



Disciplina: Controle e Servomecanismos I



Atividade: **Modelagem de Motores de Indução**

Professor: José Paulo Vilela Soares da Cunha

Rio de Janeiro, 26 de agosto de 2020.



Referência

- Bose, B. K. (2001). Modern Power Electronics and AC Drives, Upper Saddle River: Prentice Hall PTR. Capítulo 2.

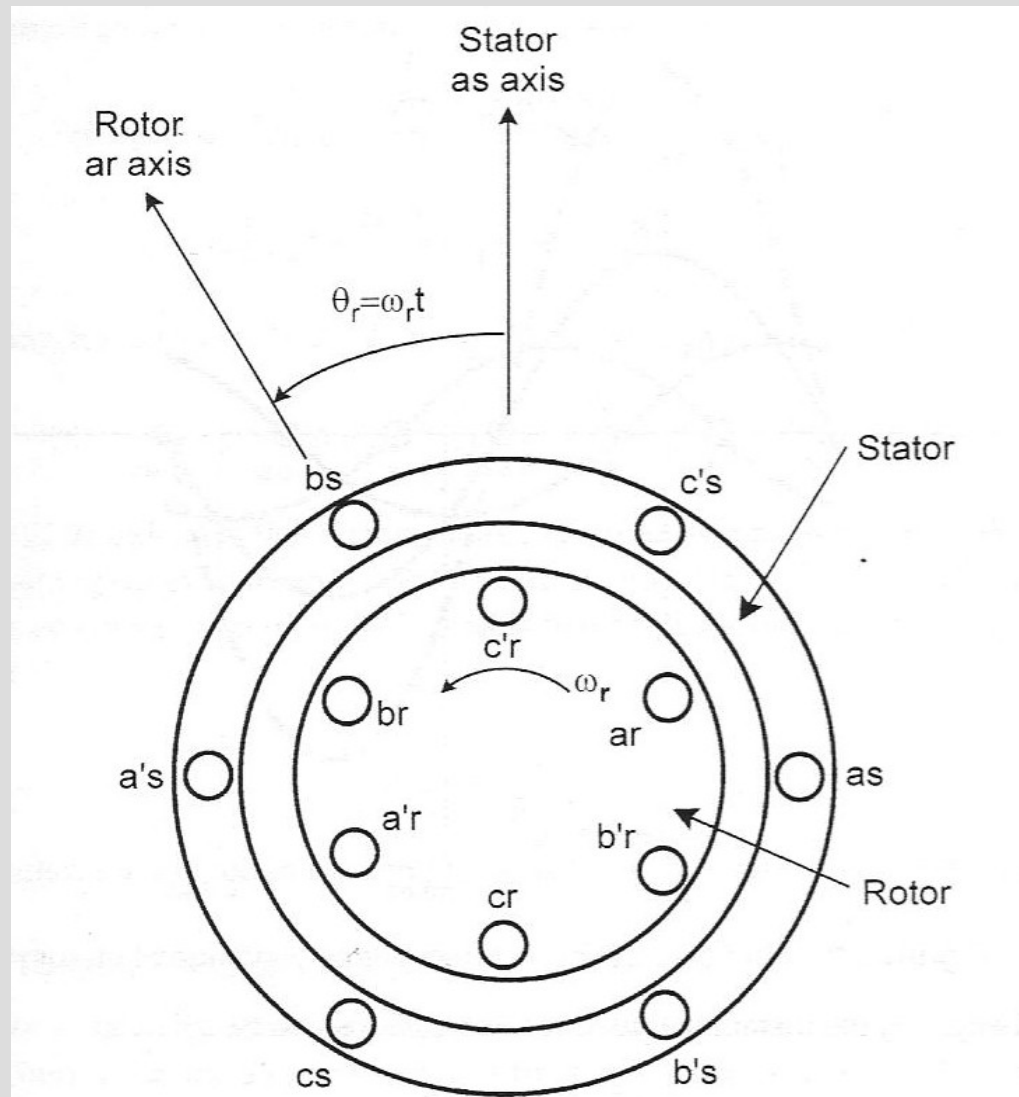
Motores CC

- Vantagens:
 - Fácil acionamento e controle
 - Dinâmica excelente
 - Alto torque
- Desvantagens:
 - Construção mais complexa e de maior custo
 - Maior momento de inércia
 - Demandam manutenção de comutadores e escovas
 - Escovas causam interferências eletromagnéticas (*electromagnetic interference* – EMI)
 - Inadequados em atmosferas explosivas ou sujas

Motores de Indução

- Duas categorias:
 - Rotor bobinado
 - Rotor gaiola
- Vantagens dos motores tipo gaiola:
 - Construção simples e de baixo custo
 - Sem escovas
 - Demandam menos manutenção
 - Rotor com menor inércia
 - Mais adequados a atmosferas explosivas ou suja
- Desvantagens:
 - Modelo dinâmico mais complexo
 - Controle e acionamento mais difícil

Motor de Indução Trifásico



Motor de Indução – Conceitos Básicos

- Velocidade síncrona (rpm):

$$N_e = \frac{120 f_e}{P}$$

- onde:

- f_e é a frequência do estator (Hz)
- P é o número de polos

- Exemplo:

$$P = 2 \text{ polos}; f_e = 60 \text{ Hz} \rightarrow N_e = 3600 \text{ rpm}$$

Motor de Indução – Conceitos Básicos

- Velocidade mecânica do rotor (rad/s):

$$\omega_m = \frac{2}{P} \omega_r$$

- onde:
 - P é o número de polos
 - ω_r é a frequência elétrica do rotor (rad/s)

- Exemplo:

$$P = 2 \text{ polos} \rightarrow \omega_m = \omega_r$$

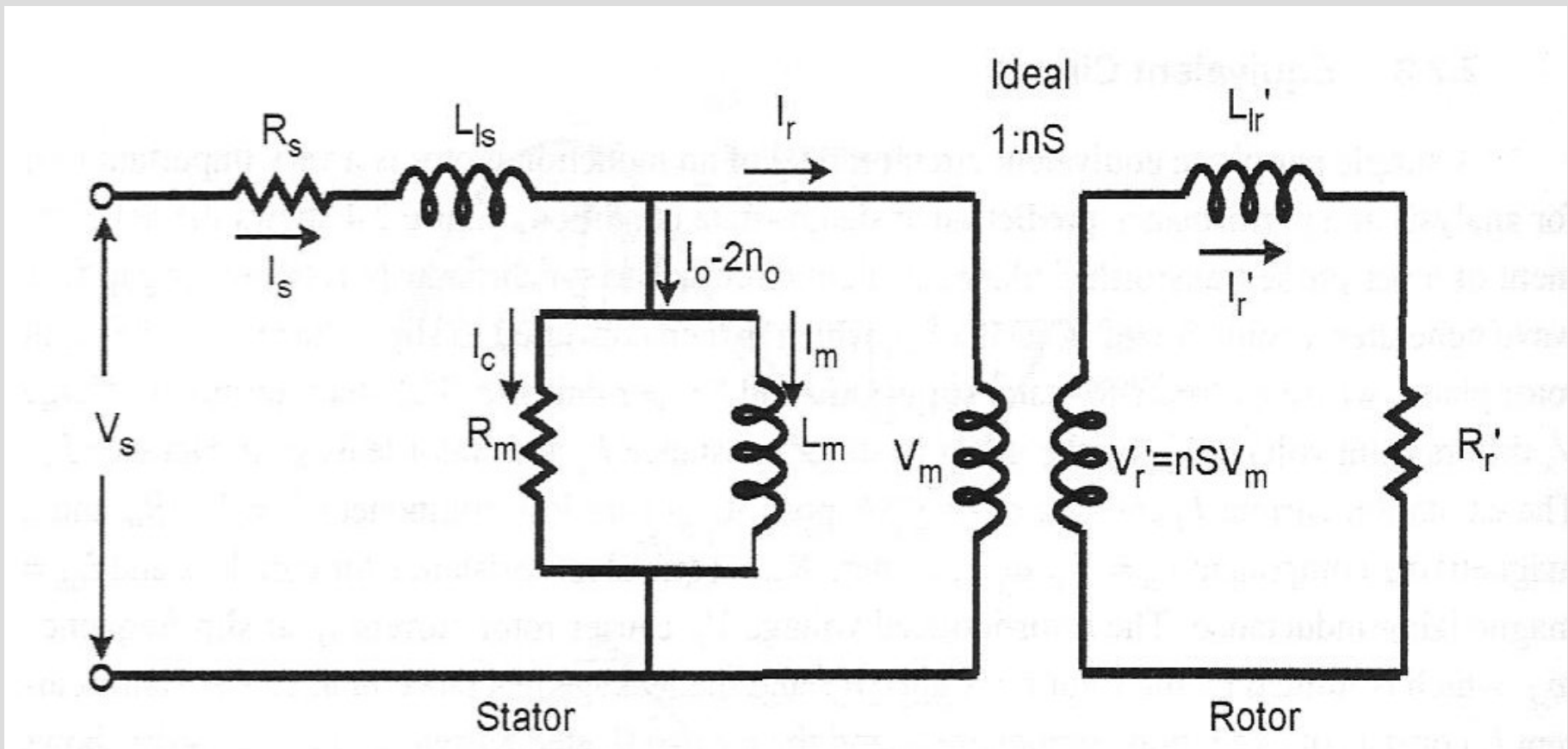
Motor de Indução – Conceitos Básicos

- Escorregamento (pu):

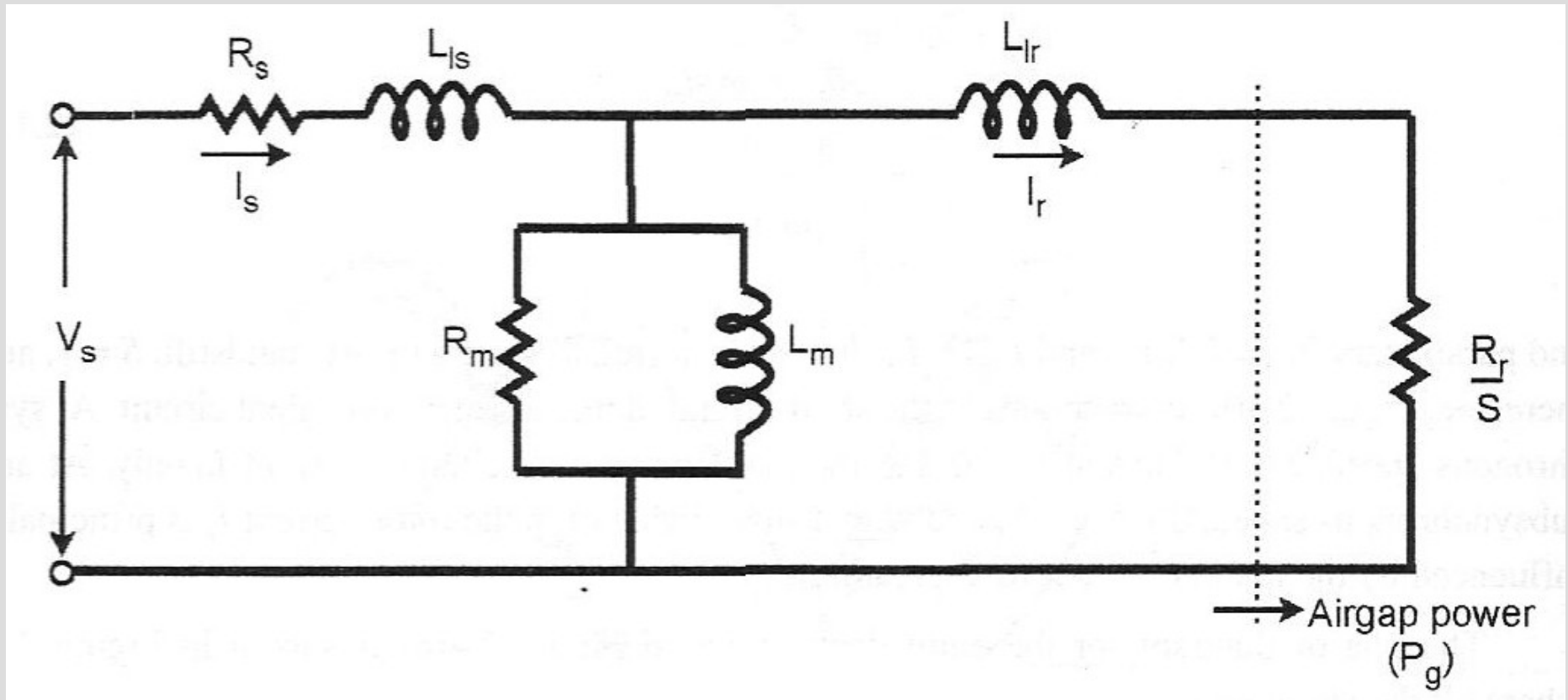
$$S = \frac{N_e - N_r}{N_e} = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} = \frac{\omega_{sl}}{\omega_e}$$

- onde:
 - N_r é a velocidade do rotor (rpm)
 - ω_e é a frequência do estator (rad/s)
 - ω_r é a frequência elétrica do rotor (rad/s)
 - ω_{sl} é a frequência de escorregamento (rad/s)

Circuito Equivalente 1 ϕ com Transformador de Acoplamento



Circuito Equivalente 1 ϕ em Relação ao Estator



Torque Obtido do Circuito Equivalente no Estator

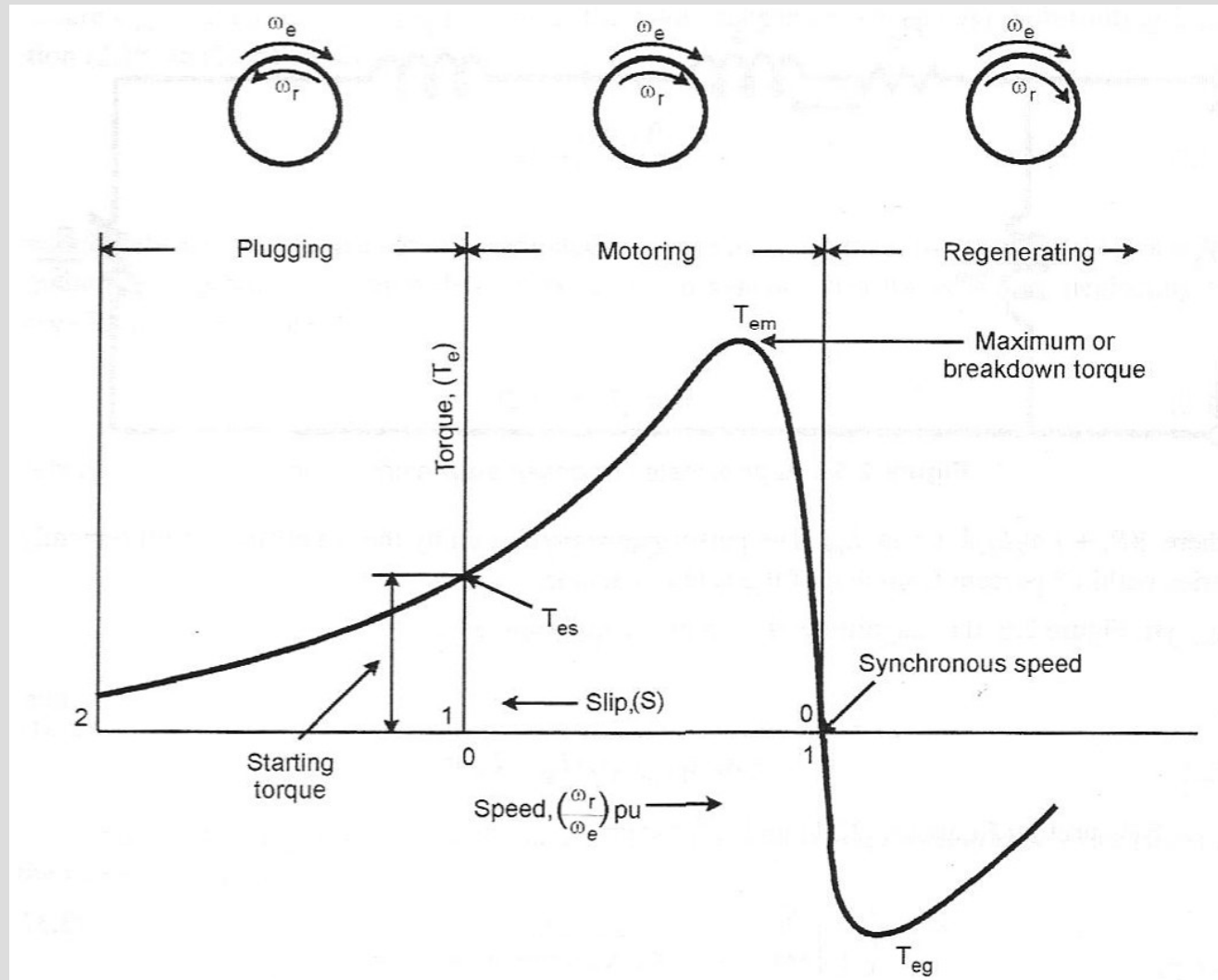
- Torque eletromagnético (Nm):

$$T_e = \frac{P_o}{\omega_m} = \frac{3}{\omega_m} I_r^2 R_r \frac{1-S}{S} = 3 \left(\frac{P}{2} \right) I_r^2 \frac{R_r}{S \omega_e}$$

- onde:

- P_o é a potência de saída
- ω_m é a velocidade angular do rotor (rad/s)

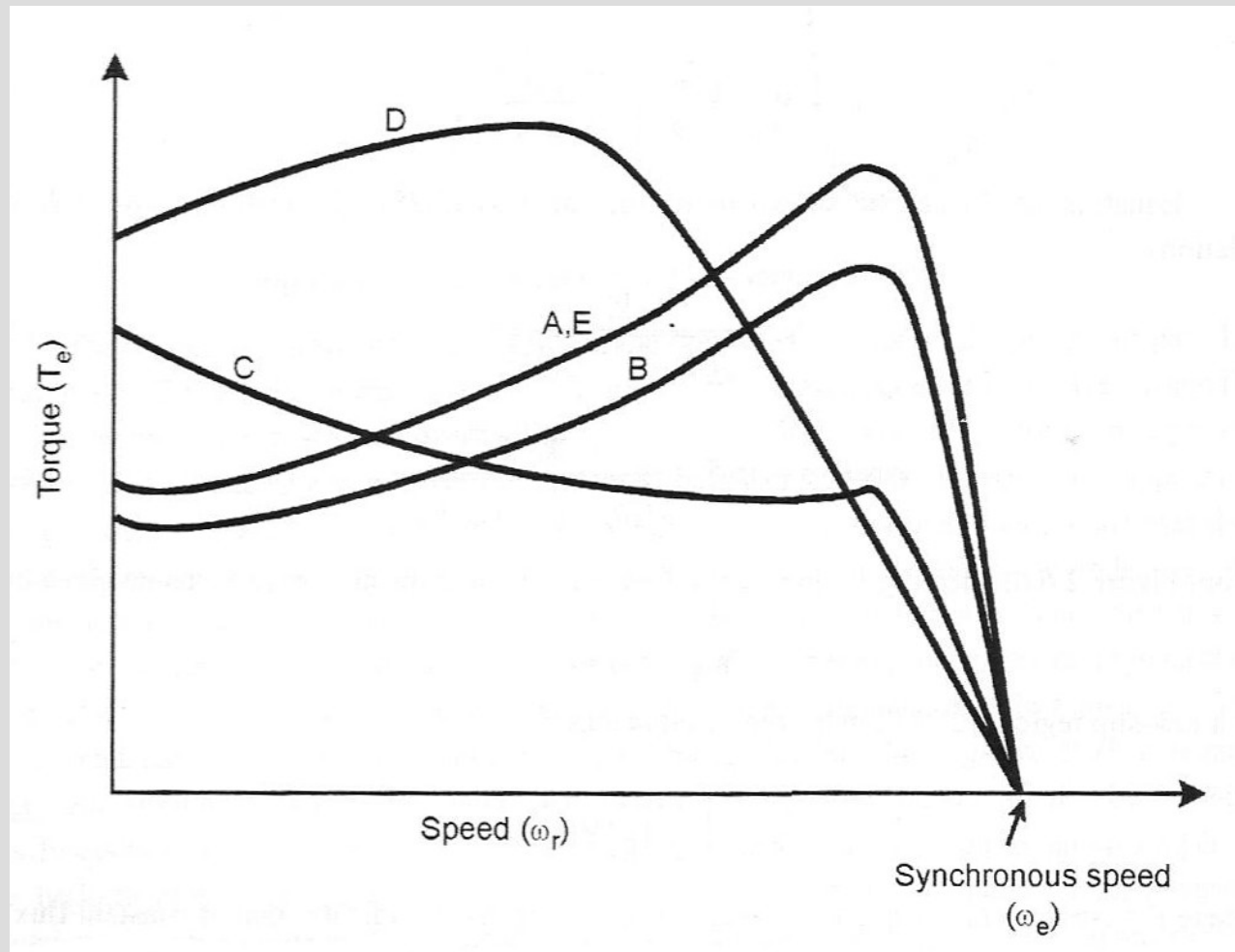
Curva de Torque x Velocidade



Classificação NEMA para Motores de Indução

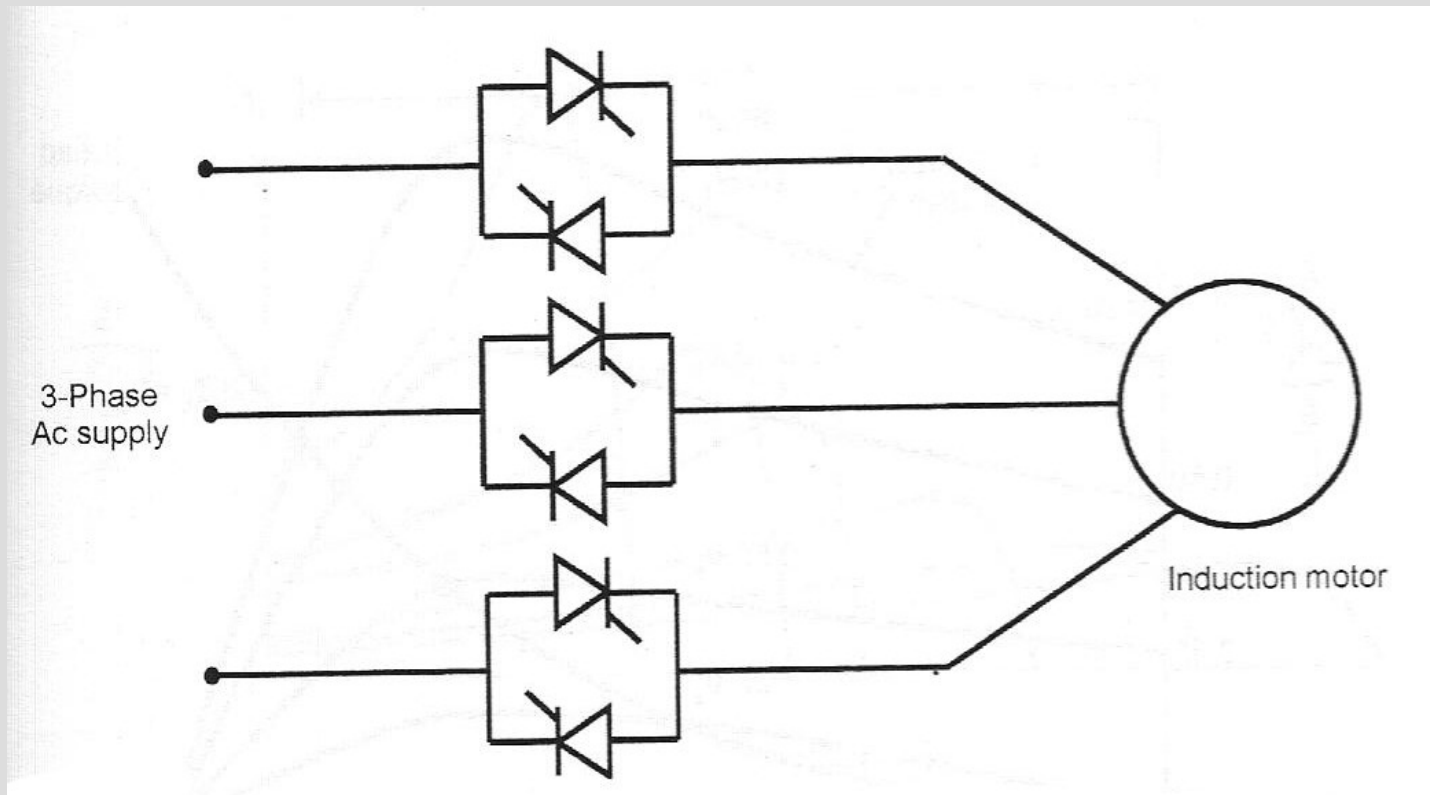
- NEMA – *National Electrical Manufacturers Association*
- Classes de motores de indução:
 - A – baixo torque de partida, alta corrente de partida e baixo escorregamento em operação
 - B – semelhante à classe A com mais escorregamento, adequada à velocidade constante
 - C e D – alto torque de partida e menor corrente de partida devido à maior resistência do rotor
 - E – alta eficiência

Classificação NEMA para Motores de Indução



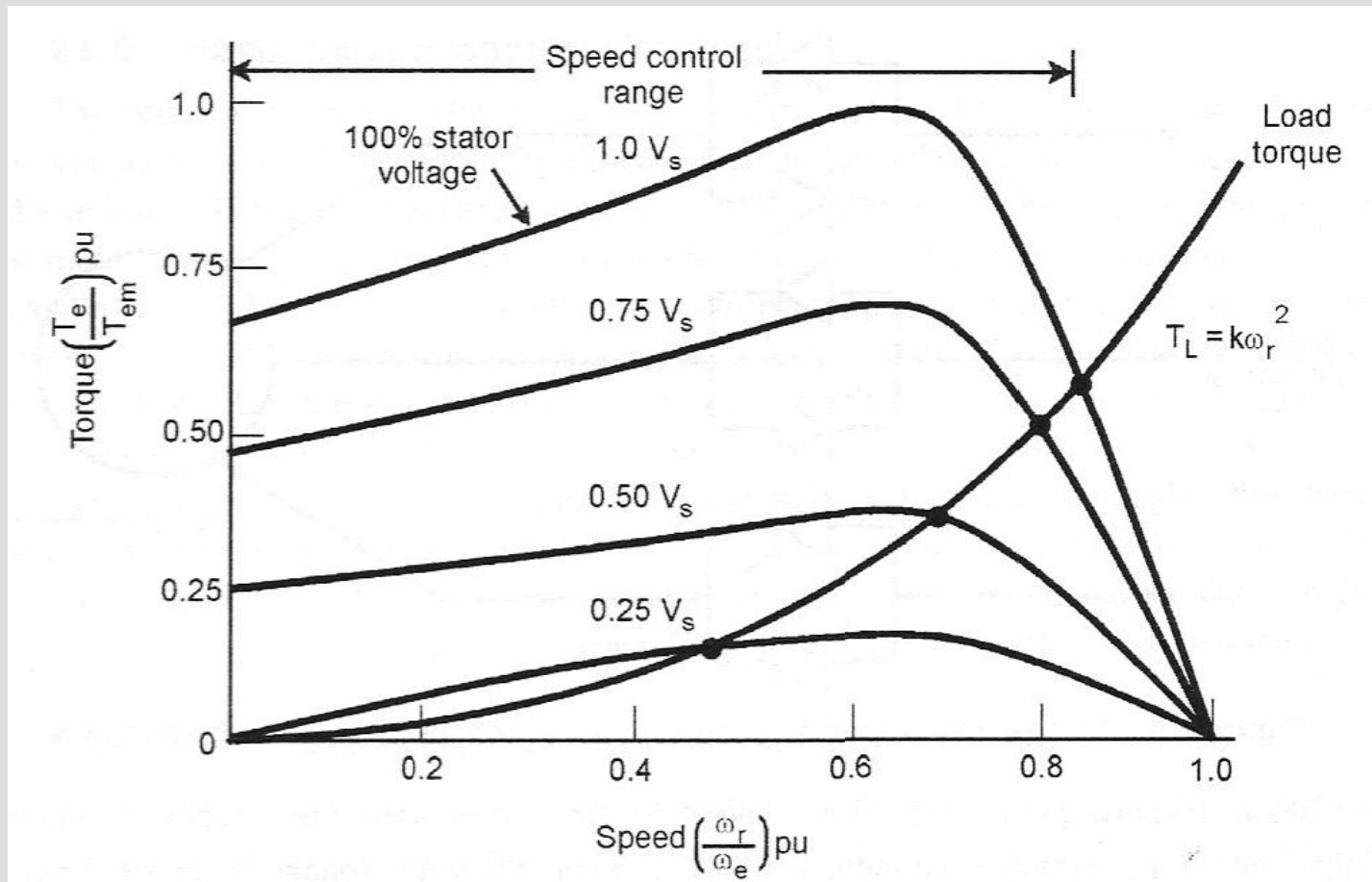
Operação com Frequência Constante e Tensão Variável

- Exemplo: controle de ângulo de disparo de tiristores (*soft starter*)



Operação com Frequência Constante e Tensão Variável

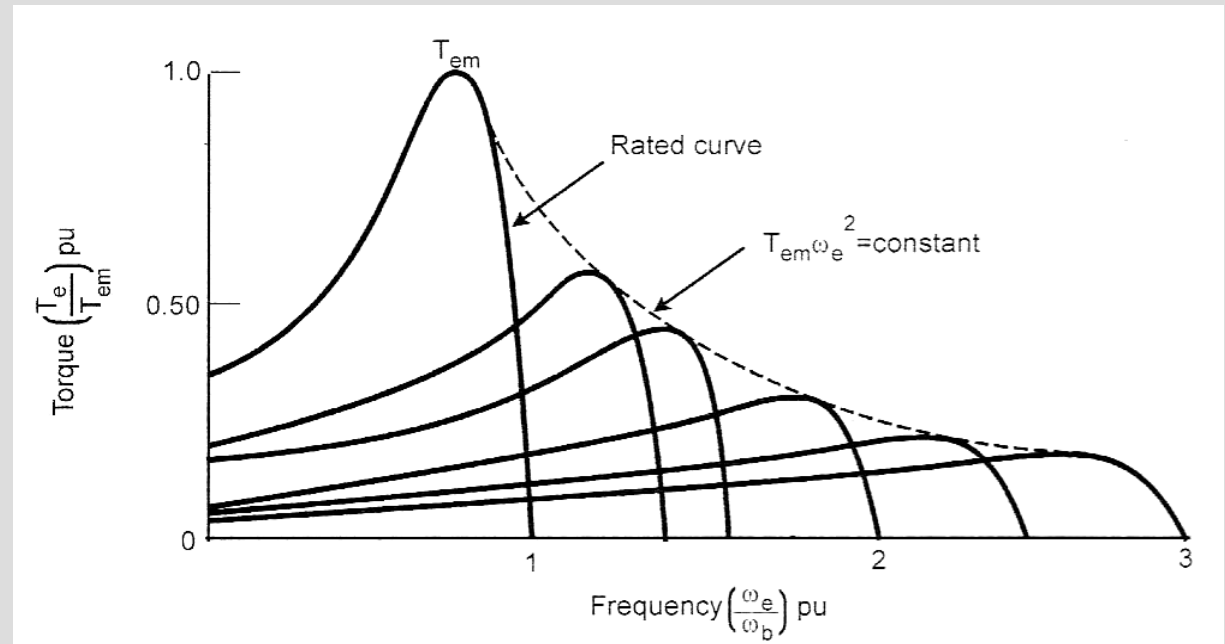
- Exemplo: carga bomba ou ventilador, $T_L = k \omega_r^2$



Operação com Frequência Variável e Tensão Constante

- Operação semelhante a motor CC campo série

$$T_{em} = \frac{cte}{\omega_e^2}$$

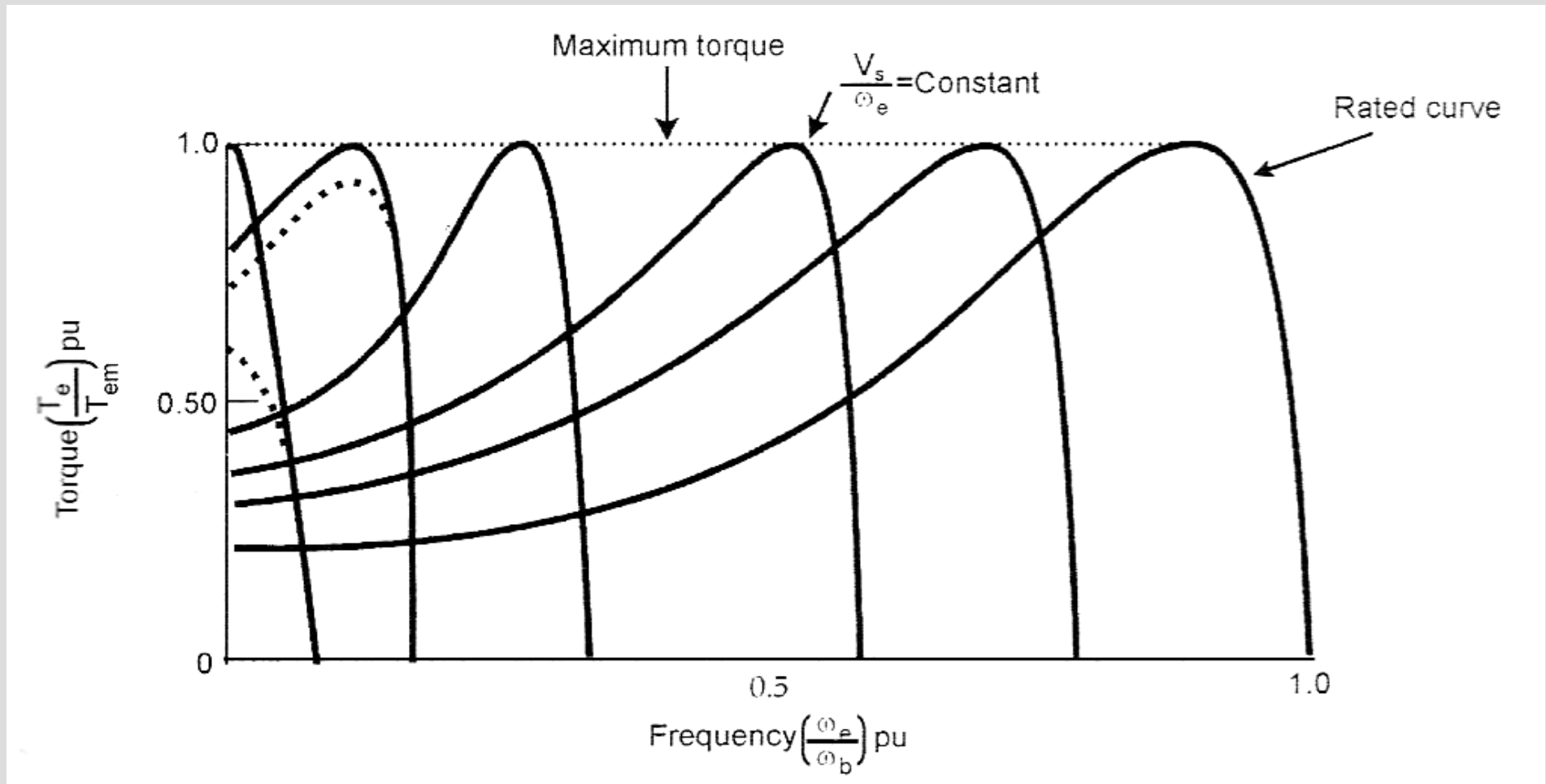


- Corrente grande em baixa frequência causa saturação do ferro e distorção

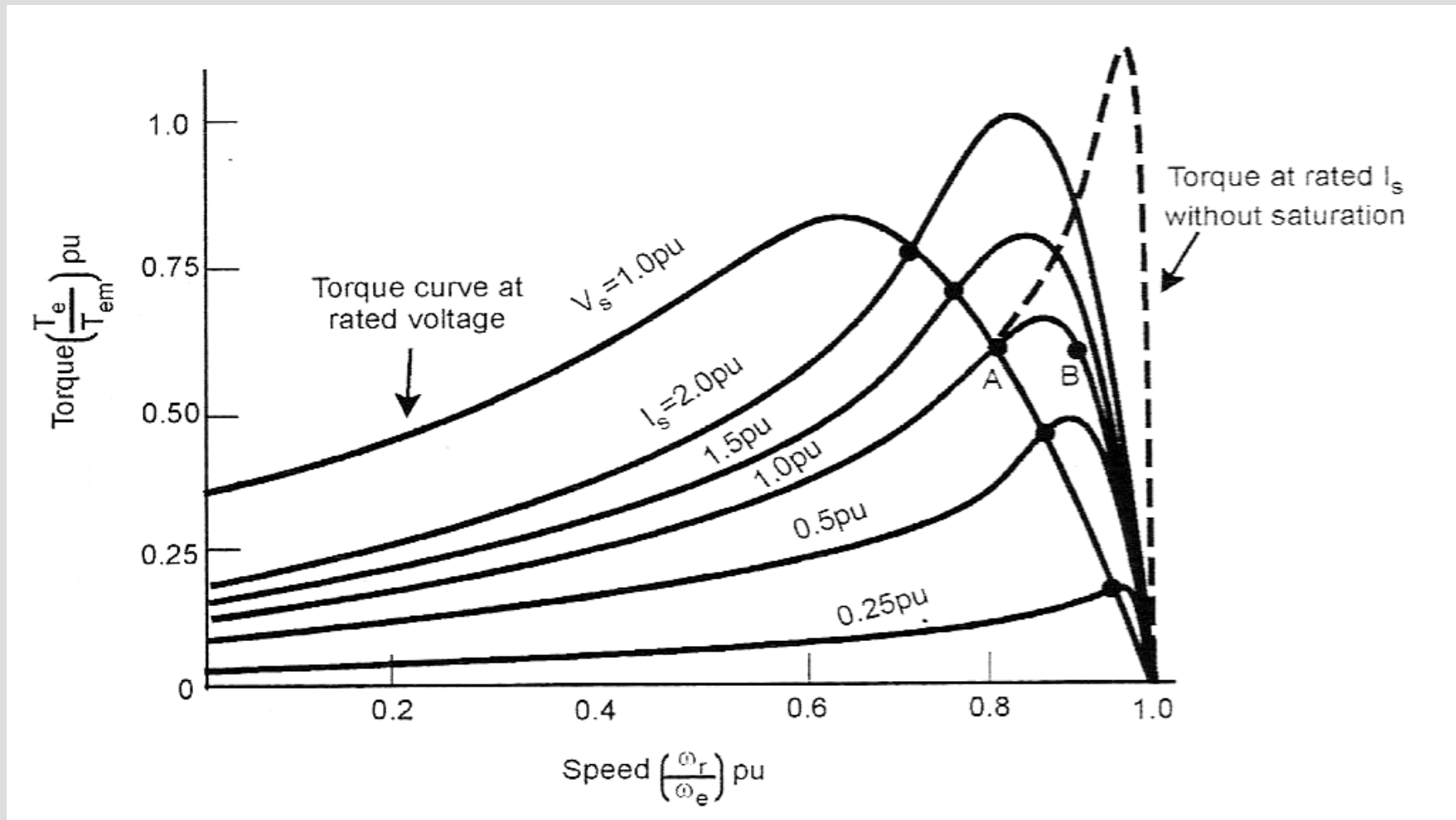
Operação com Relação V/Hz Constante

- Acionamento mais popular
- Evita grandes correntes
- Mantém fluxo magnético constante
- Grande sensibilidade do torque à corrente possibilita transitório rápido se for controlada a corrente do estator
- Baixo escorregamento em motores com pequena resistência de rotor geram baixo escorregamento e alta eficiência
- Torque de partida grande sem surto de corrente

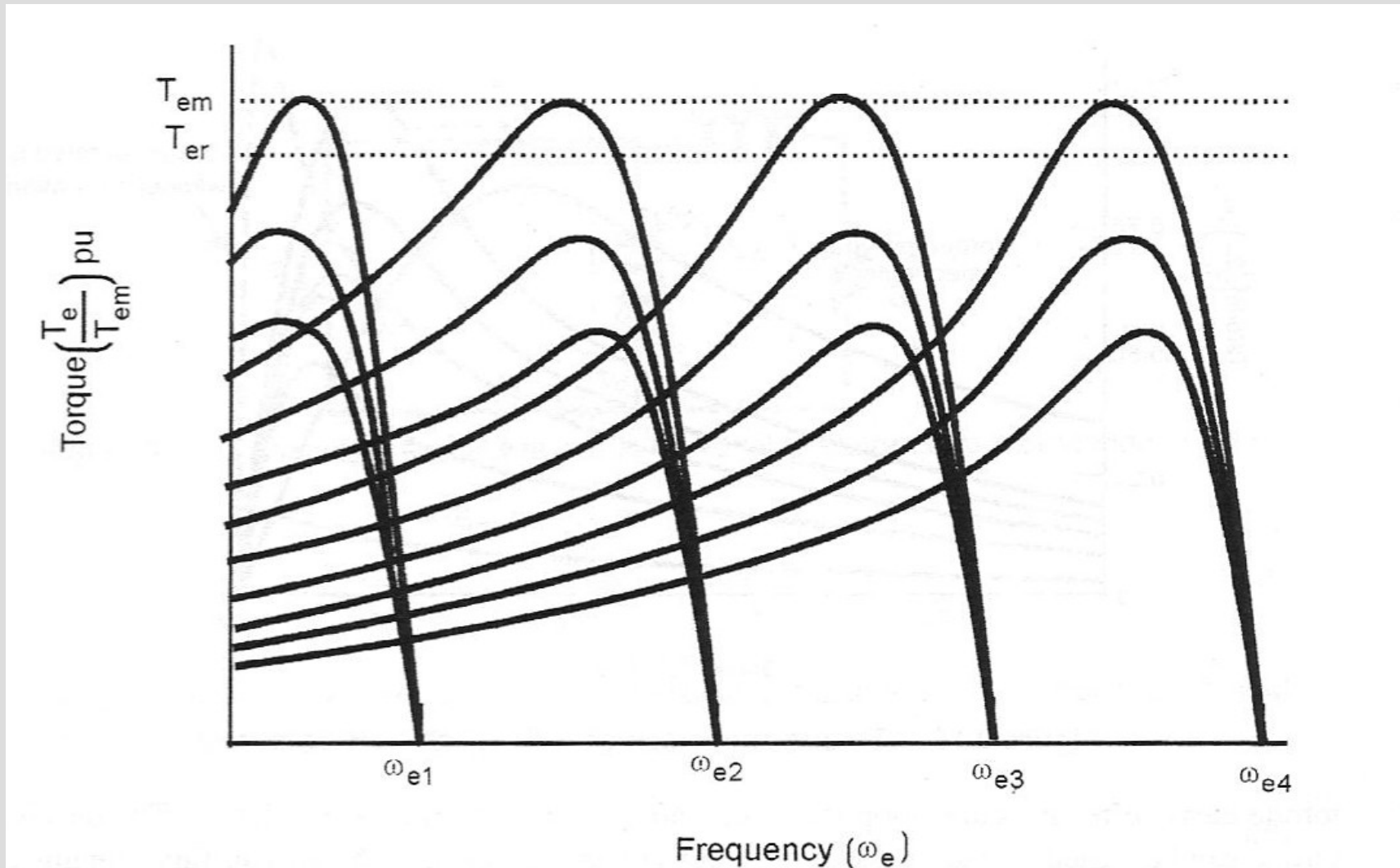
Operação com Relação V/Hz Constante



Operação com Frequência Constante e Corrente Variável



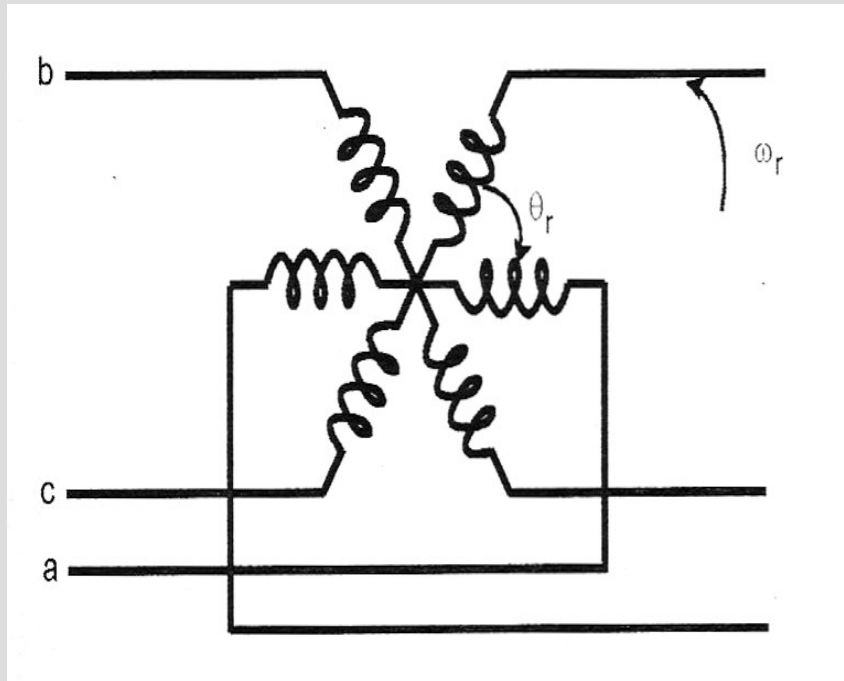
Operação com Frequência Variável e Corrente Variável



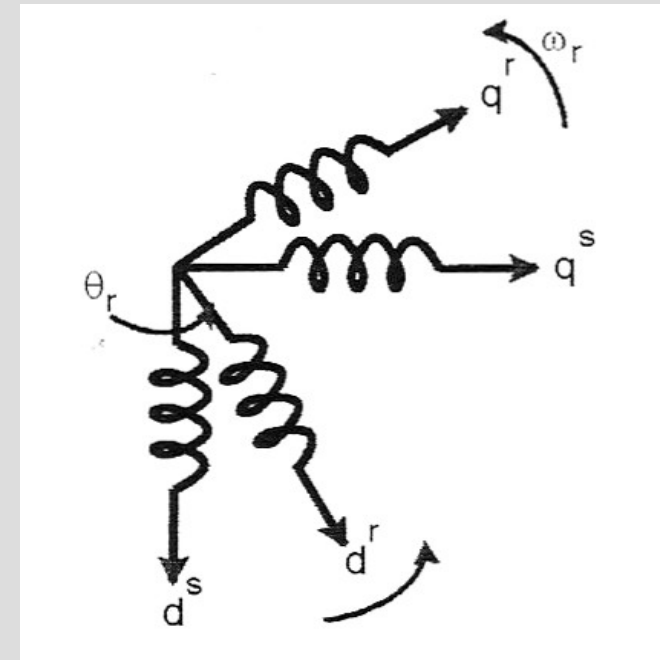
Modelo Dinâmico $d-q$

- Usado no acionamento com campo orientado ou controle vetorial
- Baseado na transformada de Park
- Indispensável para acionamento de alto desempenho dinâmico

Modelo Dinâmico $d-q$

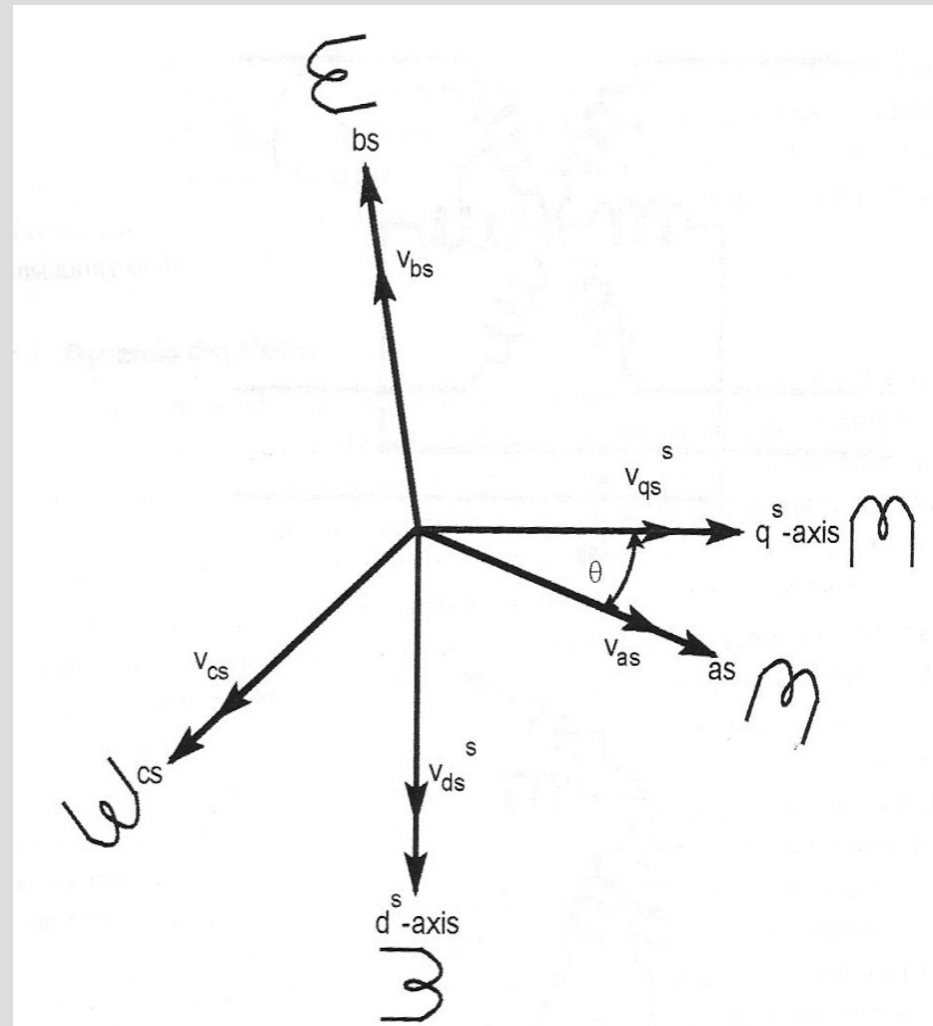


Sistema trifásico

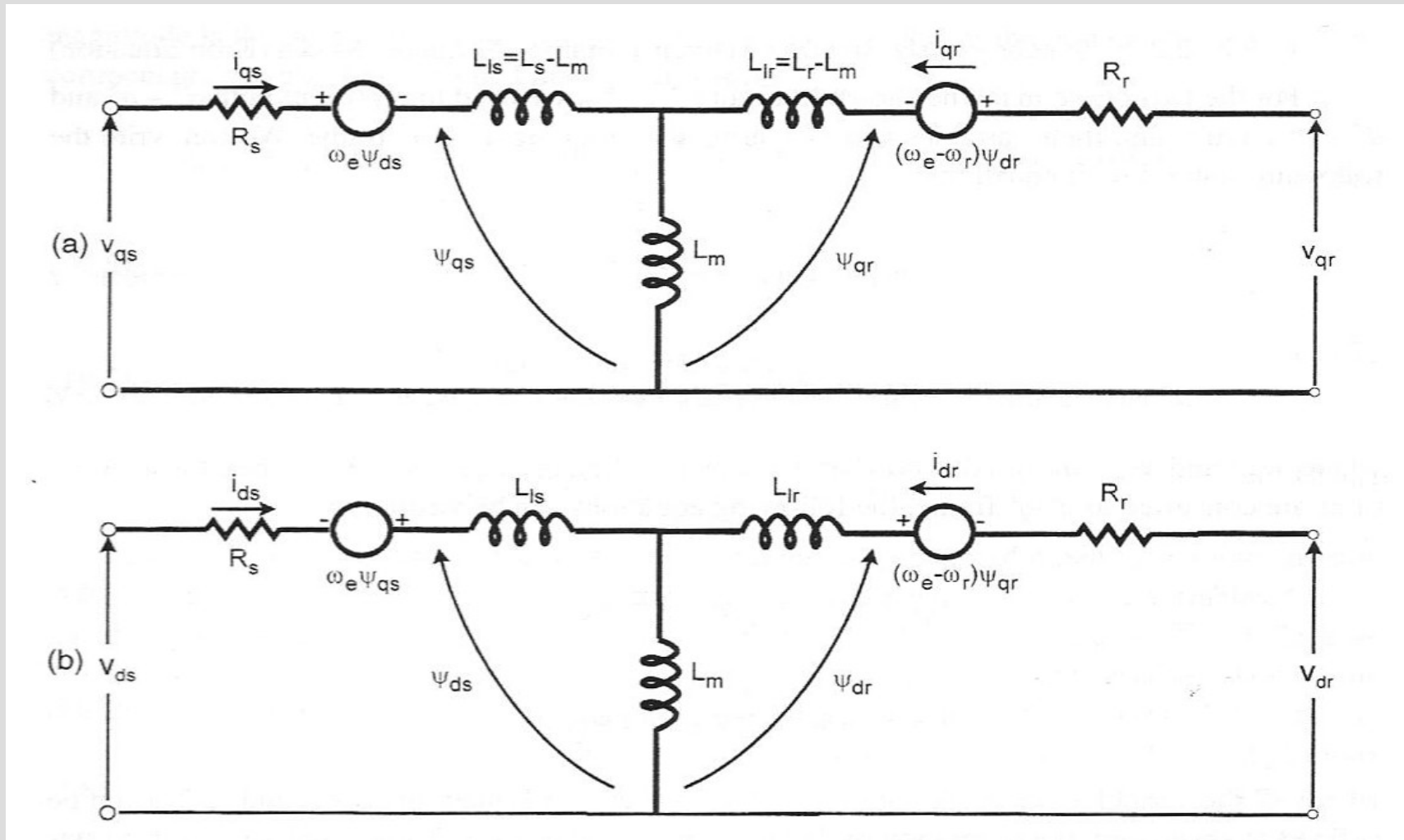


Sistema bifásico equivalente

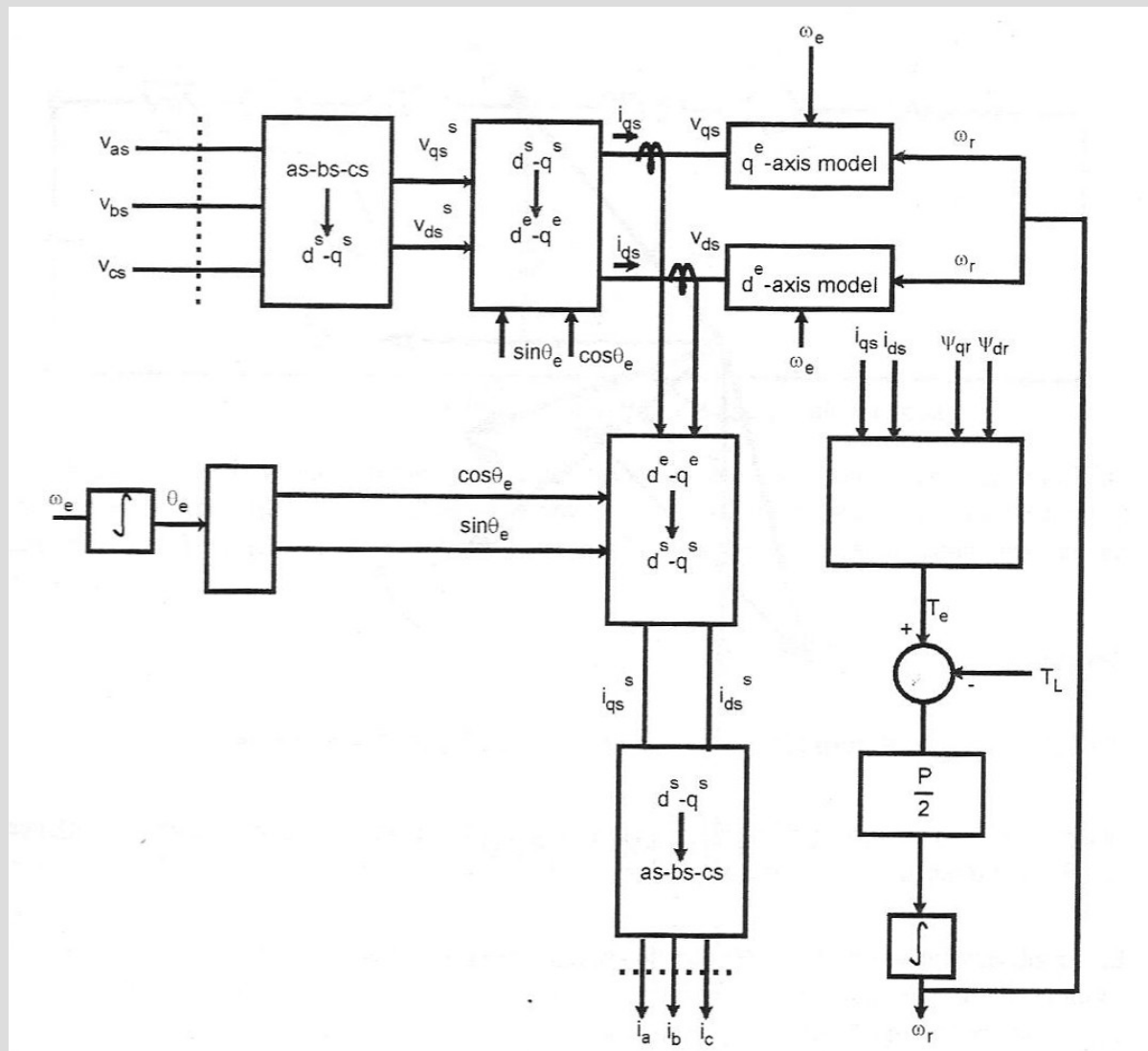
Transformação do Sistema Estacionário $as-bs-cs$ para d^s-q^s



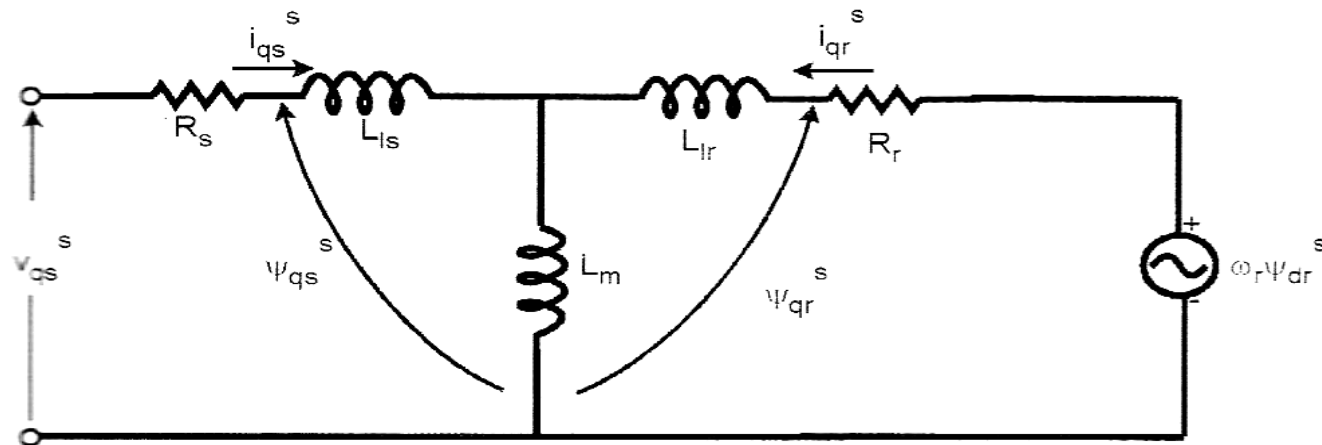
Circuitos Equivalentes no Sistema Rotativo d^e-q^e



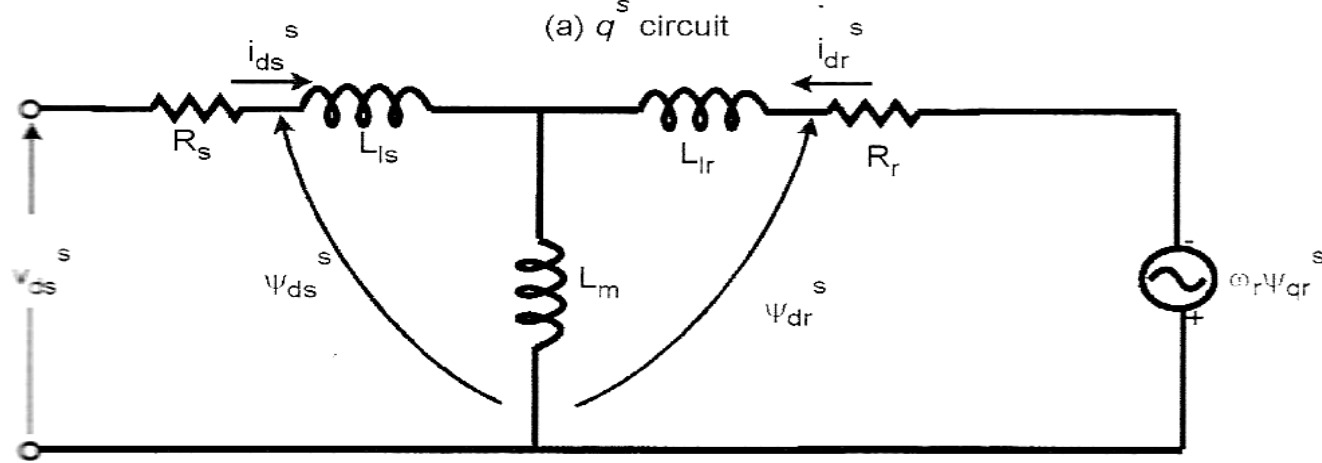
Modelo da Máquina no Sistema Rotativo



Circuitos Equivalentes no Sistema Estacionário d^s - q^s



(a) q^s circuit



(b) d^s circuit

Equivalente 1 ϕ Simplificado no Sistema Estacionário Complexo

