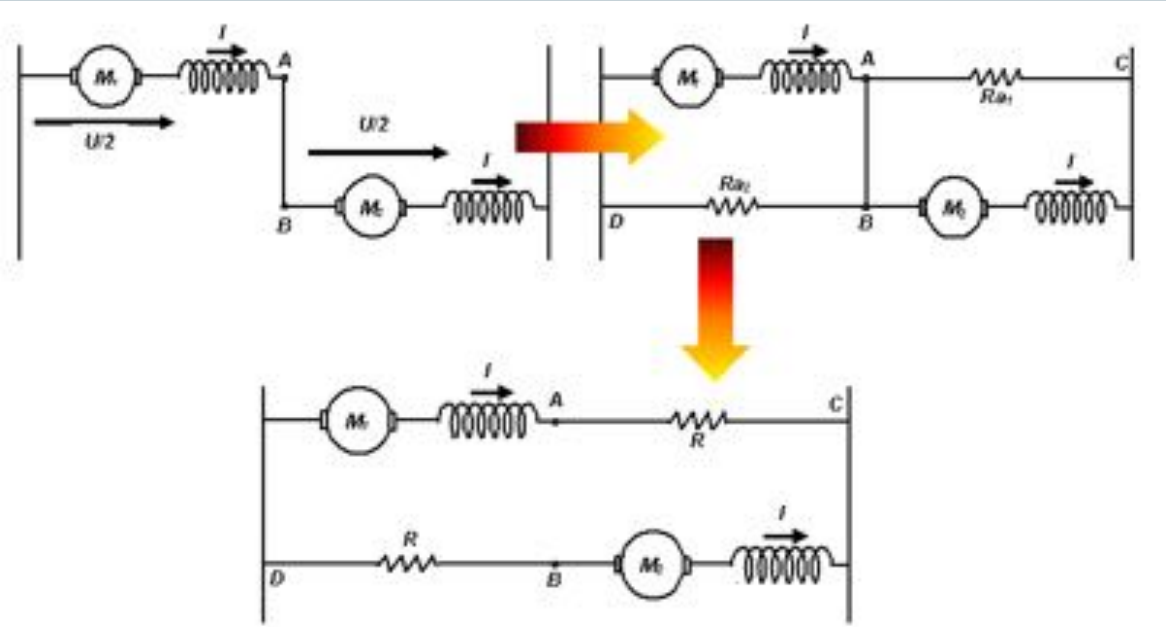
Associação de motores DC

Transição série / paralelo



Associação de motores DC

Transição série / paralelo



Para a transição são colocadas entre *A* e *C* e *B* e *D*, as resistências Ra_1 e Ra_2, tais que:

$$R_{a1} = R_{a2} = \frac{V}{2.I}$$

o que permite que os pontos *A* e *B* fiquem ao mesmo potencial.

Como no troço *A-B* não há passagem de corrente pode-se suprimir então esse troço, ficando aplicada uma tensão da rede, a cada conjunto de motores. Finalmente são retiradas as resistências progressivamente, ficando os motores em paralelo com a rede.

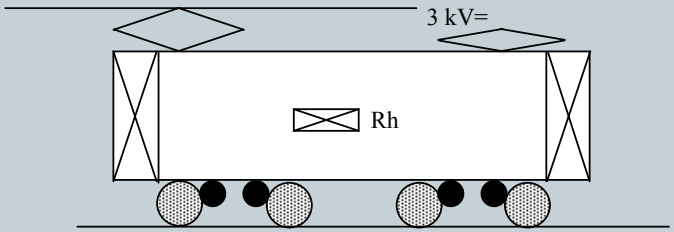
Associação de motores DC (exemplo)

A **locomotiva E444** entrou ao serviço em 1965 e tem as seguintes características principais:



- Velocidade máxima: 200 km/h
- Massa: 83 ton
- Força nominal em regime continuo: 129 kN a 104 km/h
- Força máxima: 201 kN
- Potencia continua nominal (eléctrica): 3820 kW
- Motores DC (3 kV)
- A relação de transmissão da caixa vale: 1:1,925

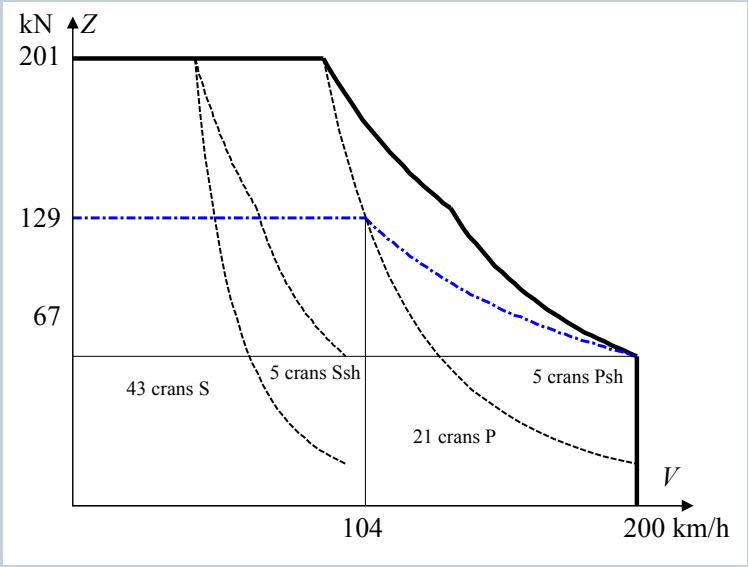
Esta locomotiva foi inicialmente construída como um protótipo utilizando choppers de controlo electrónico, ao invés do habitual controlo reostático.

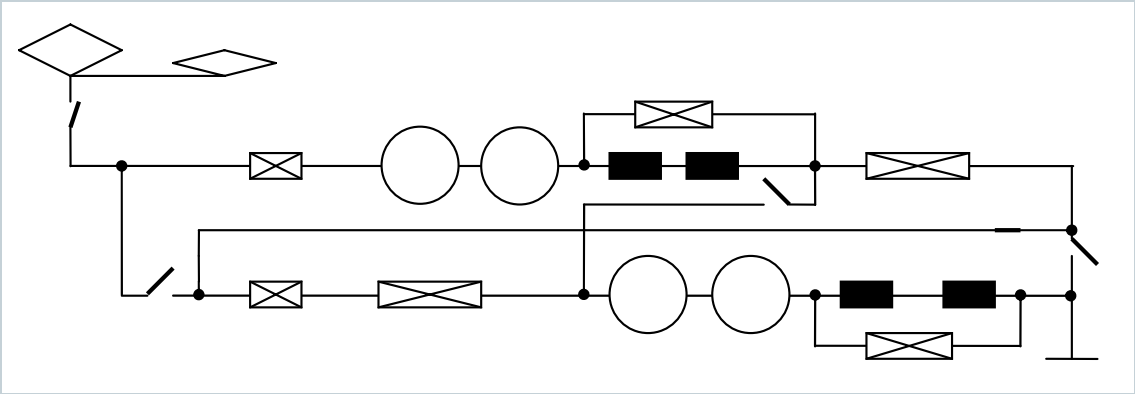


Associação de motores DC (exemplo)

Locomotiva E444





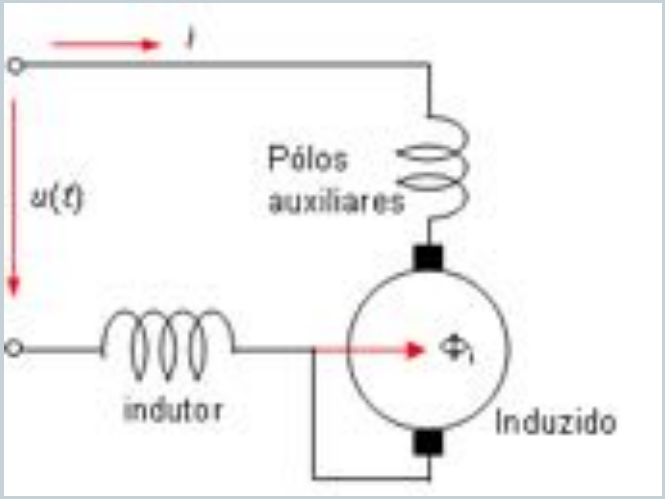


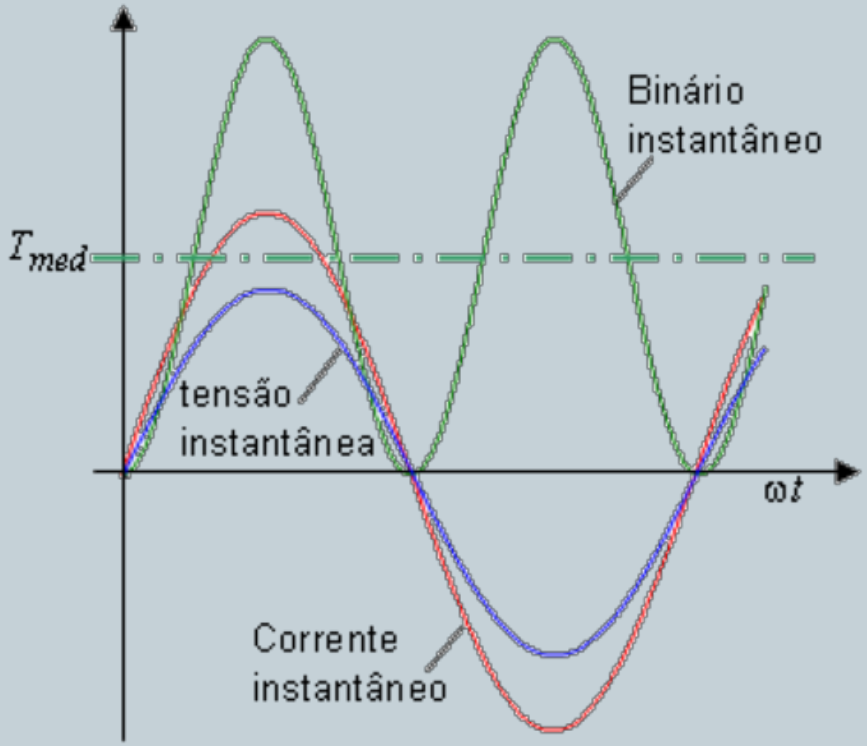
Motor DC em corrente alternada

Um motor série é capaz de operar em corrente contínua ou alternada. Esta razão leva a denominá-lo de **motor universal**.

Esta universalidade deve-se ao facto de como o indutor e o induzido se encontrarem em série uma inversão na corrente resulta numa inversão no fluxo, esta dupla inversão mantém o binário constante.

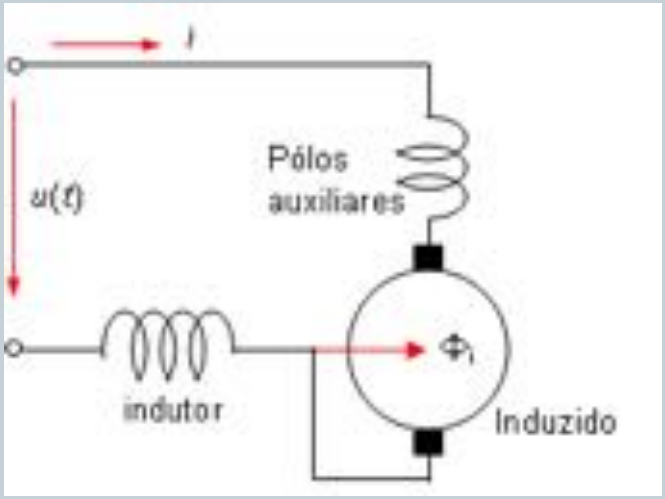
Motor DC em corrente alternada

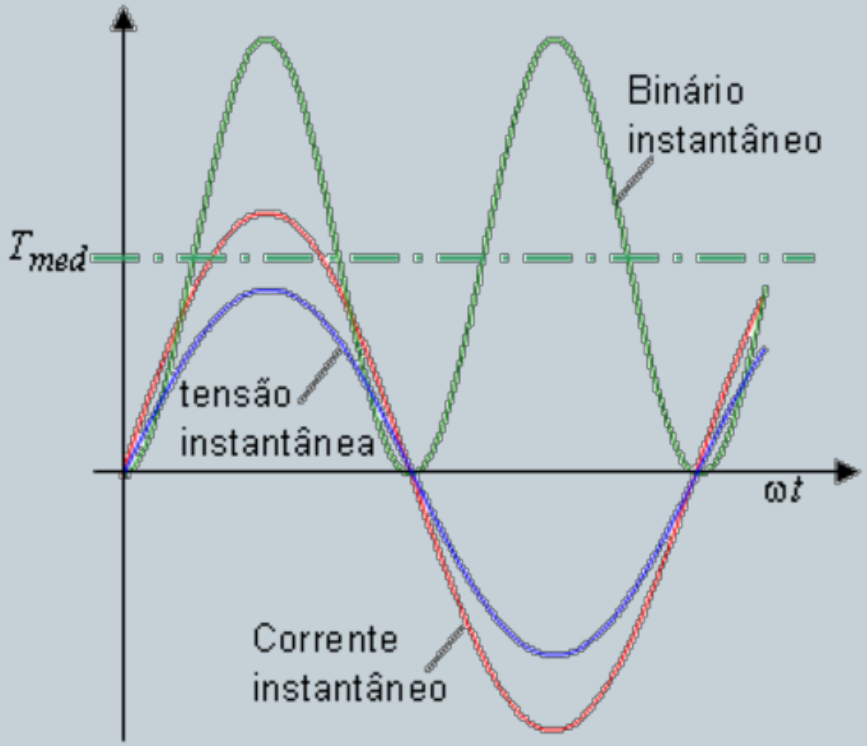




Os circuitos são pouco indutivos e a corrente que os atravessa é alternada sinusoidal e pode ser considerada praticamente em fase com a tensão

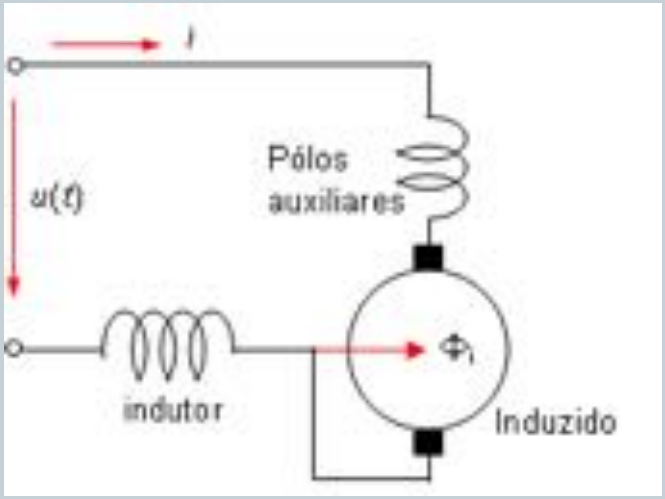
Motor DC em corrente alternada

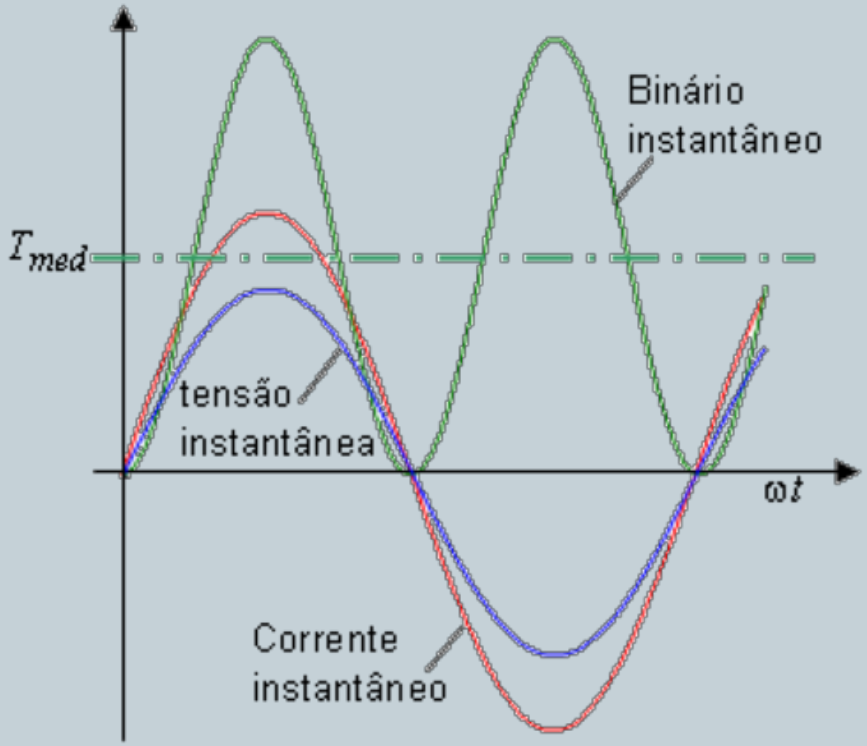




$$T_{med} = ?$$

Motor DC em corrente alternada





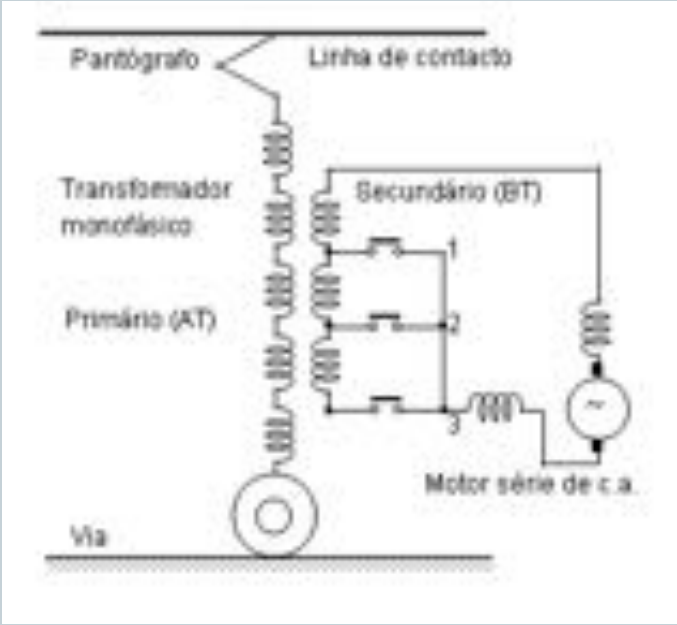
Os motores série de colector em corrente alternada têm a sua maior aplicação em tracção eléctrica. Na Europa central (Alemanha, Suíça, Dinamarca) emprega-se motores com tensões de 1500 V e frequência $16^{2/3}$ Hz. Esta baixa frequência contribui para uma melhor comutação sem faíscas no colector e conduzem a baixas perdas no ferro.

Motor DC em corrente alternada

O arranque destes motores é feito por meio de um transformador redutor, cujo primário está aplicado à tensão da catenária e cujo secundário tem diversas tomadas que se fecham à medida que o motor embala.

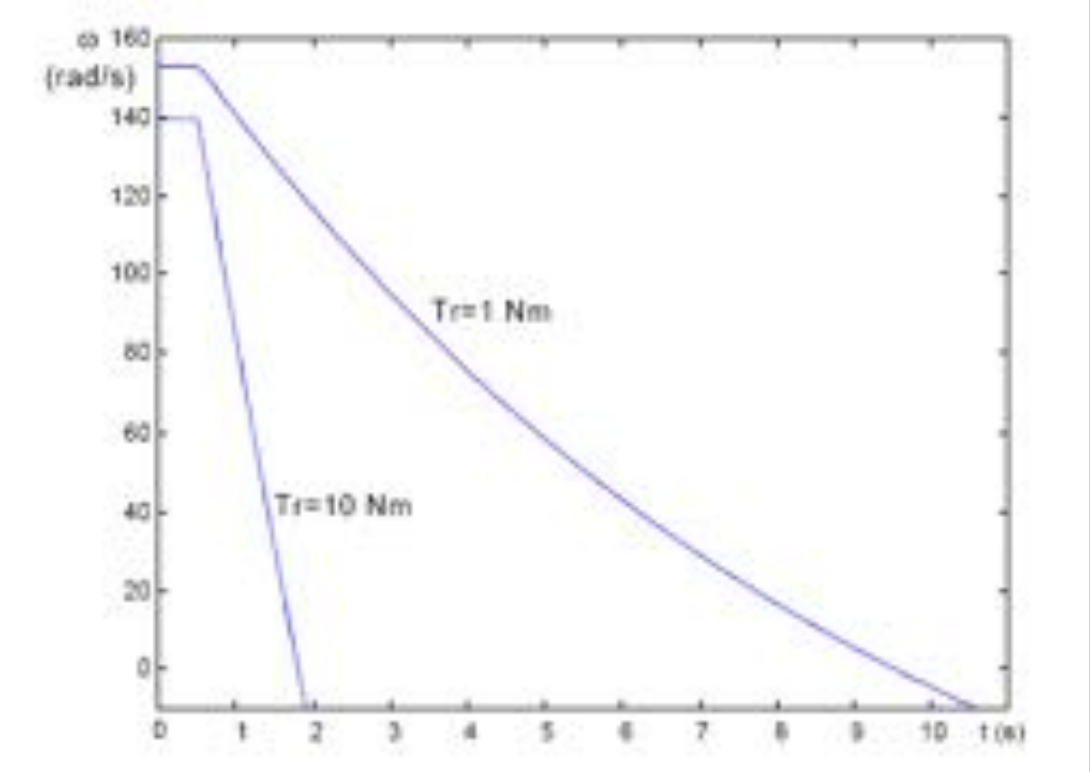
Ao passar da tomada 1 para a tomada 2 deve ter-se a precaução de desligar a tomada 1 para não se curto circuitar a secção do secundário, e assim sucessivamente.

Quantas mais tomadas houver no secundário mais suave é o arranque do motor.



Motor DC (Frenagem)

O tempo de paragem por frenagem natural depende do momento de inércia das massas girantes e dos binários exteriores aplicados. (coeficiente de atrito = 0,01 Nmseg)



Motor DC (Frenagem)

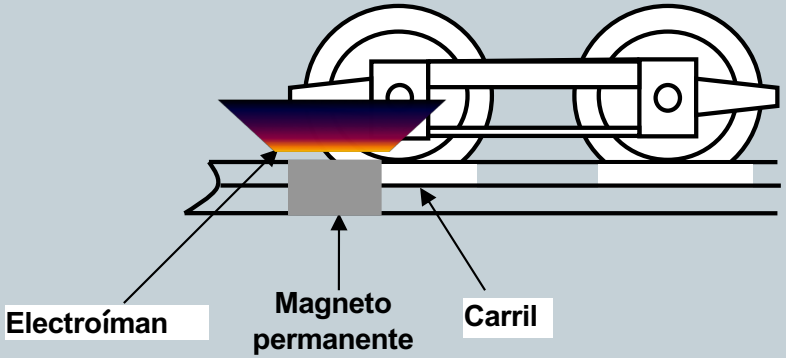
A frenagem eléctrica pode ser combinada com outros tipos de frenagem (mecânica ou electromagnética)

A **travagem electromagnética** é feita através de um electroíman que se encontra no bogie e corre junto ao carril. É caracterizada por ser uma travagem bastante suave. Quando necessária a sua utilização excita-se o electroíman, que provoca uma força de atracção entre electroíman e carril. Com isto, é libertada energia sob forma de calor (efeito de Joule), pois para além da acção do atrito, são induzidas correntes no carril, que também provocam libertação de calor.

A excitação do electroíman pode ser feita directamente a partir da tensão da linha ou utilizando os motores como geradores.

Motor DC (Frenagem)

A frenagem electromagnética é um método de travagem que é utilizado, no caso do Metro de Lisboa, quando a carruagem entra numa estação a mais de 30Km/h. Mas neste caso a frenagem magnética entra em acção, por medida de segurança e o seu movimento é bastante brusco. Este sistema funciona através da colocação à entrada da estação, um magneto permanente no carril.



O comboio ao passar com o seu electroíman que é excitado ao passar junto do magneto, devido à velocidade relativa. Essa excitação (força electromotiz induzida induzida) será tanto maior quanto maior for a velocidade. Fazendo, no caso de velocidade superior à estipulada, actuar o dispositivo de travagem.

Motor DC (Frenagem)

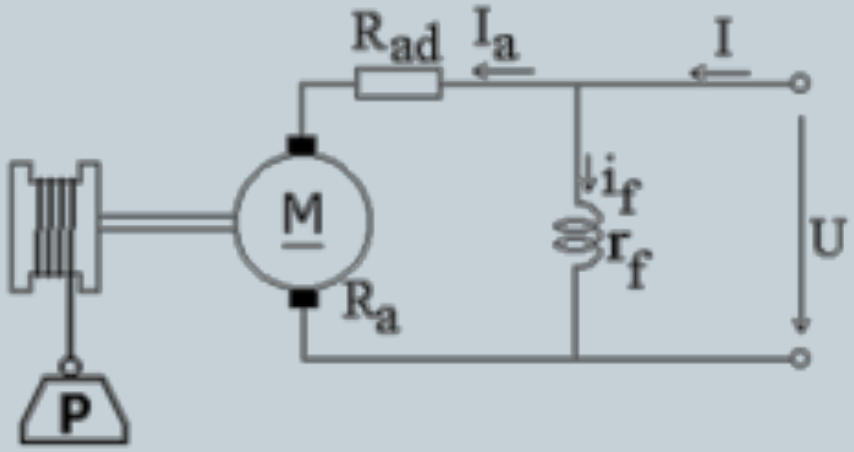
Na frenagem eléctrica a própria máquina deve desenvolver um binário opositor ao movimento através da alteração conveniente das suas ligações, quer à fonte de alimentação quer a resistências.

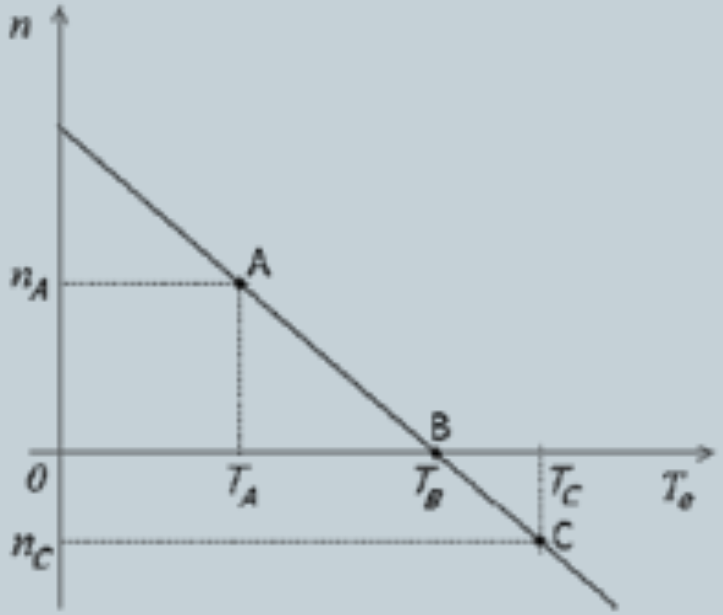
Podem distinguir-se três casos de frenagem eléctrica:

- frenagem por contracorrente, na qual o sentido da tensão U e o sentido da f.e.m. E são concordantes, isto é, ambas tendem a fazer circular a corrente da armadura no mesmo sentido;
- frenagem dinâmica ou reostática, na qual a tensão aplicada é anulada, e a armadura passa a alimentar uma resistência de carga, e
- frenagem regenerativa, na qual os sentidos de U e E continuam discordantes mas respeitando a relação $|U| < |E|$ obtida à custa do abaixamento da tensão U.

Motor DC (Frenagem por Contra-corrente)

Aumento da resistência adicional no ramo da armadura

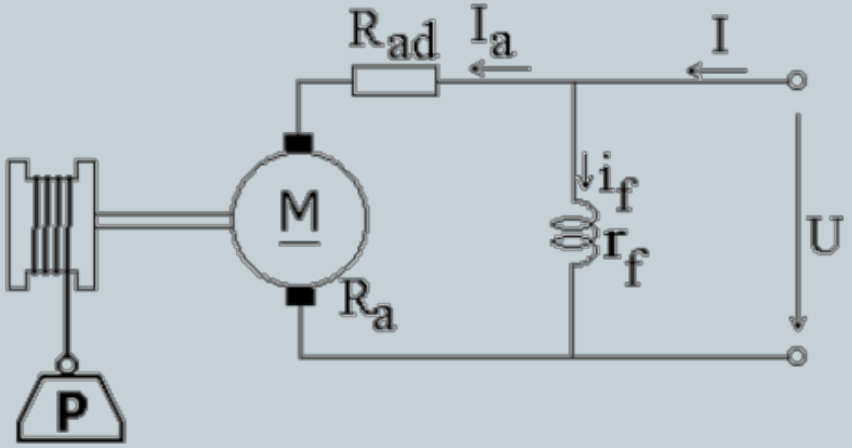


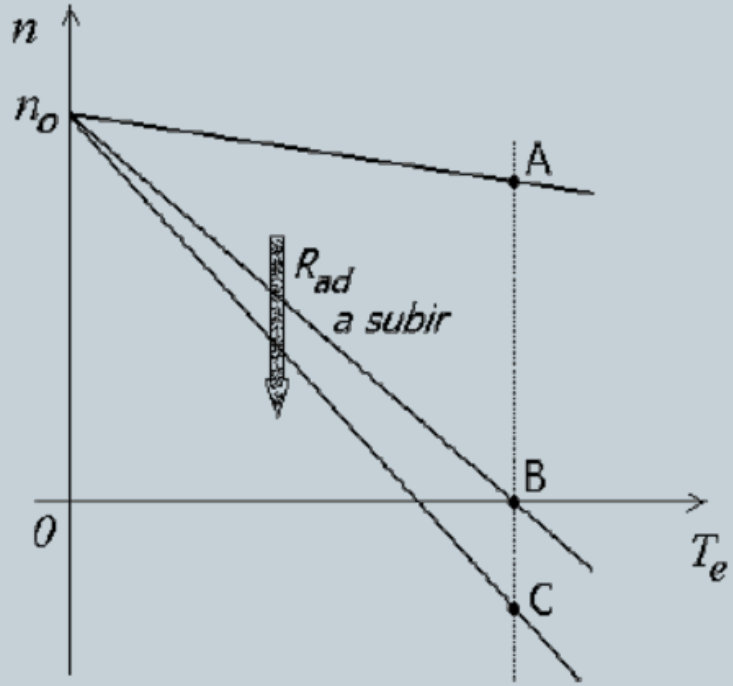


$$I_a\big|_A = \frac{U - E_a}{R_a} \qquad I_a\big|_B = \frac{U_a}{R_a} \qquad I_a\big|_C = \frac{U + |E_a|}{R_a}$$

Motor DC (Frenagem por Contra-corrente)

Aumento da resistência adicional no ramo da armadura



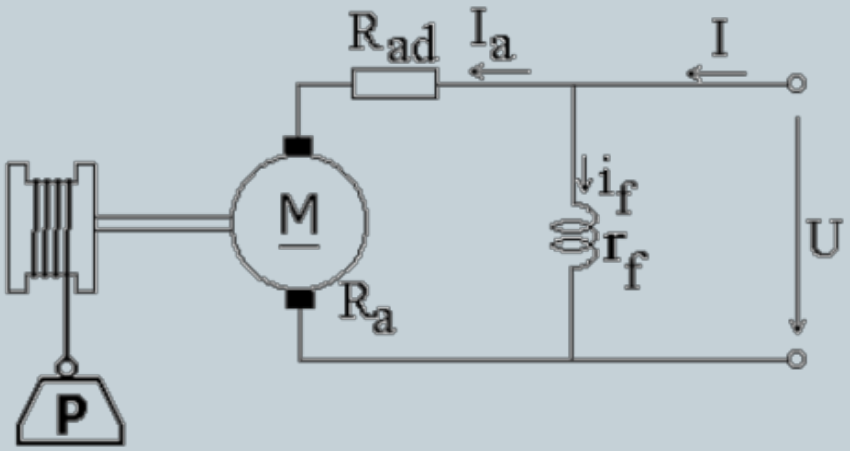


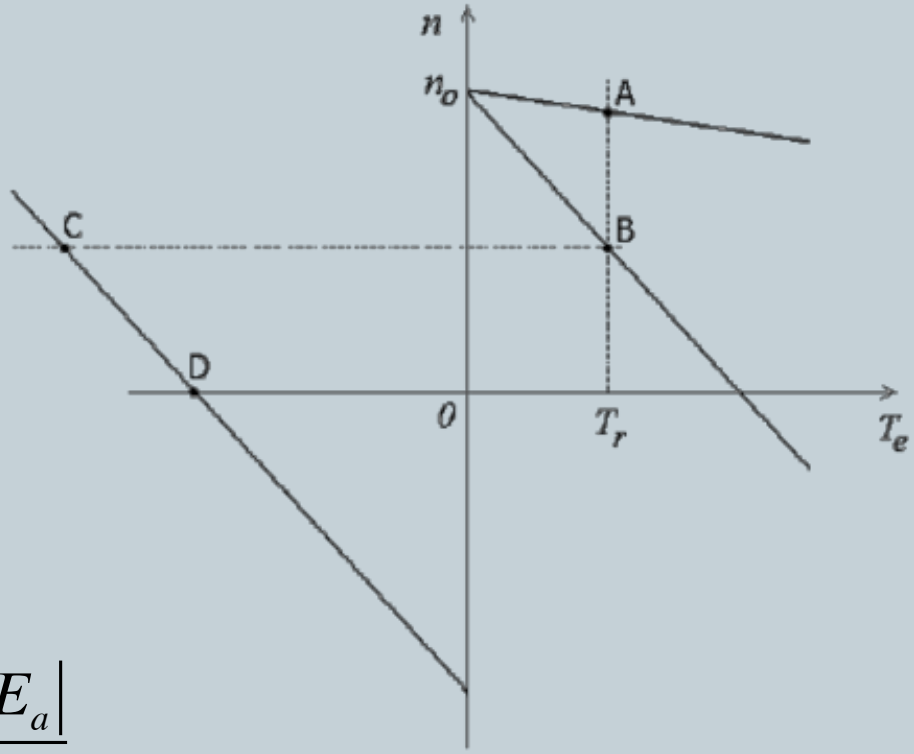
$$\omega_m = \frac{U - R_a I_a}{k_a \varphi} \Rightarrow \omega_m = \frac{U}{k_a \varphi} - \frac{(R_a + R_{ad}) I_a}{k_a \varphi}$$

$$I_a|_C = \frac{U + |E_a|}{R_a + R_{ad}|_C}$$

Motor DC (Frenagem por Contra-corrente)

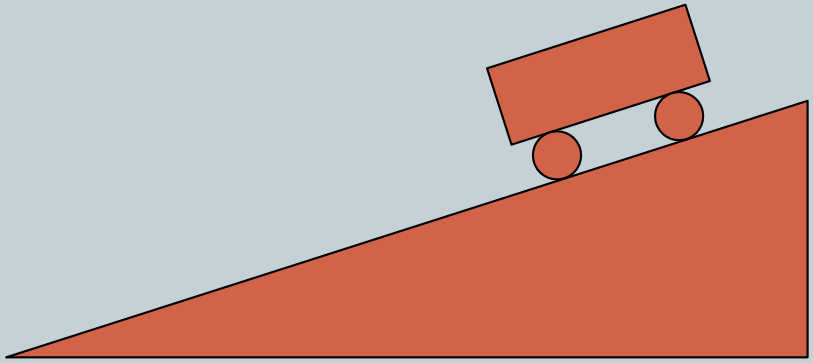
Inversão da tensão aplicada à armadura

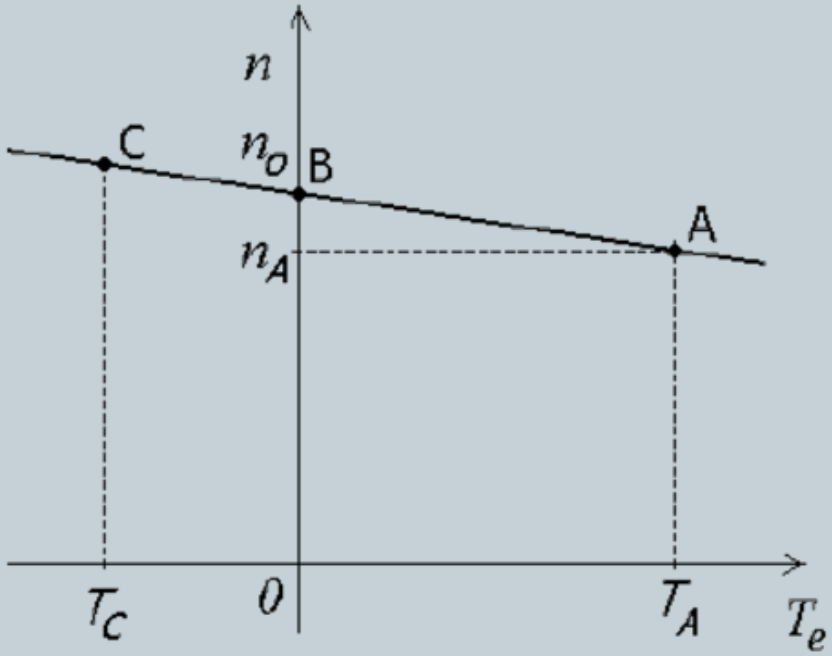




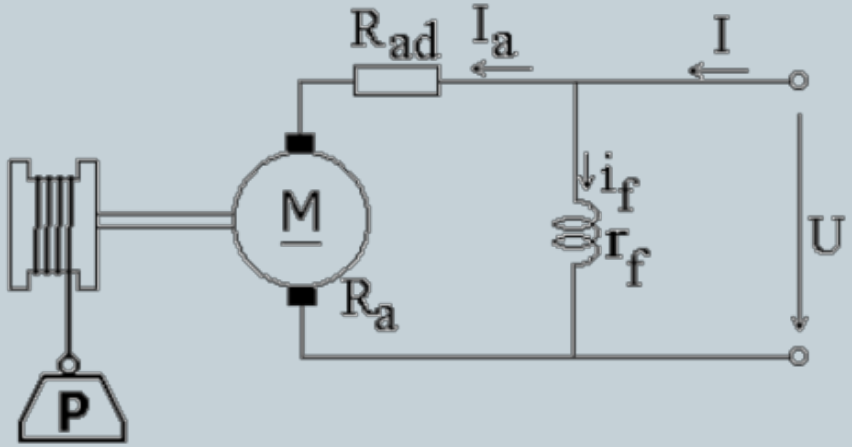
$$I_a\big|_B = \frac{U - E_a}{R_a} \qquad I_a\big|_C = -\frac{U + |E_a|}{R_a}$$

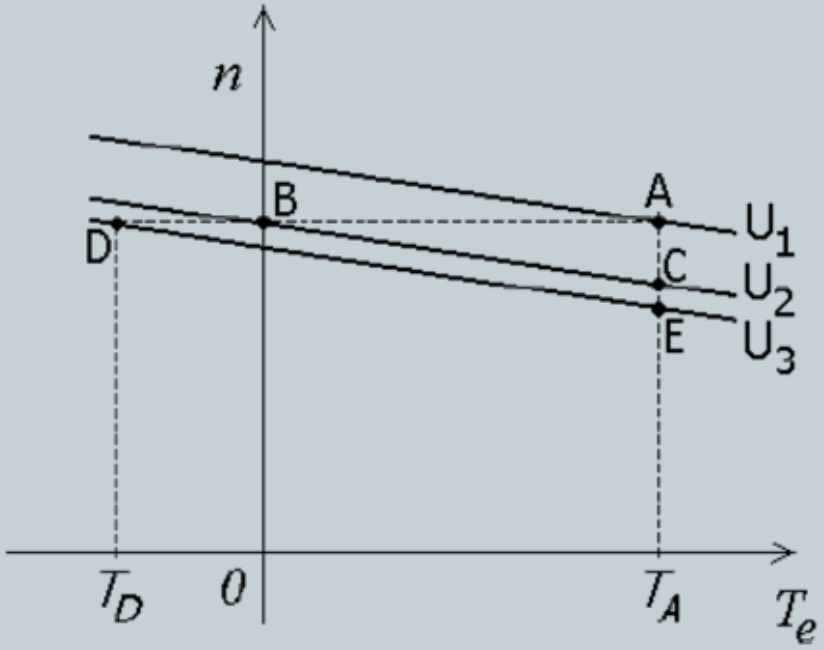
Motor DC (Frenagem regenerativa)





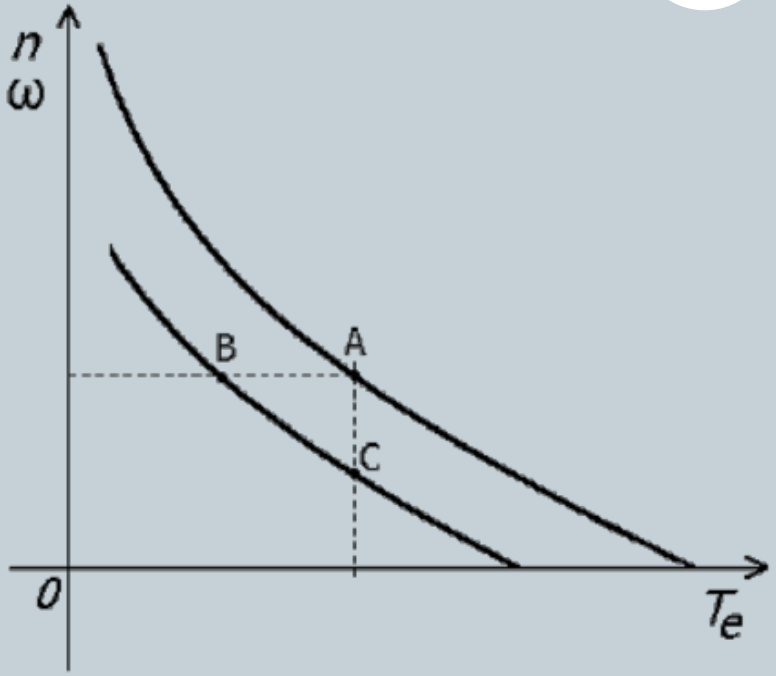
Motor DC (Frenagem regenerativa)





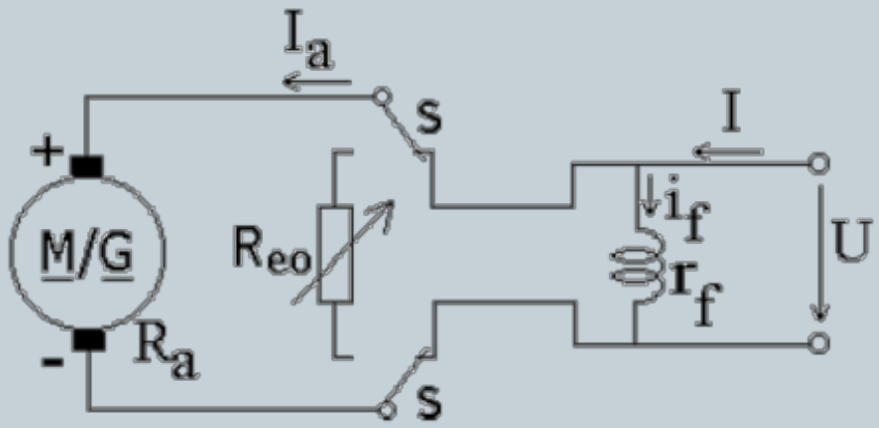
... por diminuição da tensão aplicada à armadura

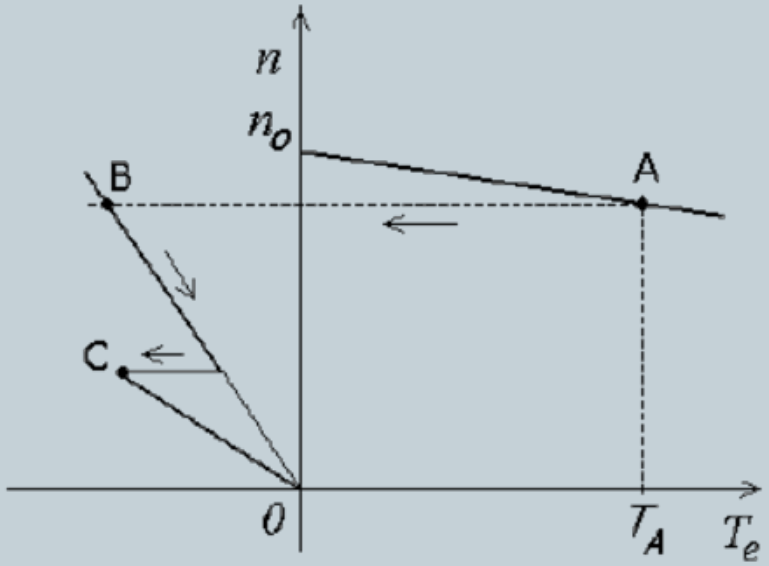
Motor DC (Frenagem regenerativa)



Com excitação série a diminuição da tensão não conduz à regeneração

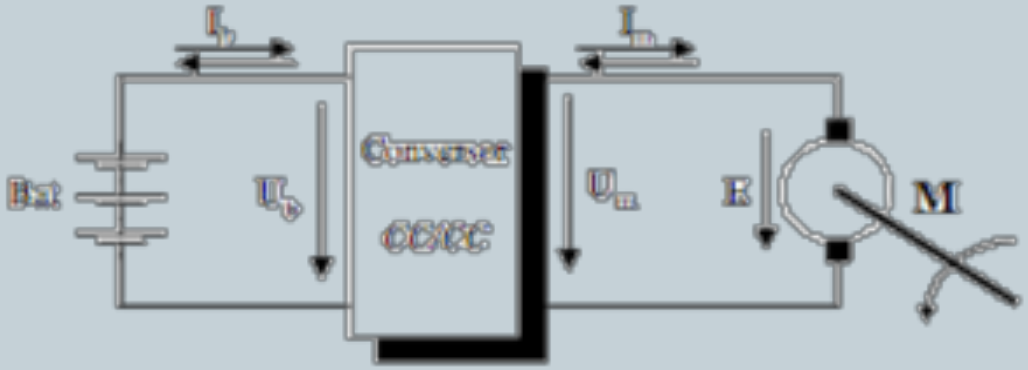
Motor DC (Frenagem dinâmica ou reostática)





$$I_a\big|_B = -\frac{E_a}{R_a + R_{reo}}$$

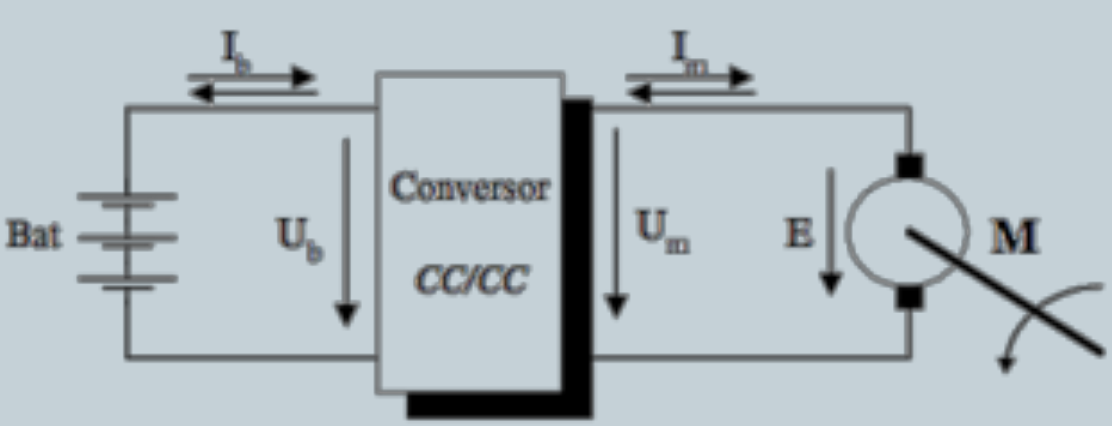
Motor DC (Frenagem electrónica)

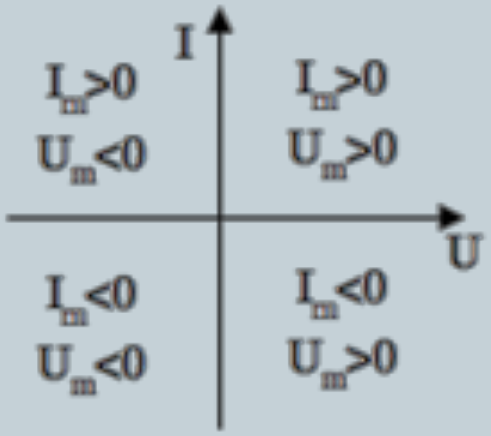




- Frenagem electrónica
  - Conversor controlado em tensão: por diminuição de U (U<Ea)
  - Conversor controlado em corrente: invertendo o sentido de Ia (método mais eficiente, pois controla-se directamente o binário)

Motor DC (Frenagem electrónica)





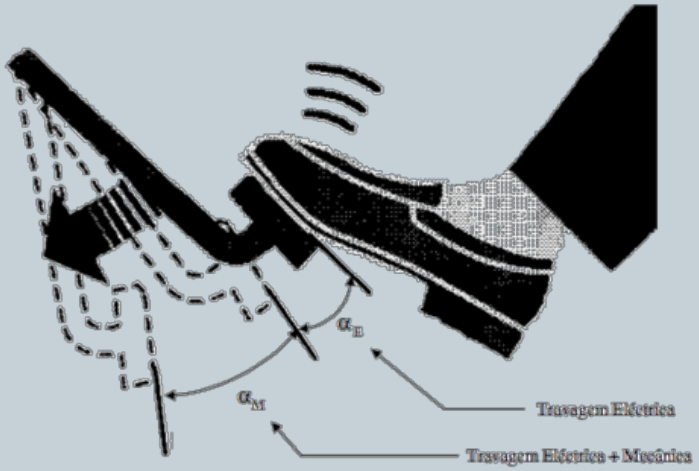
- No entanto, as baterias possuem uma capacidade limitada de absorver corrente:
  - Utilização de supercondensadores em paralelo
  - Baterias de alto desempenho
  - Utilização e rodas de inércia

Motor DC (Frenagem electrónica)

- A frenagem eléctrica é habitualmente combinada com a mecânica para aumentar a segurança

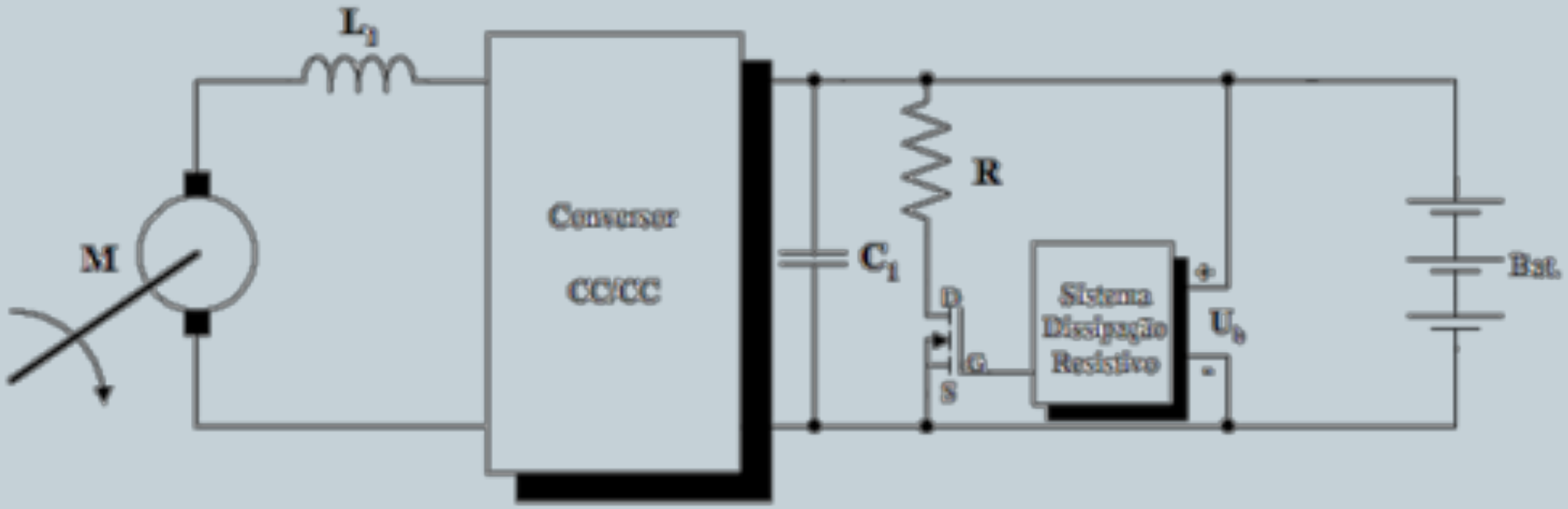
- Travagem eléctrica – recuperação de energia
- Travagem mecânica – segurança

- Travagem híbrida



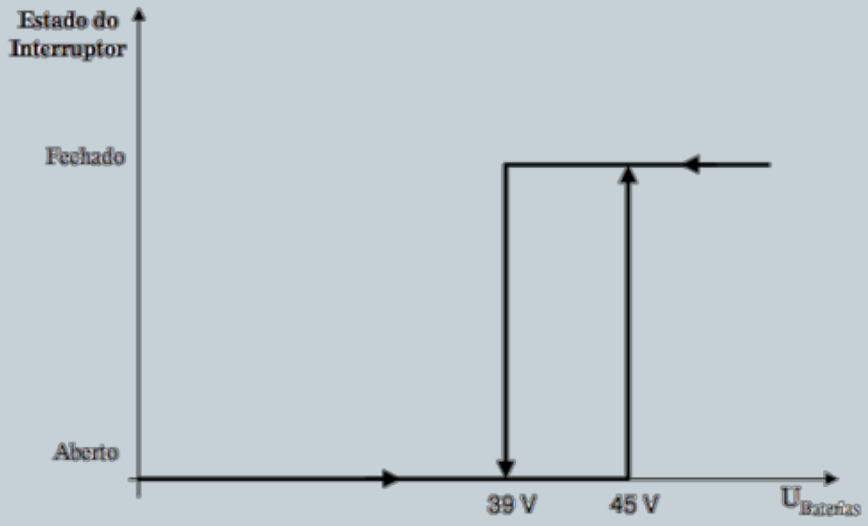
Motor DC (Frenagem electrónica)

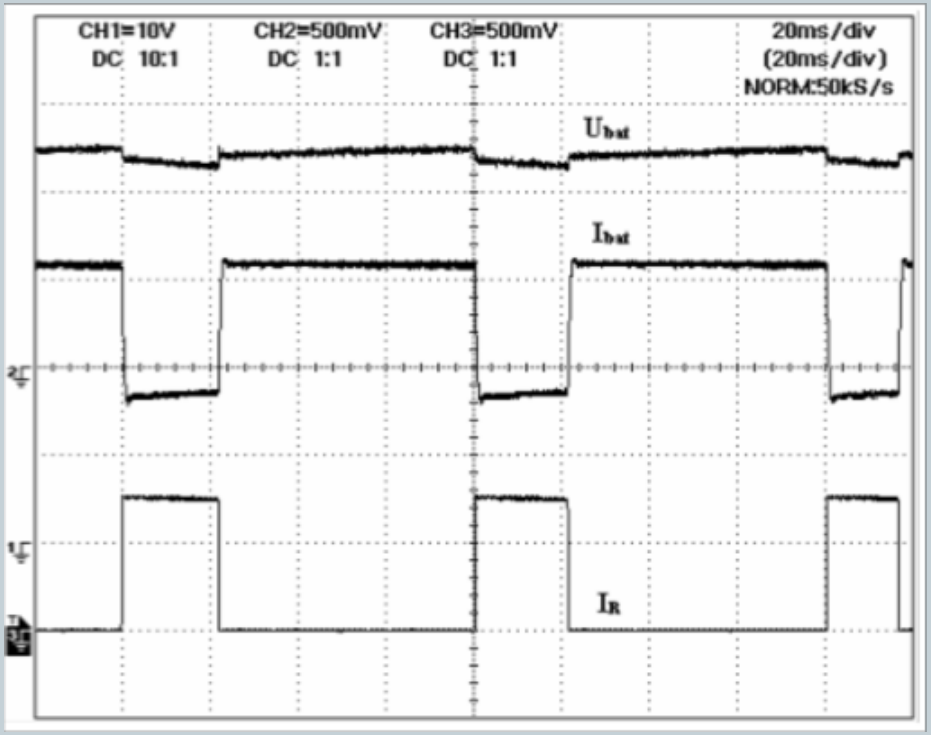
- Coloca-se geralmente uma resistência de dissipação como forma de protecção das baterias



Motor DC (Frenagem electrónica)

- Coloca-se geralmente uma resistência de dissipação como forma de protecção das baterias





Motor DC (aumento da velocidade por diminuição da corrente de excitação)

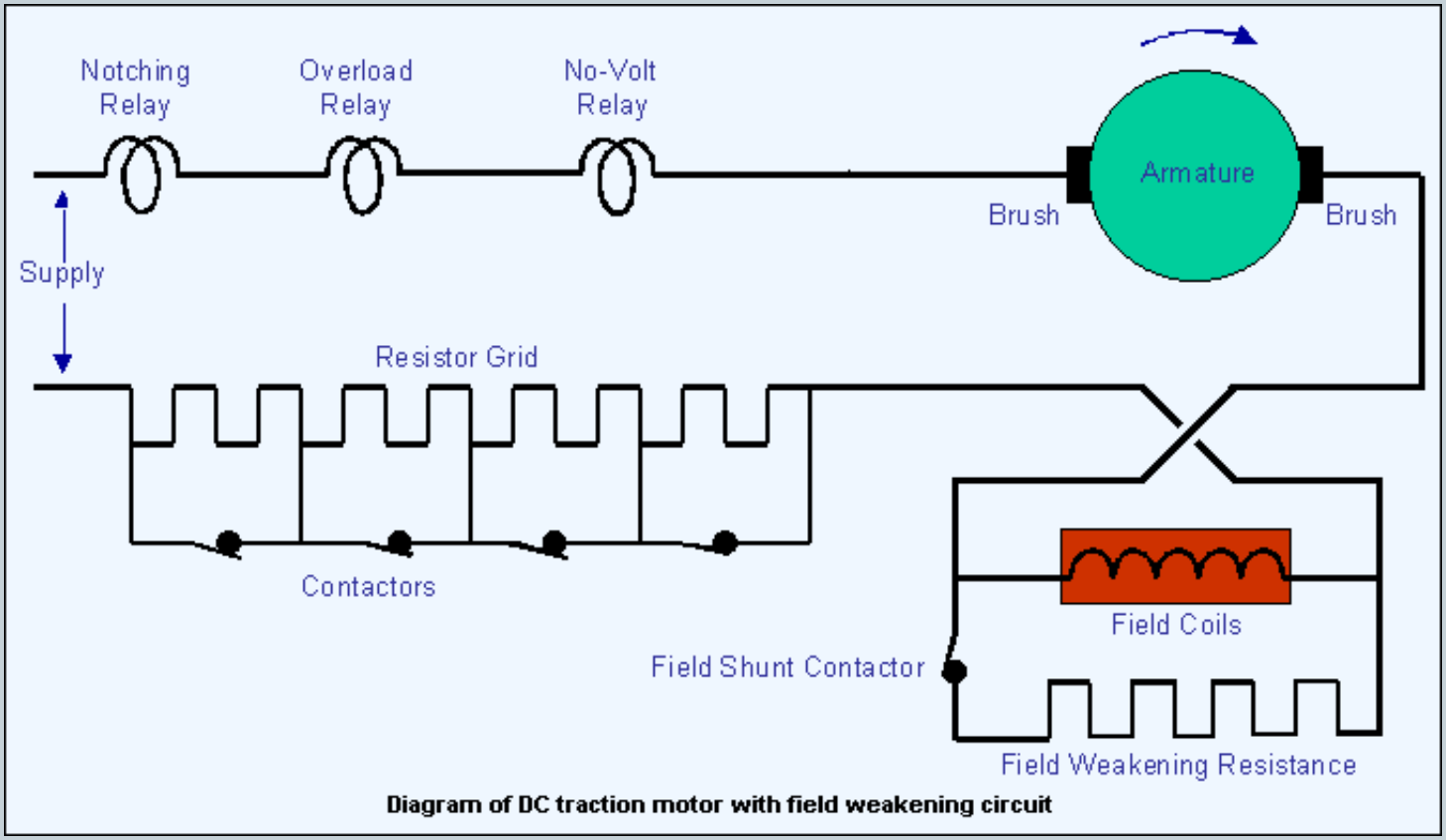


Diagram of DC traction motor with field weakening circuit

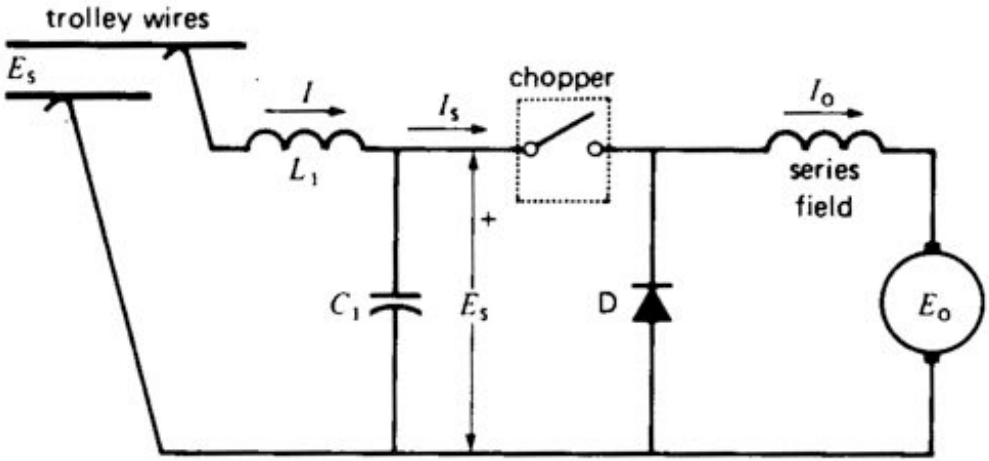
Motor DC (modelo dinâmico)

$$\begin{cases} u_f = R_f i_f + L_f \dfrac{di_f}{dt} \\ u_a = R_a i_a + L_a \dfrac{di_a}{dt} + e_a = R_a i_a + L_a \dfrac{di_a}{dt} + k_a \Phi \omega \\ T_m = k_a \Phi i_a = J \dfrac{d\omega}{dt} + k_D \omega + T_r \end{cases}$$

Motor DC (controlo eletrônico básico)

- Os motores DC, particularmente o motor série, têm sido utilizados em tração ferroviária devido às suas boas características.
- Inicialmente controlados reostaticamente, os sistemas foram sendo adaptados para a introdução de circuitos electrónicos de potencia, mantendo o motor
- Os choppers iniciais funcionavam a frequência constante (cerca de 2kHz) variando apenas o fator de ciclo





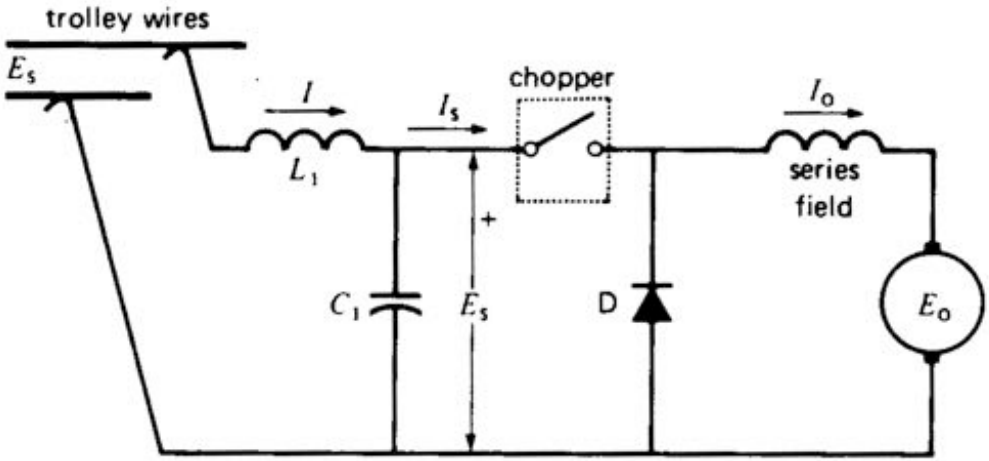
Motor DC (controlo eletrônico básico)

Considere um trolley movido por um motor DC (150CV; 1500 rpm; 600V). A corrente nominal de plena carga é 200A e a resistência da armadura+campo vale 0,1Ω. A catenária fornece uma tensão de 700V. O chopper controla o binário e a velocidade. A frequência varia entre 500 e 1600 Hz, mas o tempo de condução está fixo em 600useg.

a)Calcular a frequência do chopper e a corrente solicitada ao fio de contacto, quando o veiculo se encontra parado e o motor consome 240A.

b)Qual a frequência do chopper quando o motor funciona em regime nominal.





Motor DC (controlo eletrônico básico)

Considere um motor DC (25CV; 900 rpm; 250V; 80A) alimentado por um conversor a operar a 2kHz. Este conversor é alimentado por um rectificador trifásico de 6 pulsos ligado a uma rede 240V/60Hz.

a)Qual o fator de ciclo quando o motor opera em condições nominais

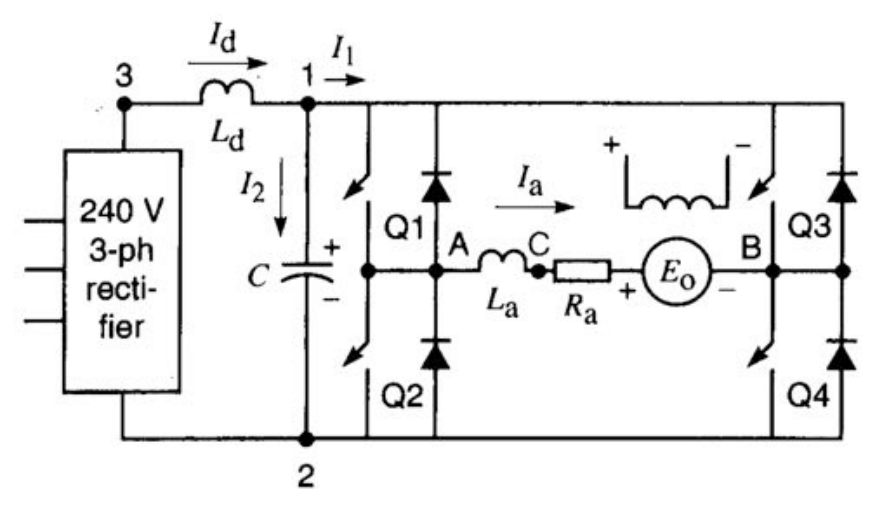
b)Desenhar as formas de onda de I_1, I_2 e Ia; E_{12} e E_{AB}

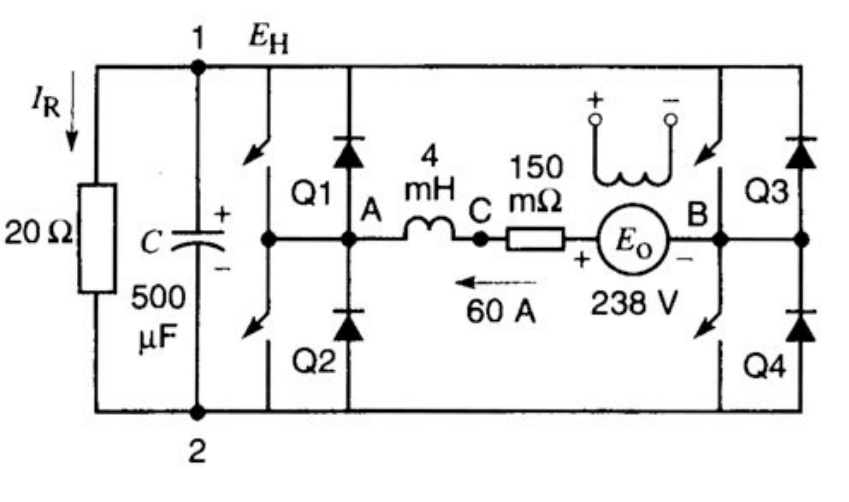
Considere que o motor está a rodar a 900rpm quando se inicia um processo de travagem (considere a inércia do motor e a carga elevadas por forma a que a velocidade não possa variar muito rapidamente) por aplicação de uma resistência de travagem de 20Ω. Assume-se que um binário de travagem igual a 65% do binário nominal é suficiente. Determinar:

c)A tensão aos terminais da resistência de travagem

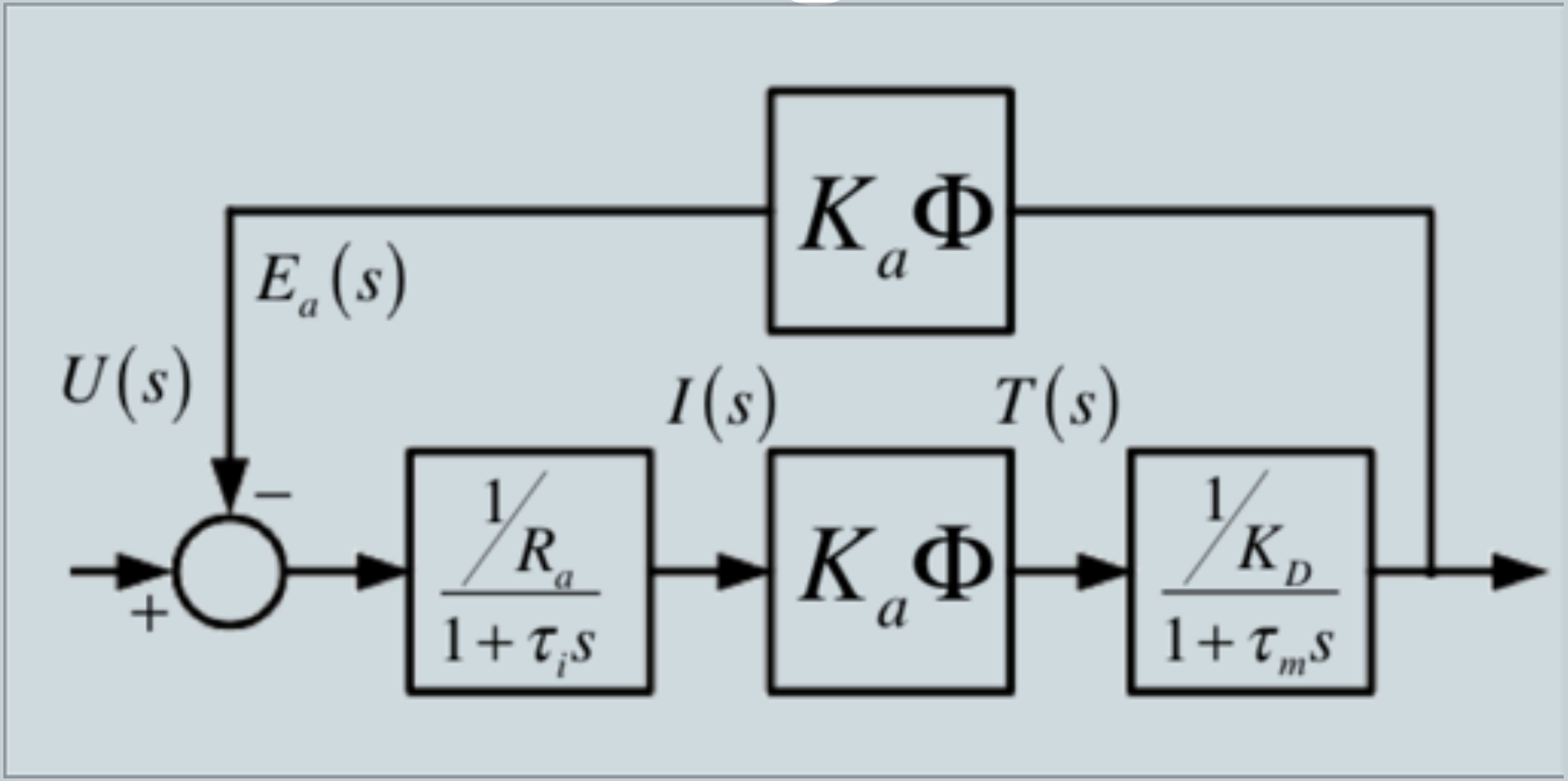
d)O fator de ciclo

e)O comportamento do sistema durante a travagem



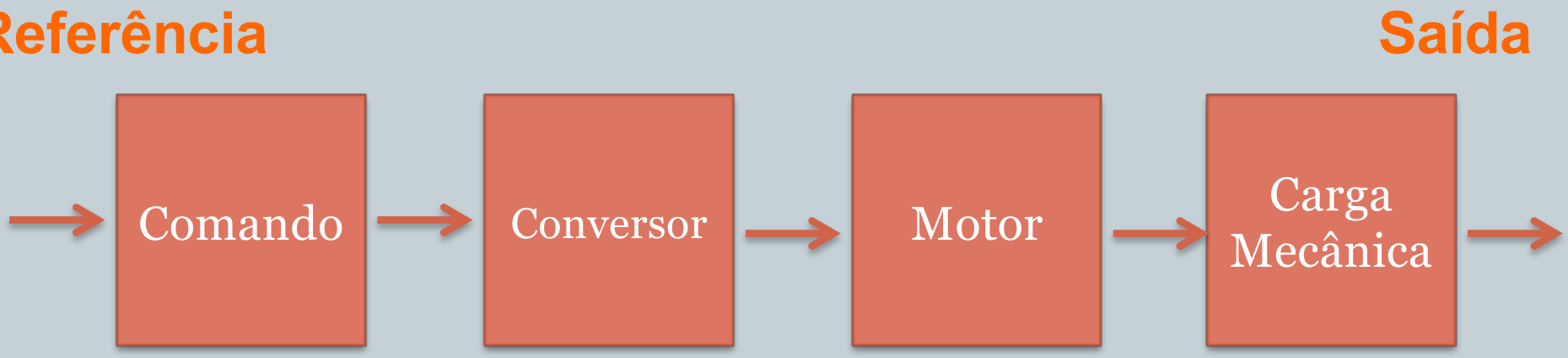


Motor DC (modelo dinâmico)



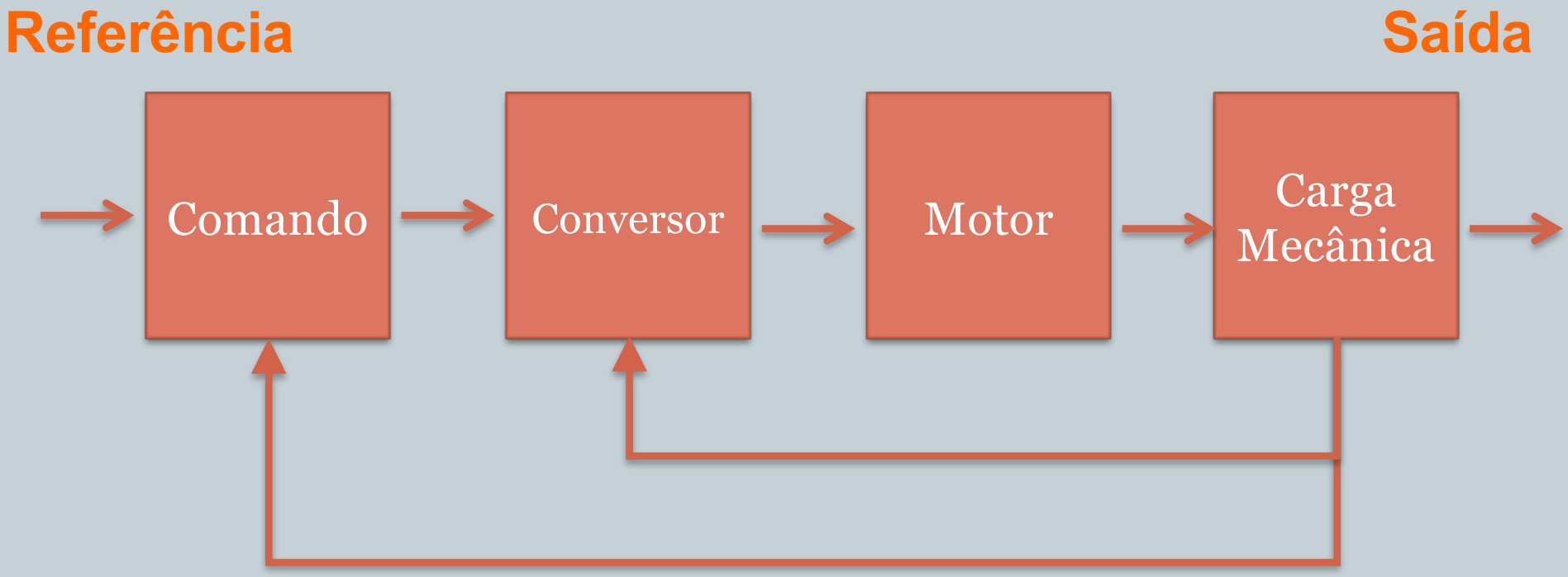
Motor DC inserido em accionamento

- Comando em cadeia aberta



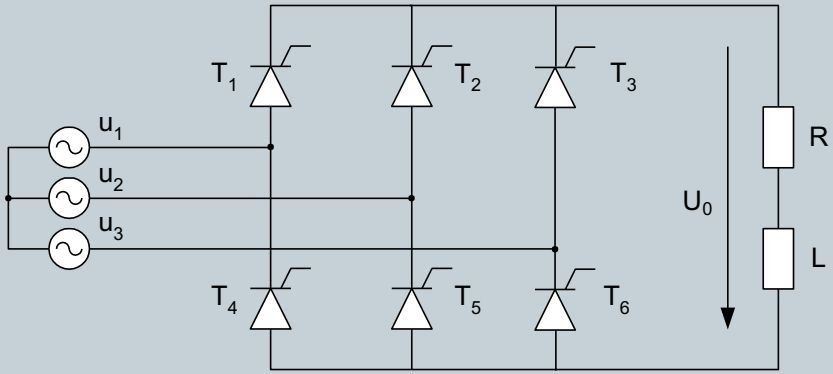
Motor DC inserido em accionamento

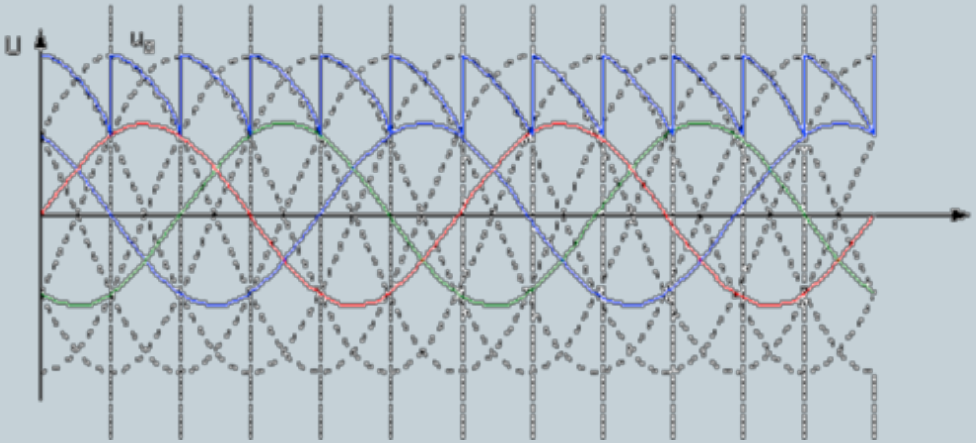
- Controlo em cadeia fechada



Motor DC inserido em accionamento

- Conversor electrónico de potência (por exemplo, rectificador controlado trifásico em ponte)





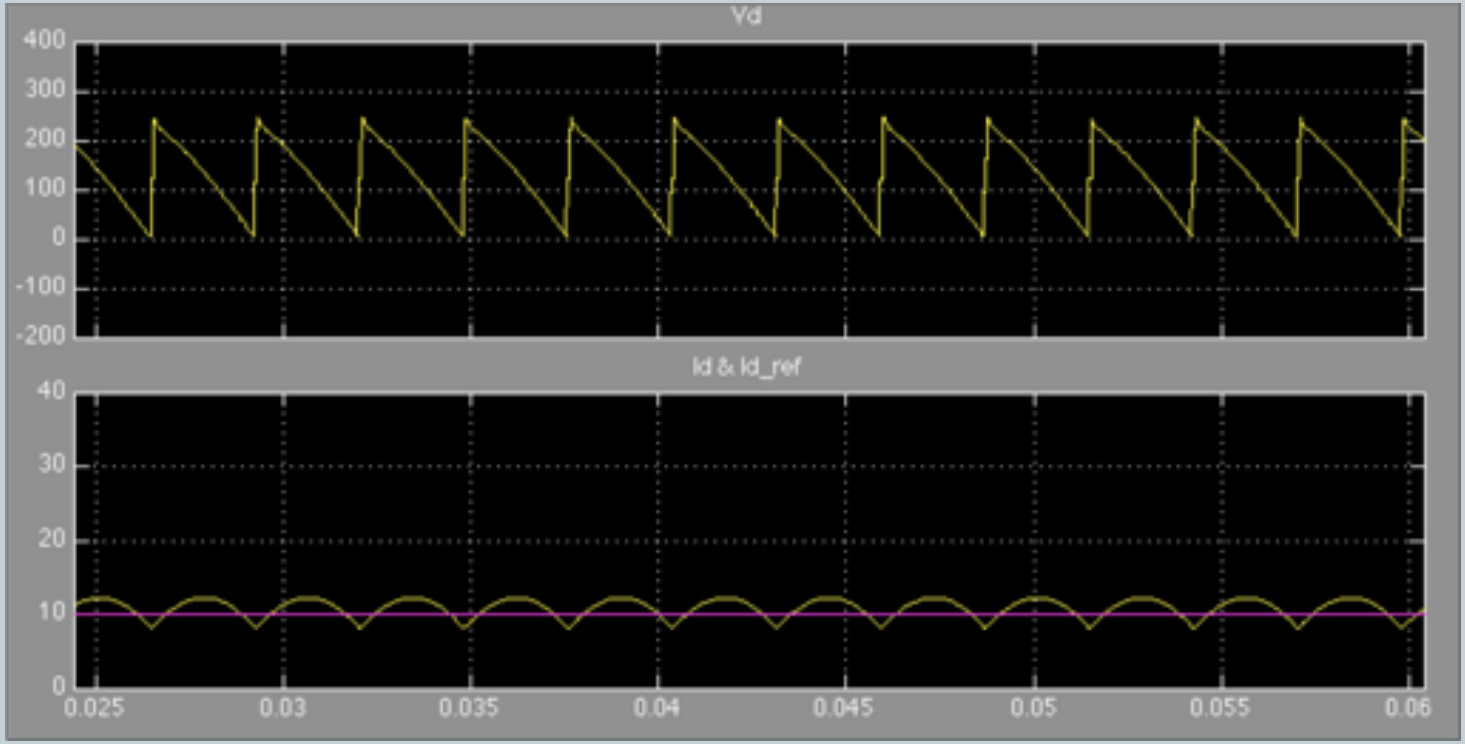
$$V_o = \frac{3}{\pi}\int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \sqrt{2}V_{ef}\sin(\omega t)d\omega t$$

$$V_o = 1{,}35V_{ef}\cos\alpha$$

Motor DC inserido em accionamento

- Conversor electrónico de potência (carga RLE)

$$V_o = 1{,}35 V_{ef} \cos\alpha$$

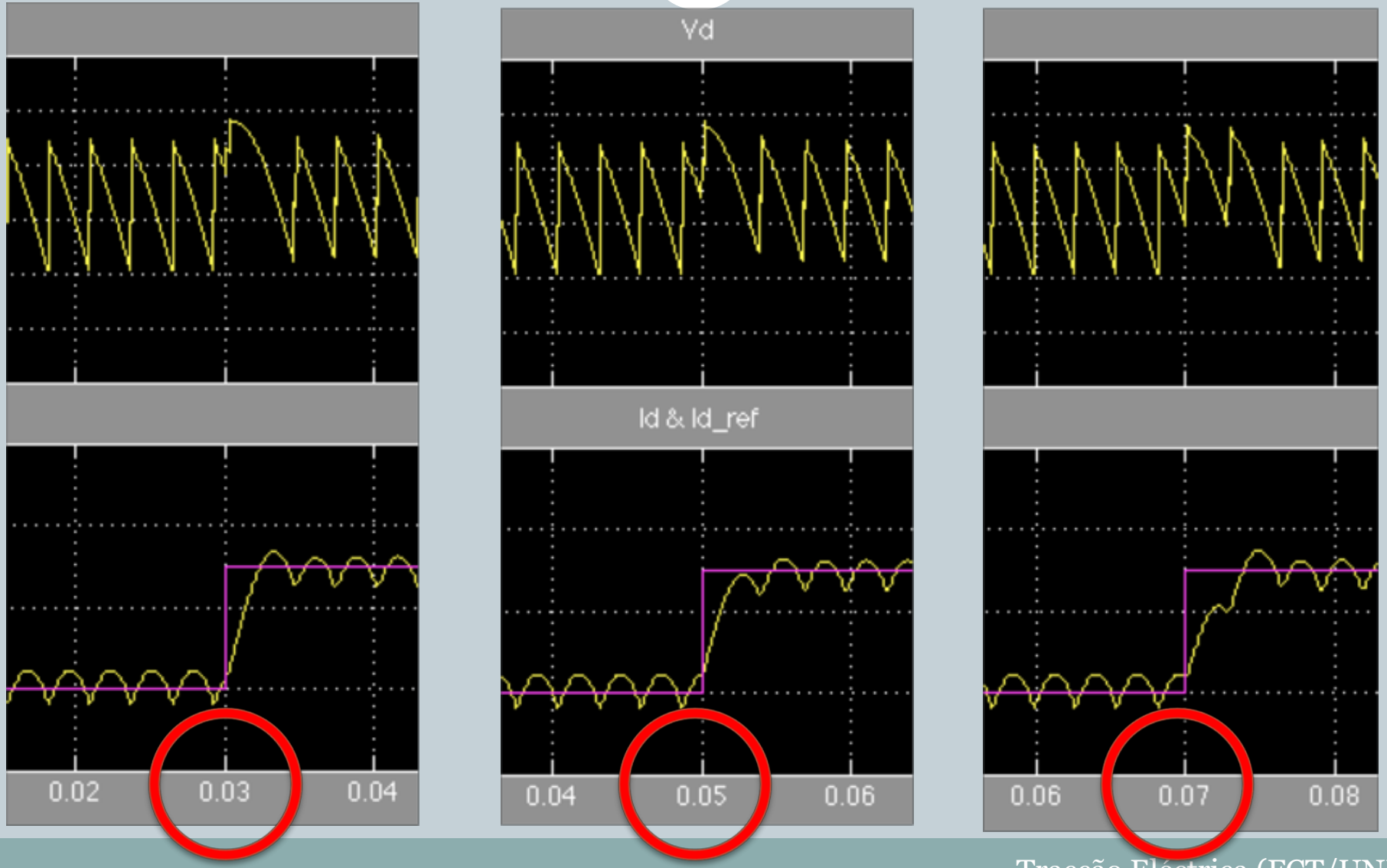


Motor DC inserido em accionamento

- Para modelizar o regime dinâmico há que ter em consideração os aspectos transitórios.
- A evolução das grandezas depende do instante de variação da referência (variação do ângulo de disparo)

- $V_o = 1{,}35 V_{ef} \cos\alpha$

Motor DC inserido em accionamento



Motor DC inserido em accionamento

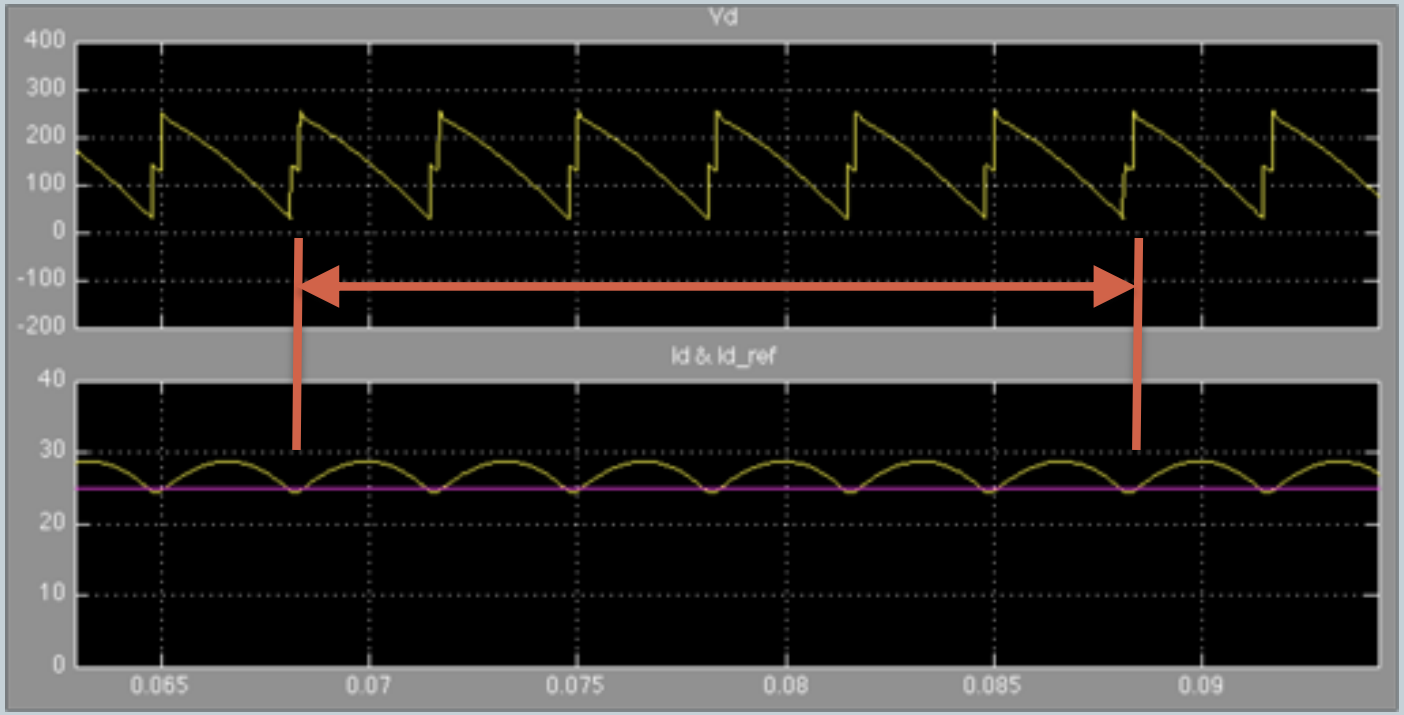
- O atraso dinâmico depende do instante em que ocorre a variação da referência.
- Para efeitos de modelização considera-se um **atraso estatístico**: valor médio do intervalo entre disparos consequitivos.

$$\tau_e = \frac{\Delta T}{2}$$

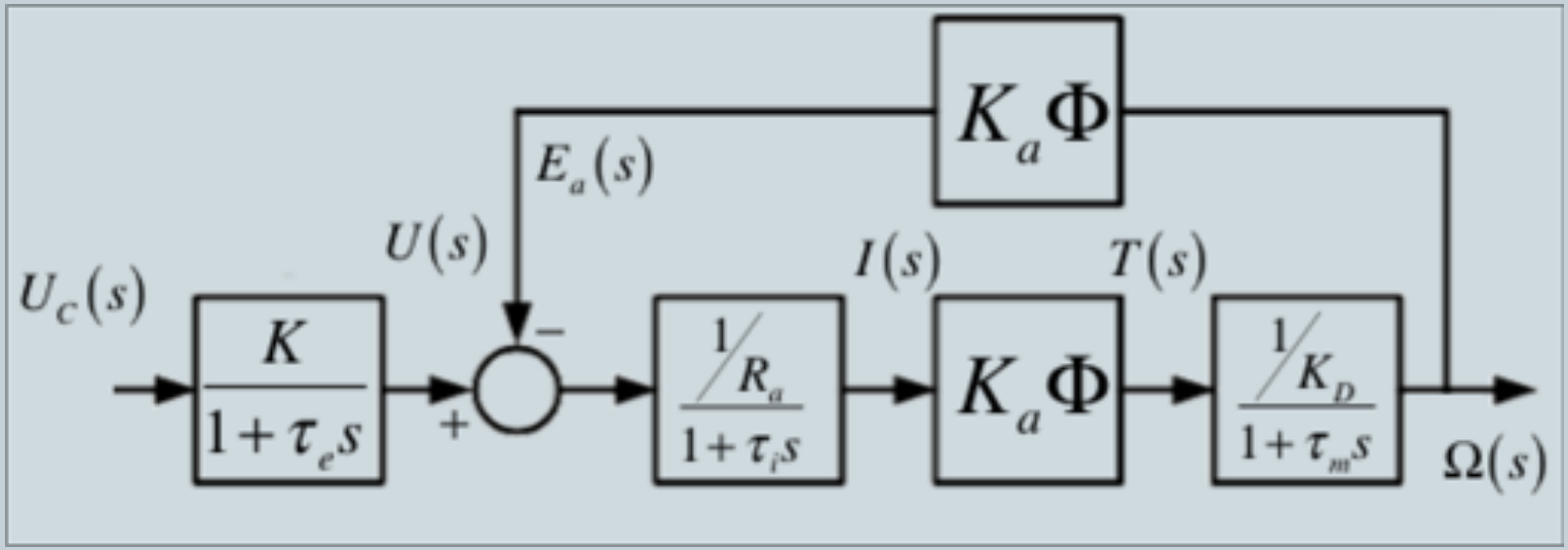
Motor DC inserido em accionamento

- No caso de um rectificador trifásico em ponte temos $\Delta T = 20/6 = 3{,}3$ mseg.
- O atraso estatistico vale $\tau_\varepsilon = 1{,}67$ mseg

$$\frac{K}{1+\tau_e s}$$



Regulação de velocidade em cadeia aberta



Regulação de velocidade em cadeia aberta

$$\Omega(s) = \frac{K}{1+\tau_e s} \frac{\frac{k_a\Phi}{JR_a\tau_i}}{s^2 + \frac{s}{\tau_i} + \frac{(k_a\Phi)^2}{JR_a\tau_i}} U_c(s) - \frac{\frac{1}{J\tau_i}(1+\tau_i s)}{s^2 + \frac{s}{\tau_i} + \frac{(k_a\Phi)^2}{JR_a\tau_i}} T_r(s)$$

Em regime estacionário:

$$\omega = \frac{K}{k_a\Phi} U_c - \frac{R_a}{(k_a\Phi)^2} T_r$$

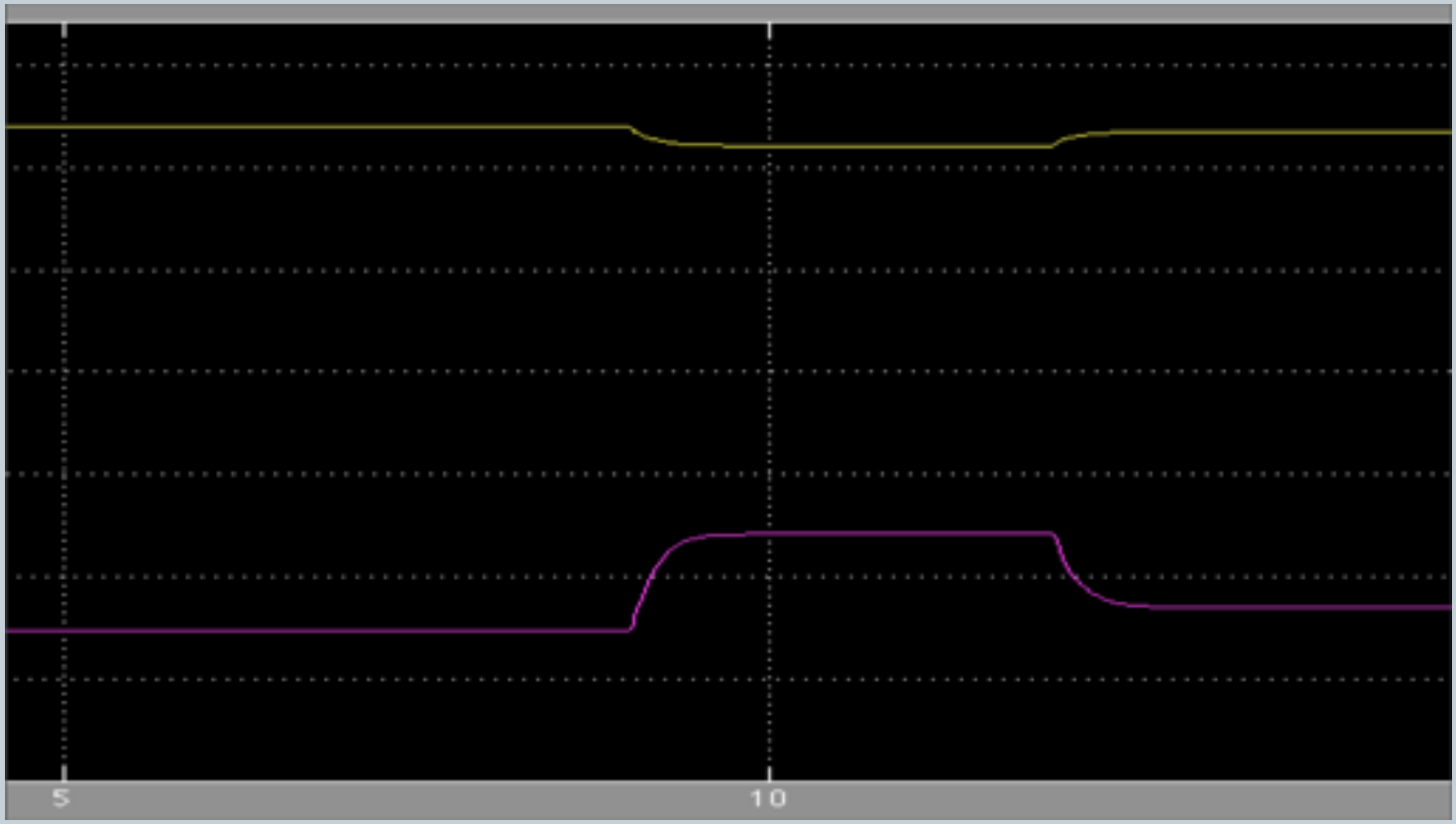
Erro de velocidade

Regulação de velocidade em cadeia aberta

Erro de velocidade em regime estacionário:

Velocidade

Binário



Regulação de velocidade em cadeia aberta

$$\Omega(s) = \frac{K}{1+\tau_e s} \frac{\frac{k_a \Phi}{J R_a \tau_i}}{s^2 + \frac{s}{\tau_i} + \frac{(k_a \Phi)^2}{J R_a \tau_i}} U_c(s) - \frac{\frac{1}{J\tau_i}(1+\tau_i s)}{s^2 + \frac{s}{\tau_i} + \frac{(k_a \Phi)^2}{J R_a \tau_i}} T_r(s)$$

Considerando apenas um bnário de atrito linear ($K_D\omega$):

$$\Omega(s) = \frac{K}{1+\tau_e s} \frac{\frac{k_a \Phi}{R_a k_D \tau_i \tau_m}}{s^2 + \frac{\tau_i + \tau_m}{\tau_i \tau_m} s + \frac{1}{\tau_i \tau_m} + \frac{(k_a \Phi)^2}{R_a k_D \tau_i \tau_m}} U_c(s)$$

Regulação de velocidade em cadeia aberta

Todo o conjunto apresenta um pequeno atraso, devido à dinâmica do conversor electrónico, e uma dinâmica de 2ª ordem (dois pólos -> um eléctrico e outro mecânico)...

$$\Omega(s) = \frac{K}{1+\tau_e s} \frac{\dfrac{k_a \Phi}{R_a k_D \tau_i \tau_m}}{s^2 + \dfrac{\tau_i + \tau_m}{\tau_i \tau_m} s + \dfrac{1}{\tau_i \tau_m} + \dfrac{(k_a \Phi)^2}{R_a k_D \tau_i \tau_m}} U_c(s)$$

Regulação de velocidade em cadeia aberta

Exemplo:

P (kW)	N (rpm)	T (Nm)	U (V)	I (A)	KaΦ (rpm)	J (kgm2)	τi=L/R (ms)	R (Ω)	L (mH)	Exc.
258	1670	685	400	322	2,18	1,3	24,8	0,058	1,44	Ind.

Pólos: S1,2 = -20,9 ±j 28,9

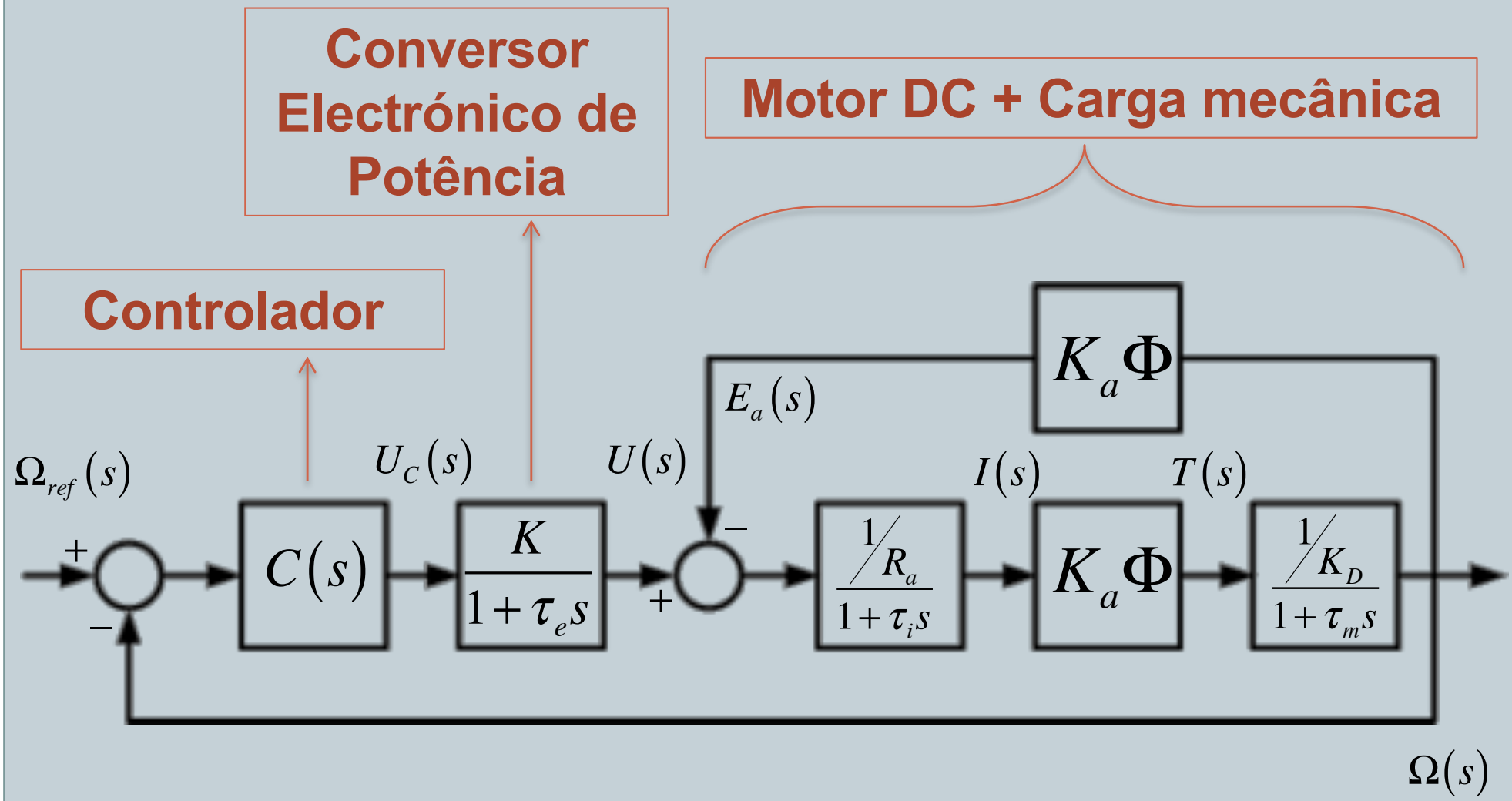
Pólo do conversor (rectificador trifásico em ponte):

Atraso estatístico: τ_e = 1,67 mseg

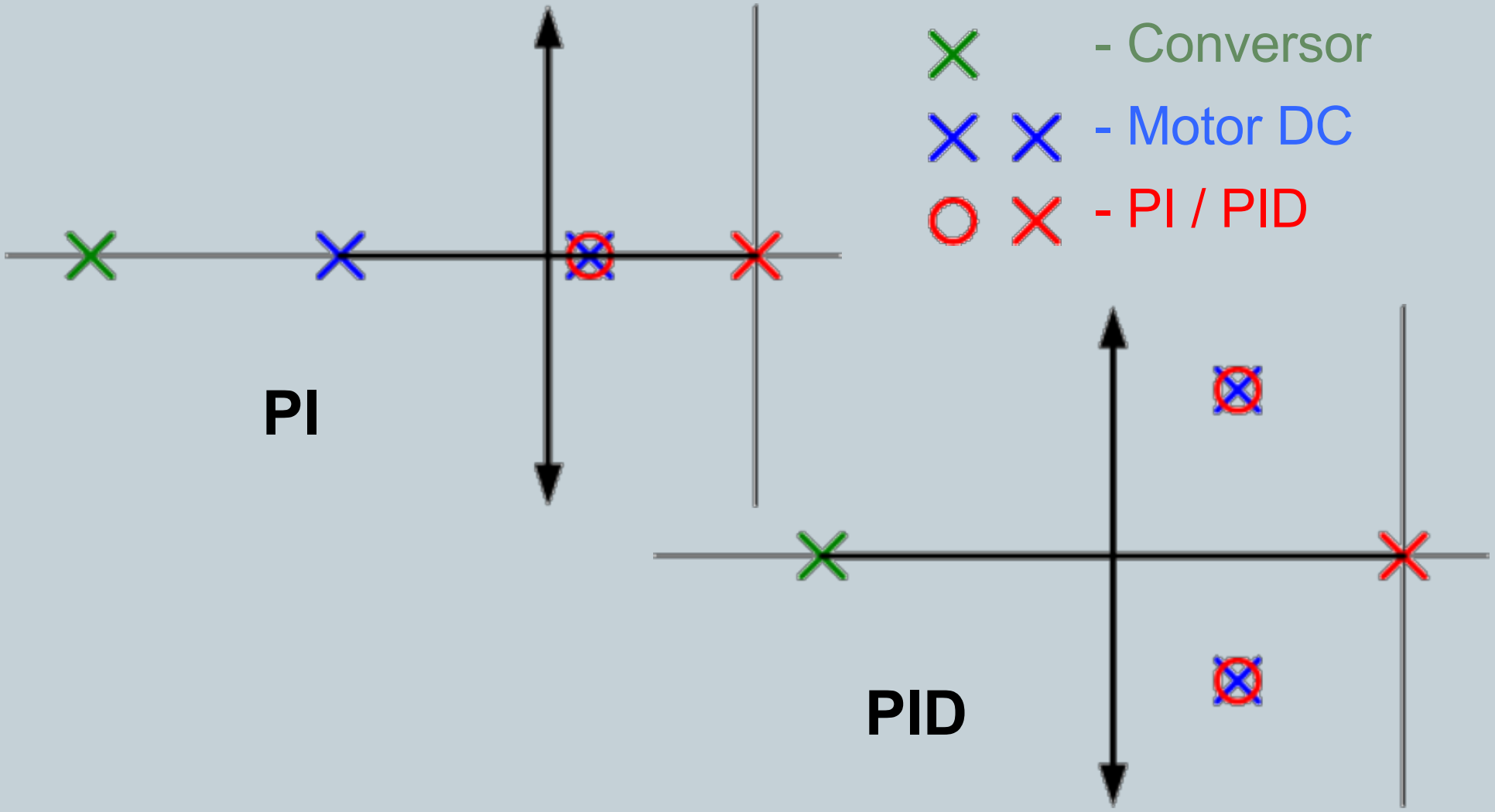
Pólo: S3 = -598

(Desprezável...)

Regulação de velocidade em cadeia fechada



Regulação de velocidade em cadeia fechada



Regulação de velocidade em cadeia fechada

$$\Omega(s) = \frac{K}{1+\tau_e s} \frac{\frac{k_a \Phi}{R_a k_D \tau_i \tau_m}}{s^2 + \frac{\tau_i + \tau_m}{\tau_i \tau_m} s + \frac{1}{\tau_i \tau_m} + \frac{(k_a \Phi)^2}{R_a k_D \tau_i \tau_m}} U_c(s)$$

$$\Omega(s) = \frac{K}{1+\tau_e s} \frac{\frac{k_a \Phi}{R_a k_D \tau_i \tau_m A}}{\frac{1}{A} s^2 + \frac{\tau_i + \tau_m}{\tau_i \tau_m A} s + 1} U_c(s)$$

$$A = \frac{1}{\tau_i \tau_m} + \frac{(k_a \Phi)^2}{R_a k_D \tau_i \tau_m}$$

Regulação de velocidade em cadeia fechada

PID

$$C(s) = K_p\left(1 + \frac{K_i}{s} + K_d s\right) = K_p K_i \frac{\frac{K_d}{K_i}s^2 + \frac{1}{K_i}s + 1}{s}$$

$$\frac{K_d}{K_i}s^2 + \frac{1}{K_i}s + 1 = \frac{1}{A}s^2 + \frac{\tau_i + \tau_m}{\tau_i \tau_m A}s + 1 \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{K_d}{K_i} = \frac{1}{A} \\ \frac{1}{K_i} = \frac{\tau_i + \tau_m}{\tau_i \tau_m A} \end{cases}$$

$$\begin{cases} K_d = \frac{\tau_i \tau_m}{\tau_i + \tau_m} \\ K_i = K_d A \end{cases}$$

Regulação de velocidade em cadeia fechada

- A função de transferência global do sistema em malha fechada é dada por

$$\frac{\Omega(s)}{\Omega_{ref}(s)} = \frac{\dfrac{KK_pK_ik_a\Phi}{R_ak_D\tau_i\tau_m\tau_eA}}{s^2 + \dfrac{1}{\tau_e}s + \dfrac{KK_pK_ik_a\Phi}{R_ak_D\tau_i\tau_m\tau_eA}}$$

Regulação de velocidade em cadeia fechada

- A função de transferência de um sistema de 2ª ordem é dada por

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}$$

ξ – Factor de amortecimento

ω_o – Frequência própria

Regulação de velocidade em cadeia fechada

- Fazendo...

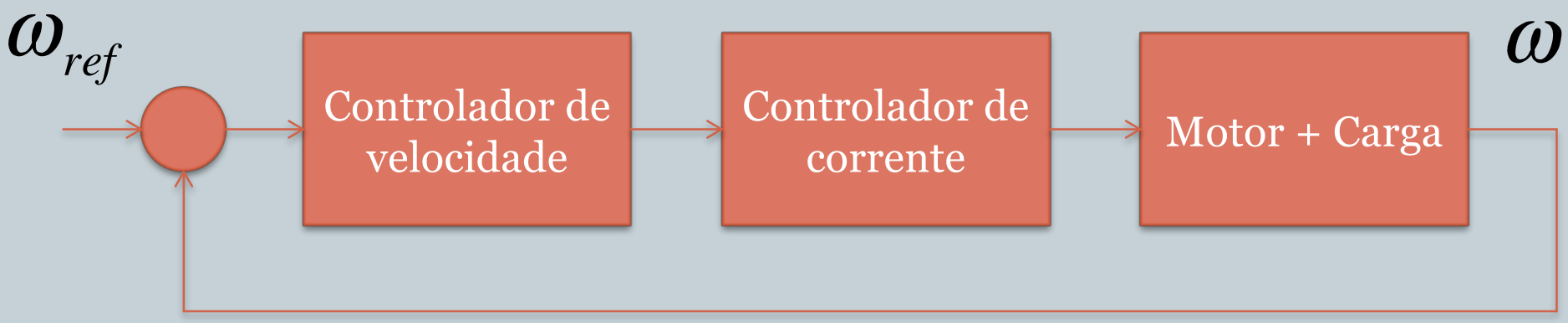
$$\frac{1}{\tau_e} = 2\xi\omega_0$$

$$\omega_0^2 = \frac{KK_pK_ik_a\Phi}{R_ak_D\tau_i\tau_m\tau_eA}$$

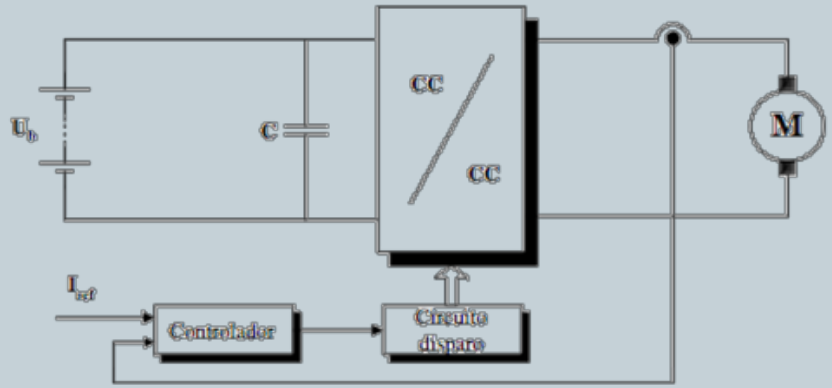
- Obtem-se para $\xi = 1 / \sqrt{2}$

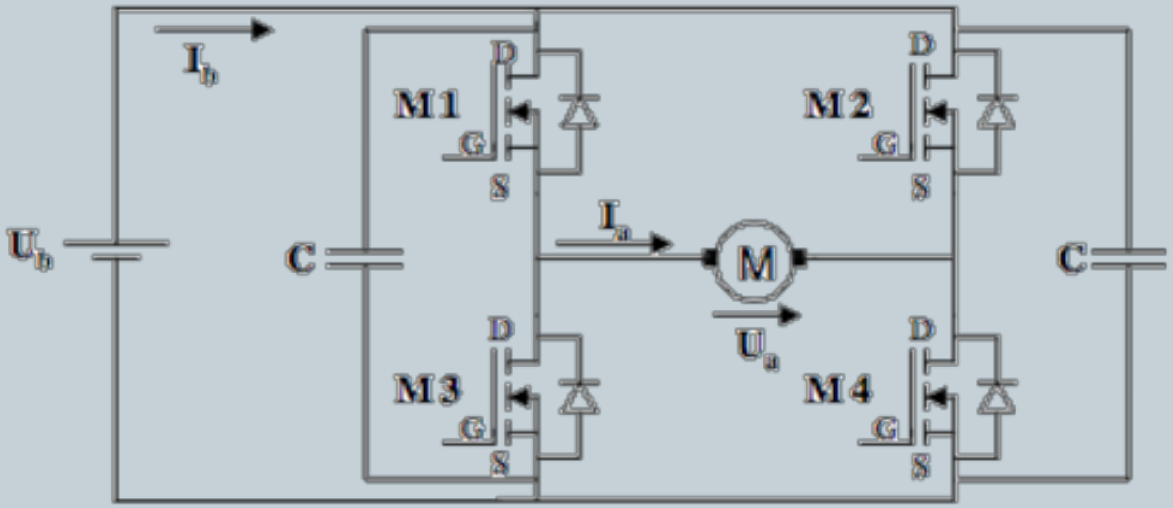
$$K_p = \frac{R_ak_D\tau_i\tau_mA}{2KK_ik_a\Phi\tau_e}$$

Regulação de velocidade em cadeia fechada

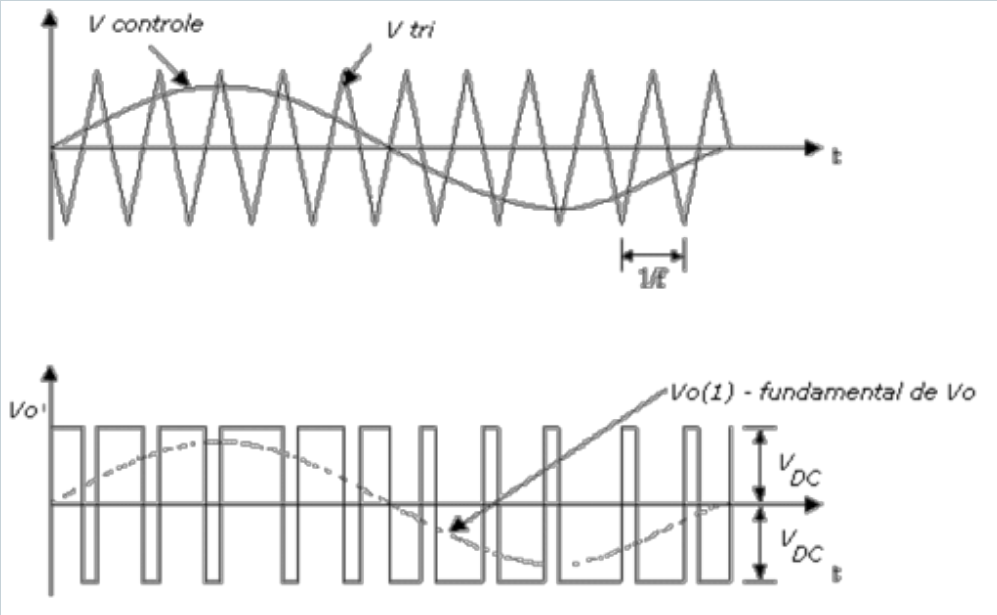


Conversor DC/DC de 4 quadrantes

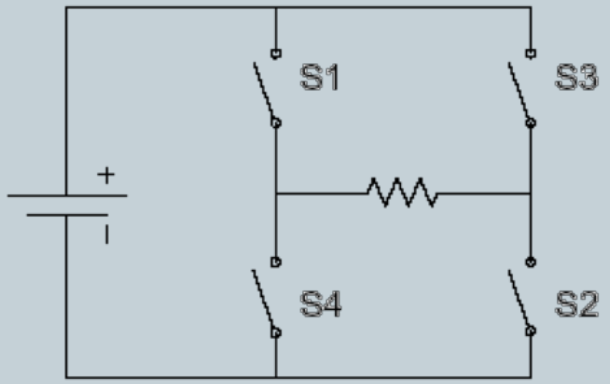




Conversor DC/DC de 4 quadrantes controlo em tensão

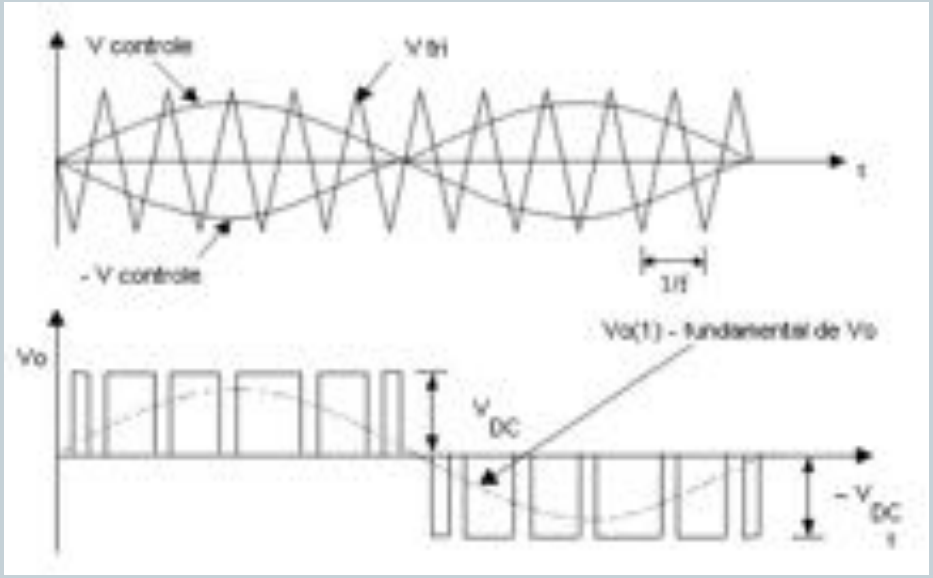


PWM com dois níveis de tensão



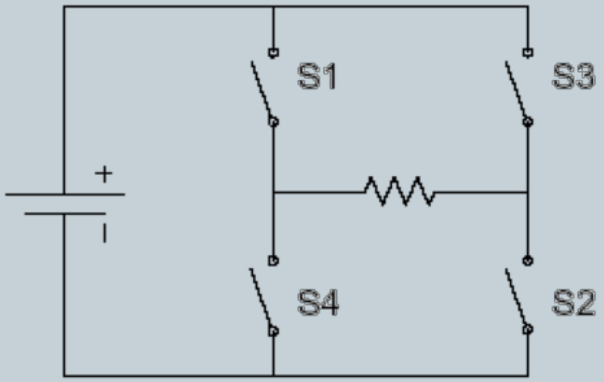
CONDIÇÃO DOS SINAIS	CONDIÇÃO DOS INTERRUPTORES			
	S1	S2	S3	S4
$v_{controle} > v_{tri}$	Ligado	Ligado		
$v_{controle} < v_{tri}$			Ligado	Ligado

Conversor DC/DC de 4 quadrantes controlo em tensão

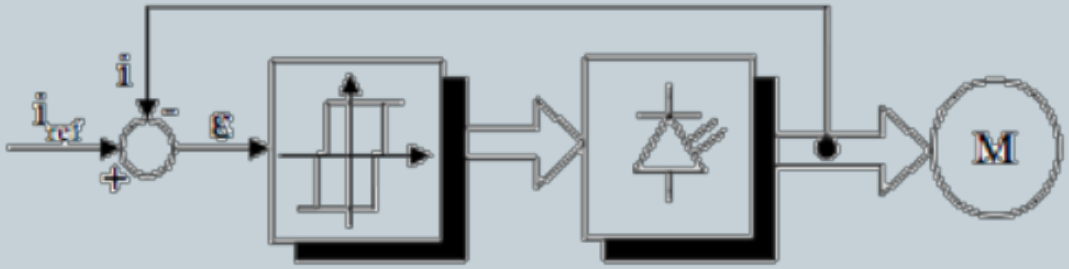


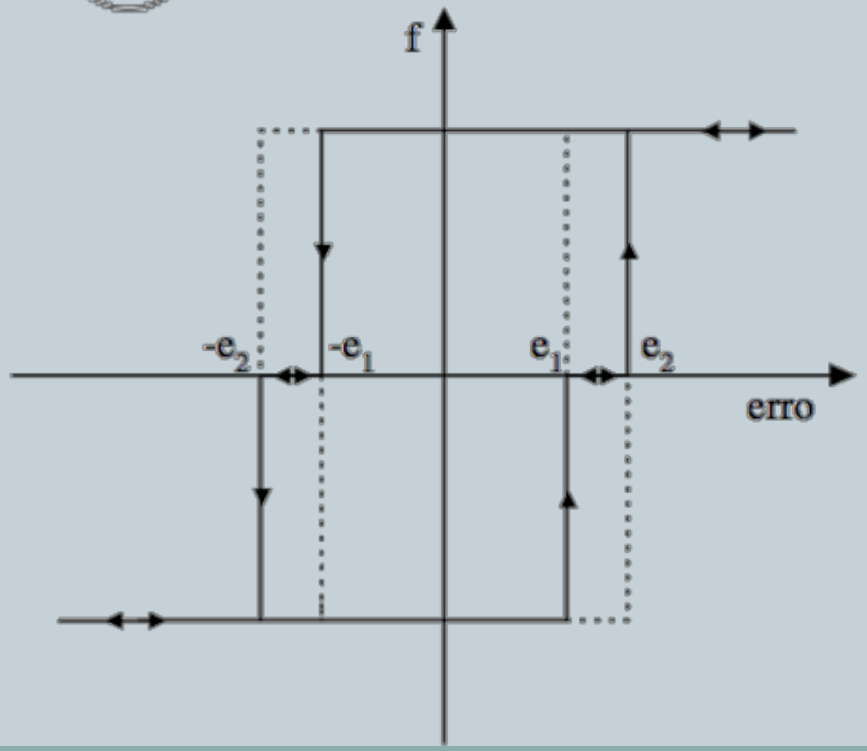
PWM com três níveis de tensão

CONDIÇÃO DOS SINAIS	CONDIÇÃO DOS INTERRUPTORES			
	S1	S2	S3	S4
$v_{controle} \geq v_{tri}$	Ligado			
$v_{controle} < v_{tri}$		Ligado		
$-v_{controle} \geq v_{tri}$			Ligado	
$-v_{controle} < v_{tri}$				Ligado

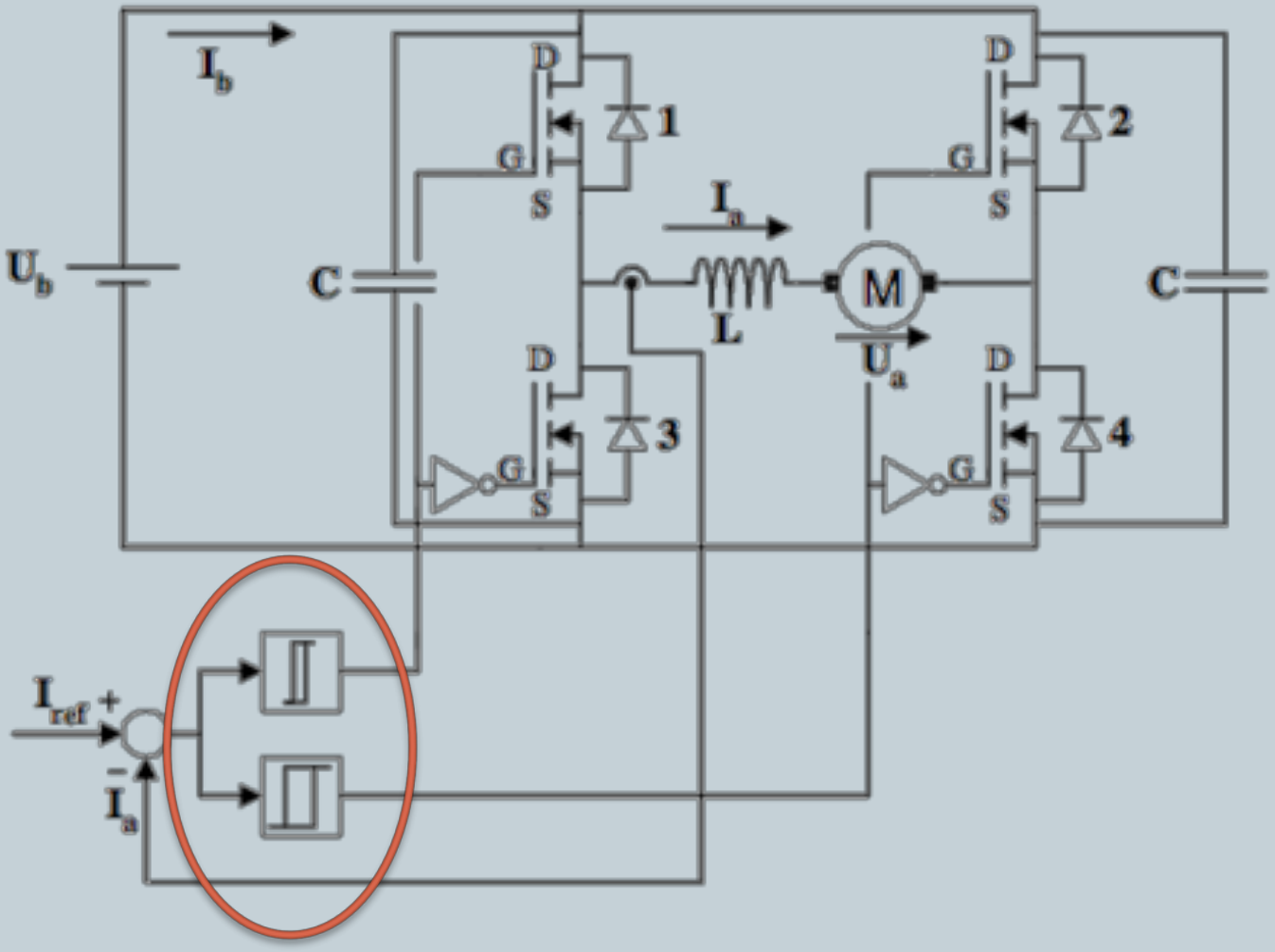


Conversor DC/DC de 4 quadrantes controlo em corrente



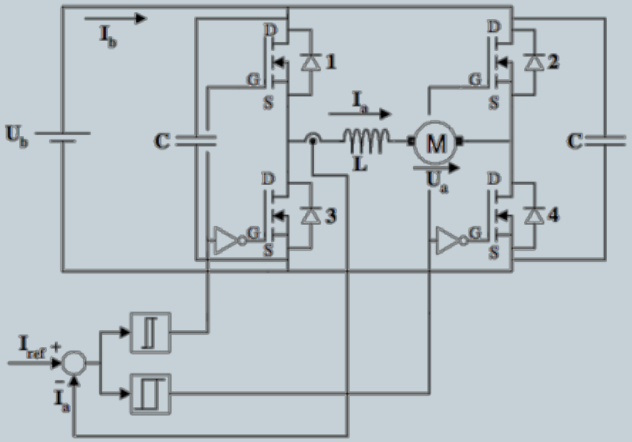


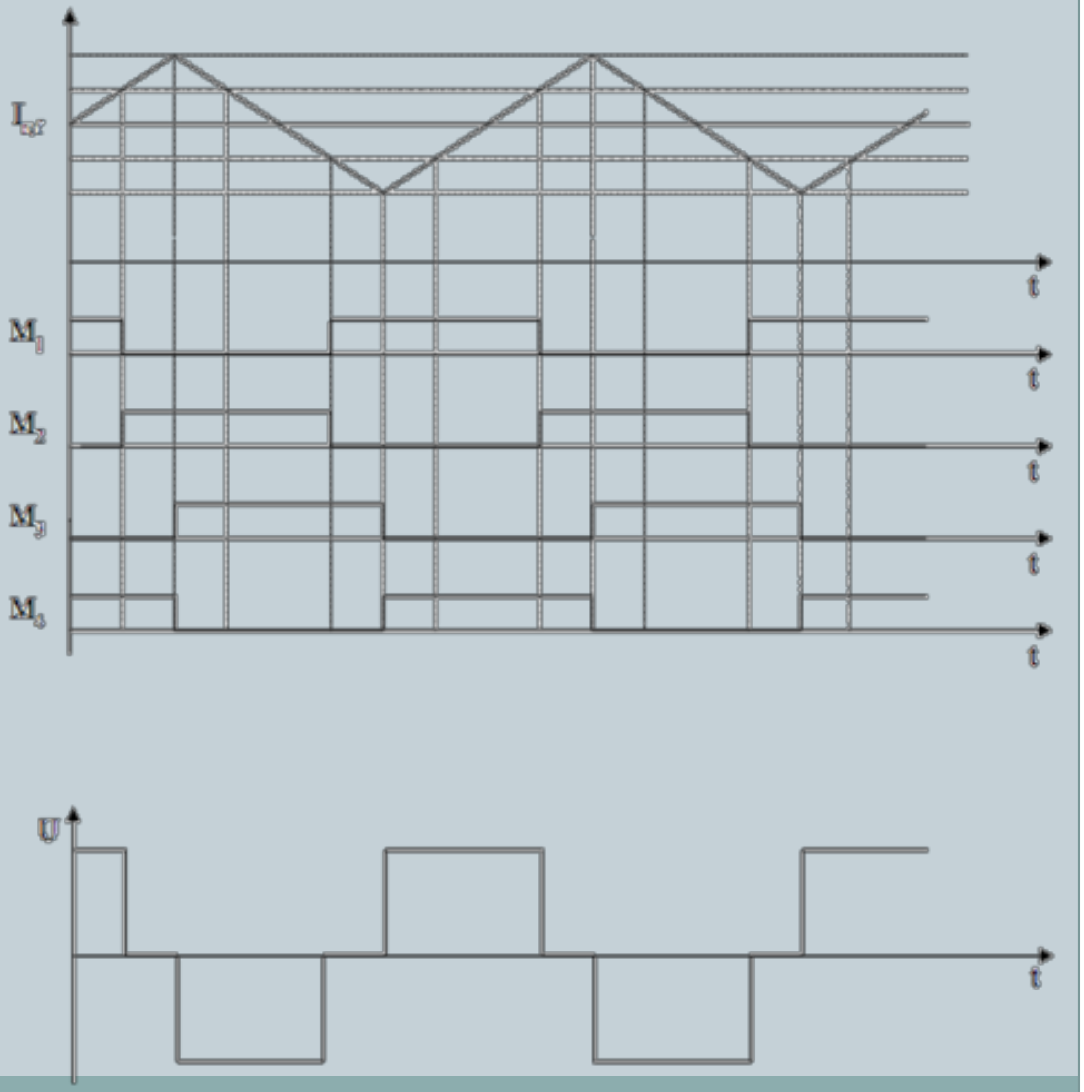
Conversor DC/DC de 4 quadrantes controlo em corrente



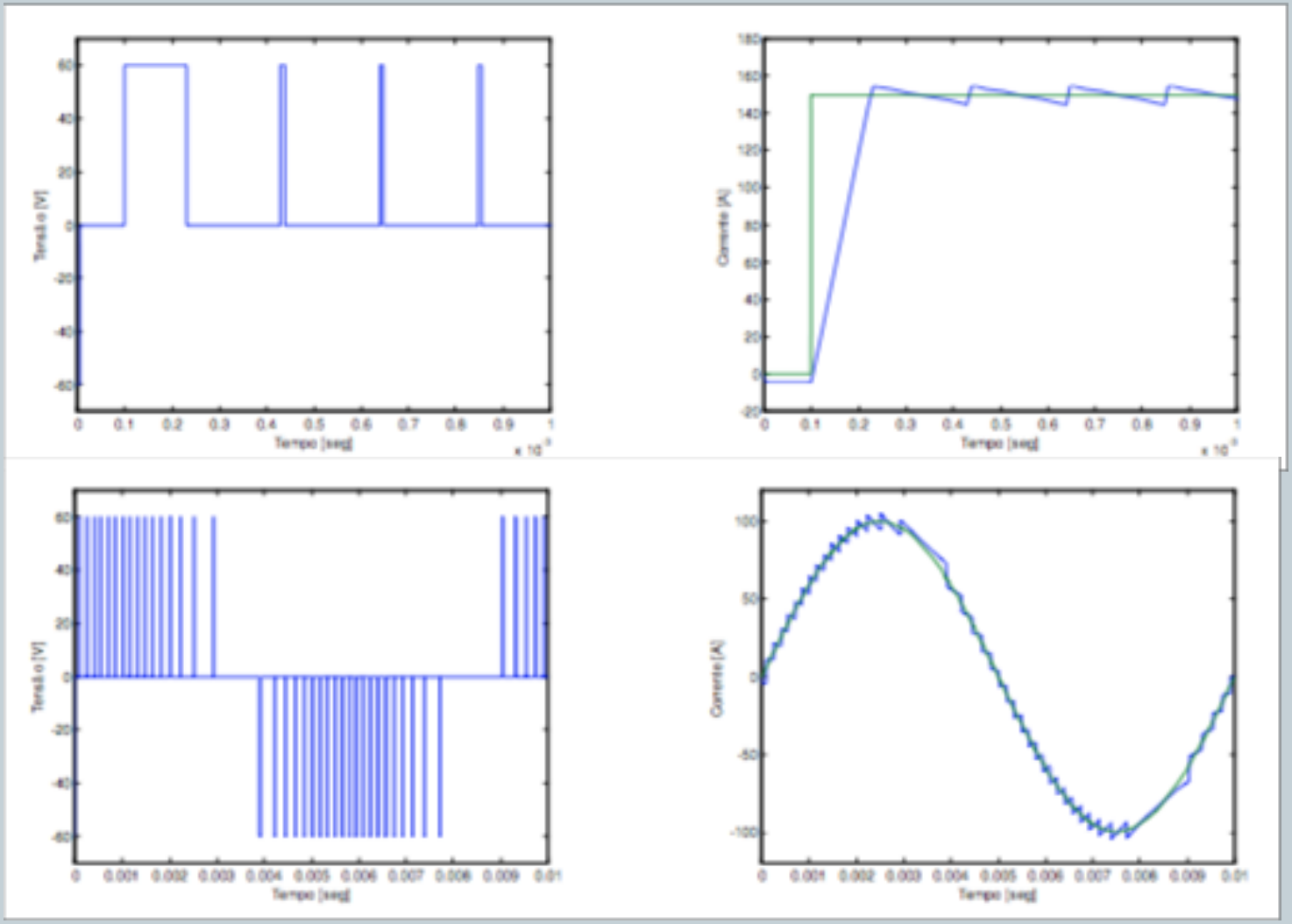
Conversor DC/DC de 4 quadrantes controlo em corrente

	Braço I		Braço II	
Erro	*MOSFET 1*	*MOSFET 3*	*MOSFET 2*	*MOSFET 4*
$e \leq e_1$	ON	OFF	OFF	ON
$e_1 \leq e \leq e_2$	OFF	ON	OFF	ON
$e \leq e_2$	OFF	ON	ON	OFF
$-e2 \leq e \leq -e_1$	ON	OFF	ON	OFF
$e \leq -e_2$	ON	OFF	OFF	ON
$e \leq e_1$	ON	OFF	OFF	ON





Conversor DC/DC de 4 quadrantes controlo em corrente



Conversor DC/DC de 4 quadrantes controlo em corrente

