

# Modelagem do Motor de Indução

- UERJ
- PROMINP
- Prof. José Paulo V. S. da Cunha
- Referência:
  - Bose, B. K., Modern Power Electronics and AC Drives, Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2001. Capítulo 2.
- Rio de Janeiro, 18 de setembro de 2012.

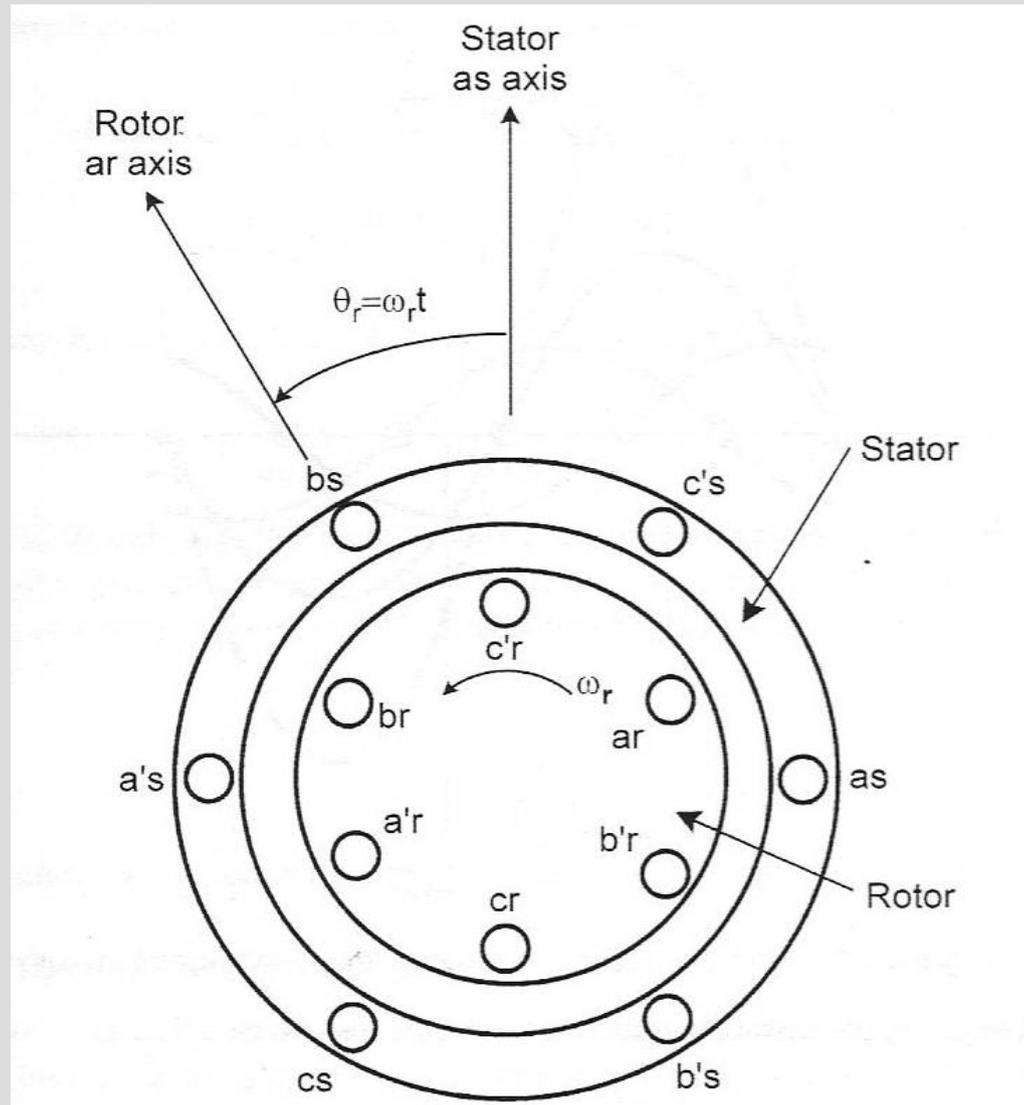
# Motores CC

- 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
  - $\omega_r$  é a frequência elétrica do rotor (rad/s)

- Exemplo:

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

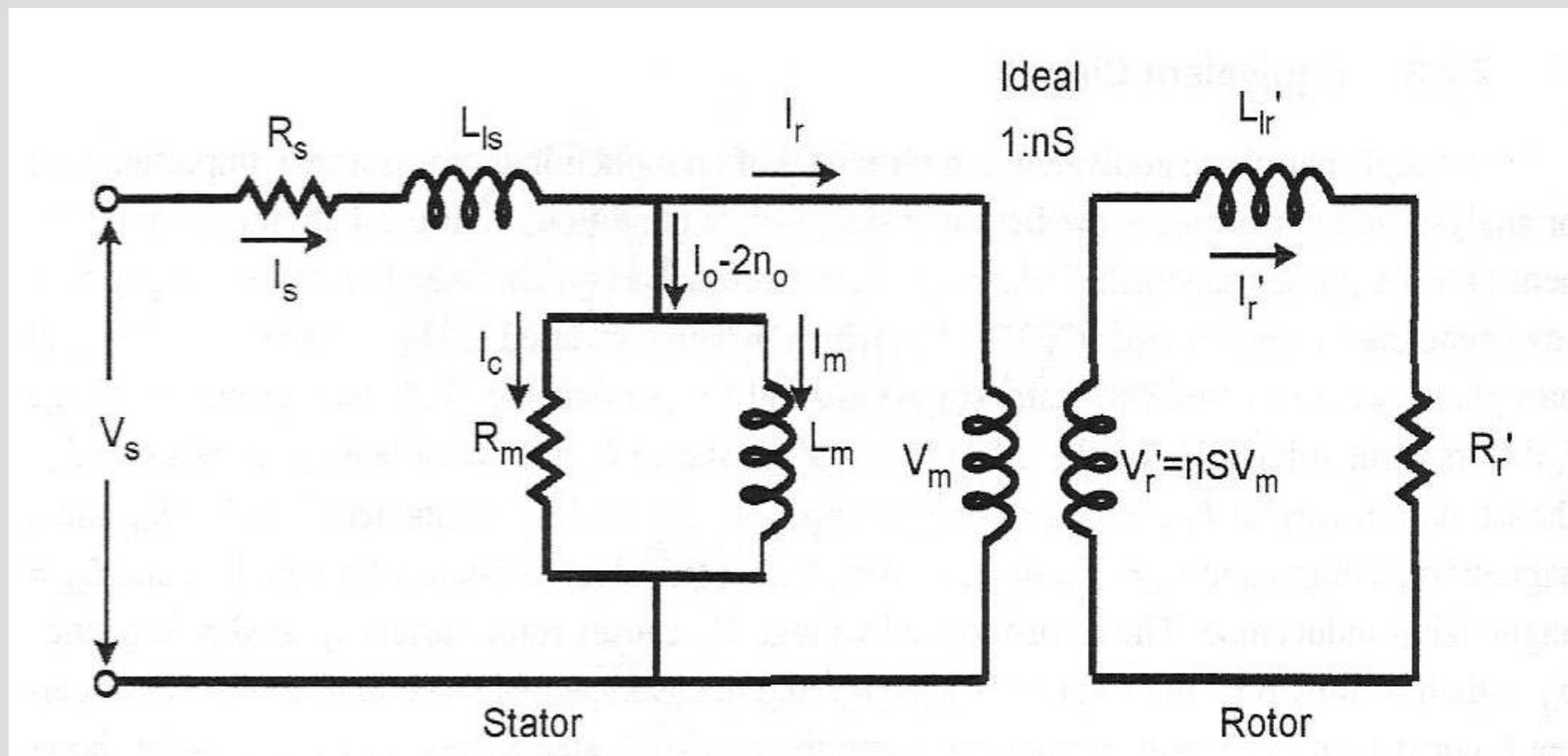
# Motor de Indução – Conceitos Básicos

- Escorregamento (pu):

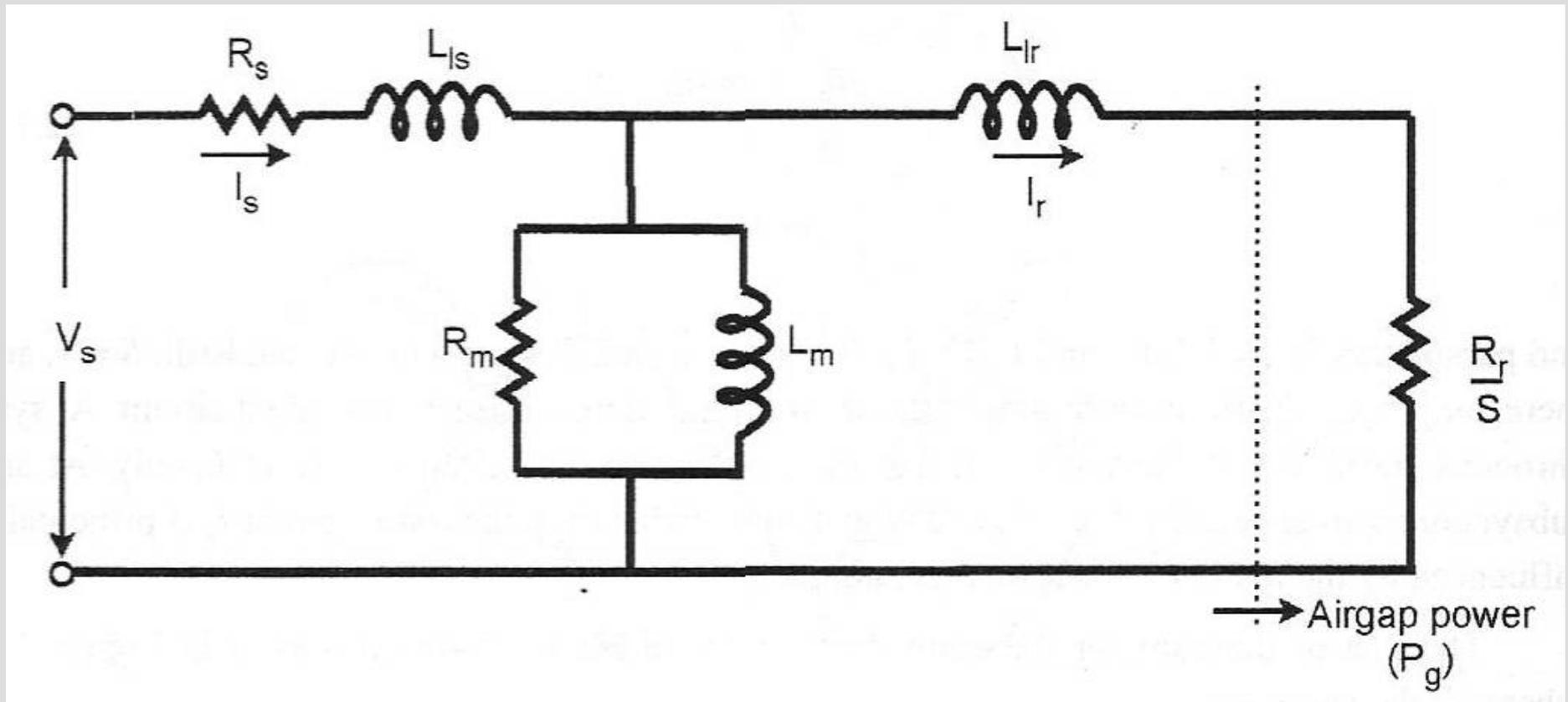
$$S = \frac{N_e - N_r}{N_e} = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} = \frac{\omega_{sl}}{\omega_e}$$

- onde:
  - $N_r$  é a velocidade do rotor (rpm)
  - $\omega_e$  é a frequência do estator (rad/s)
  - $\omega_r$  é a frequência elétrica do rotor (rad/s)
  - $\omega_{sl}$  é a frequência de escorregamento (rad/s)

# Circuito Equivalente 1 $\phi$ com Transformador de Acoplamento



# Circuito Equivalente 1 $\phi$ em Relação ao Estator



# Torque Obtido do Circuito Equivalente no Estator

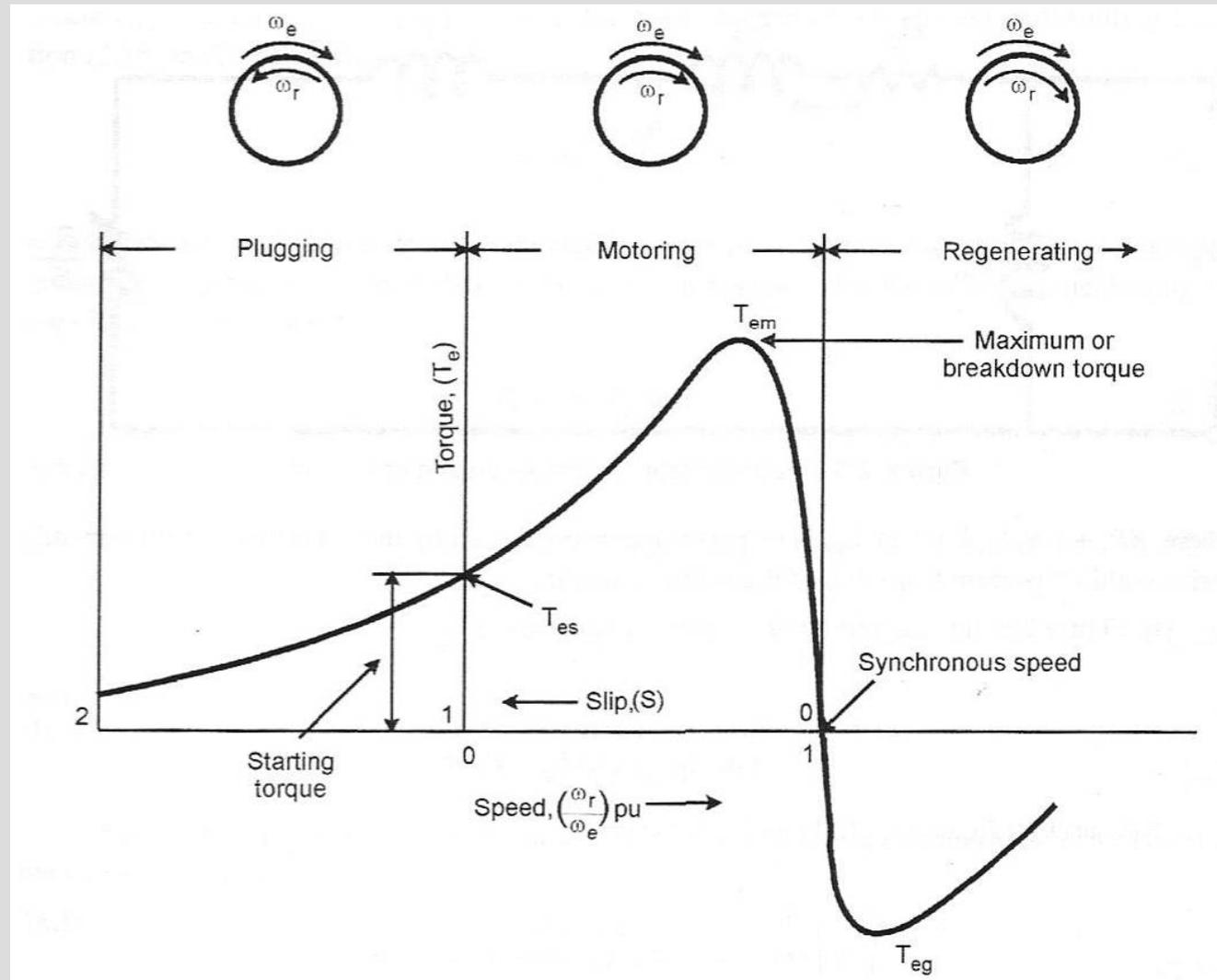
- Torque eletromagnético (Nm):

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

- onde:

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

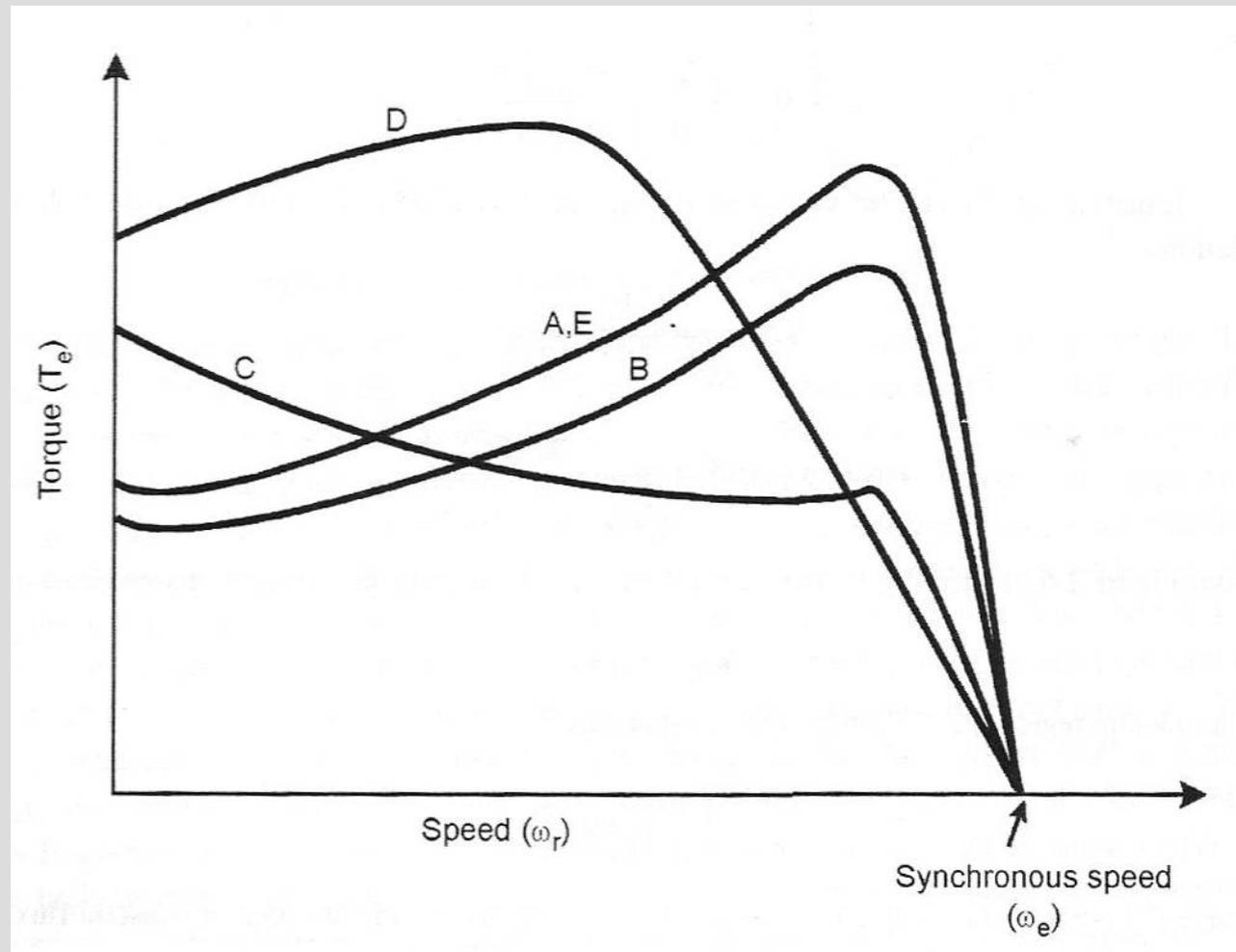
# Curva de Torque x Velocidade



# Classificação NEMA para Motores de Indução

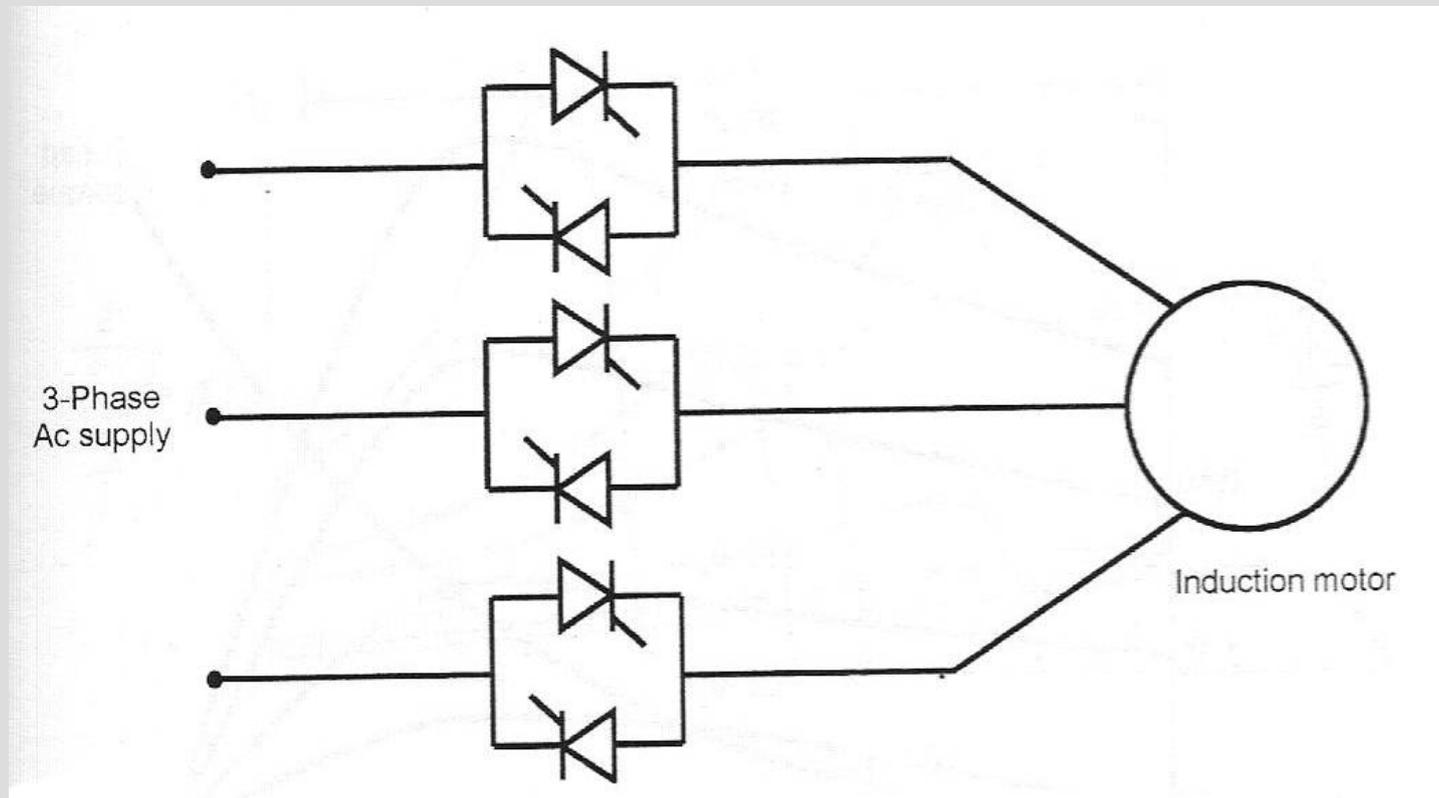
- NEMA – *National Electrical Manufacturers Association*
- Classes de motores de indução:
  - A – baixo torque de partida, alta corrente de partida e baixo escorregamento em operação
  - B – semelhante à classe A com mais escorregamento, adequada à velocidade constante
  - C e D – alto torque de partida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

# Classificação NEMA para Motores de Indução



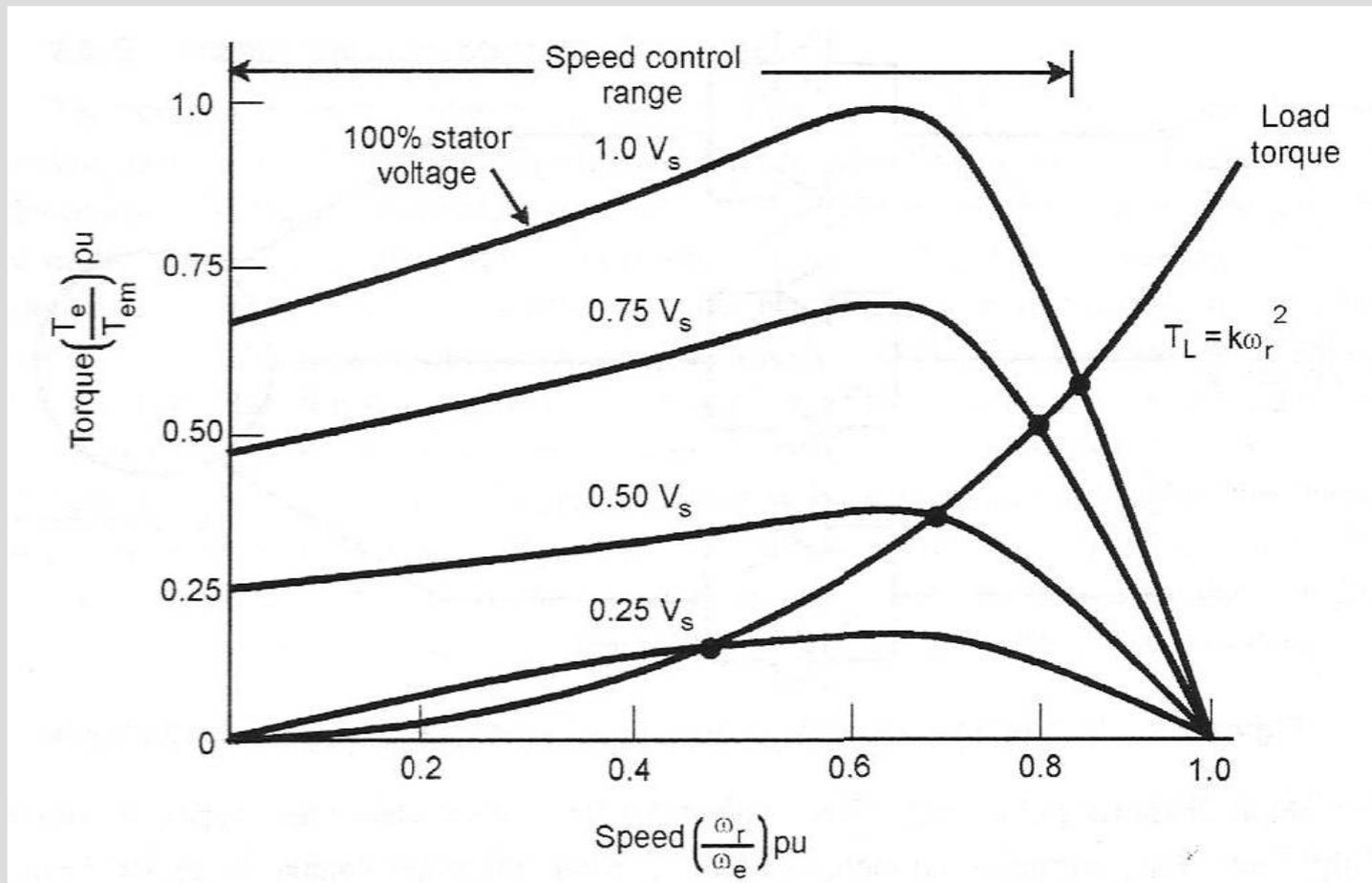
# Operação com Frequência Constante e Tensão Variável

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



# Operação com Frequência Constante e Tensão Variável

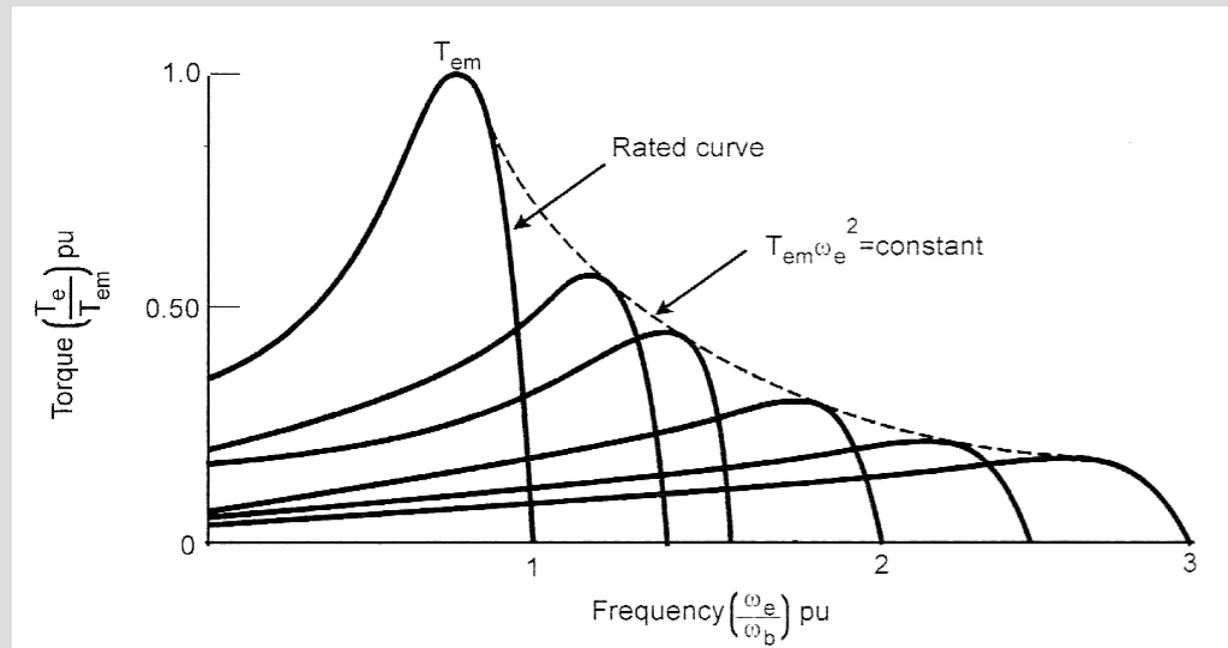
- Exemplo: carga bomba ou ventilador,  $T_L = k \omega_r^2$



# Operação com Frequência Variável e Tensão Constante

- Operação semelhante a motor CC campo série

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

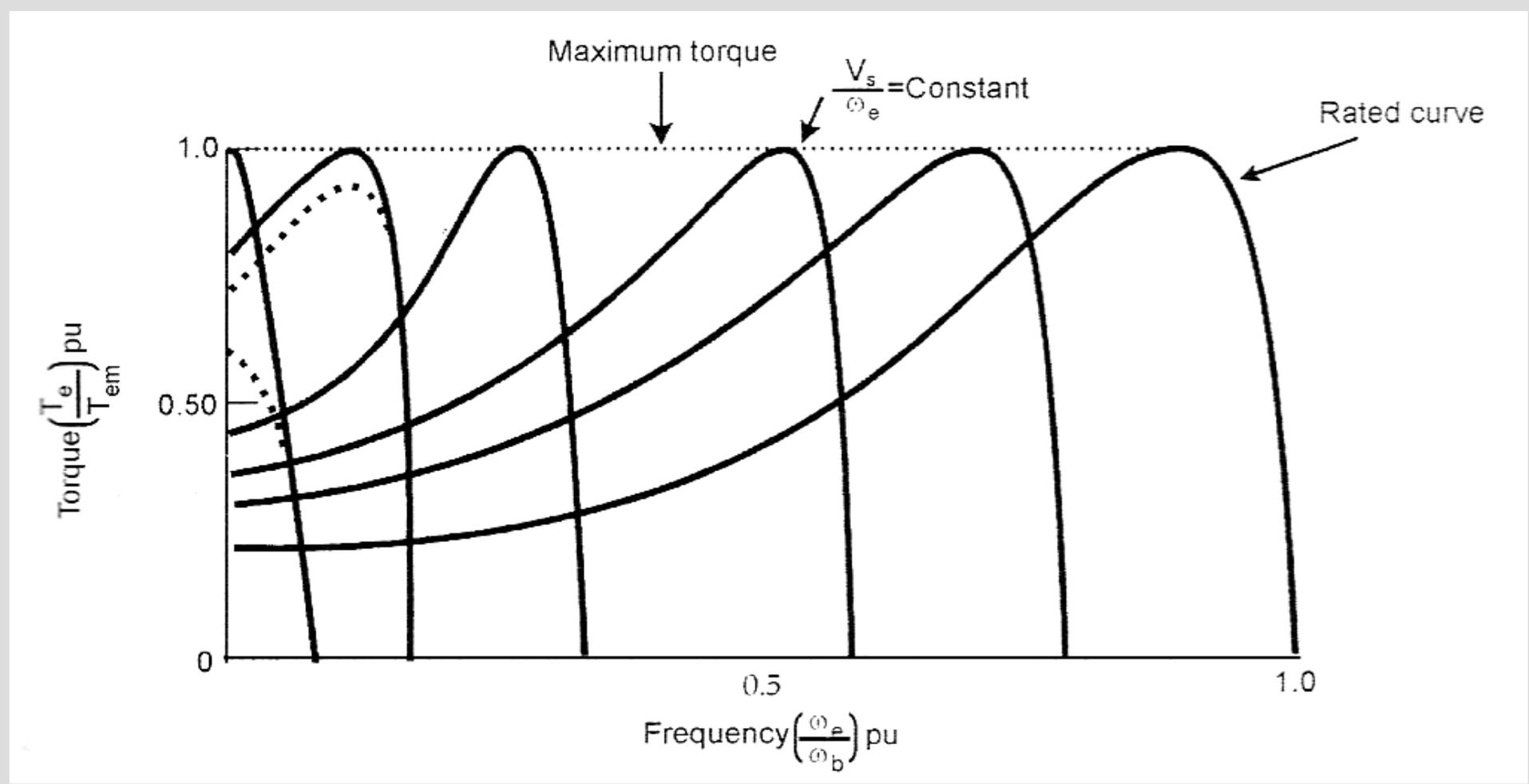


- Corrente grande em baixa frequência causa saturação do ferro e distorção

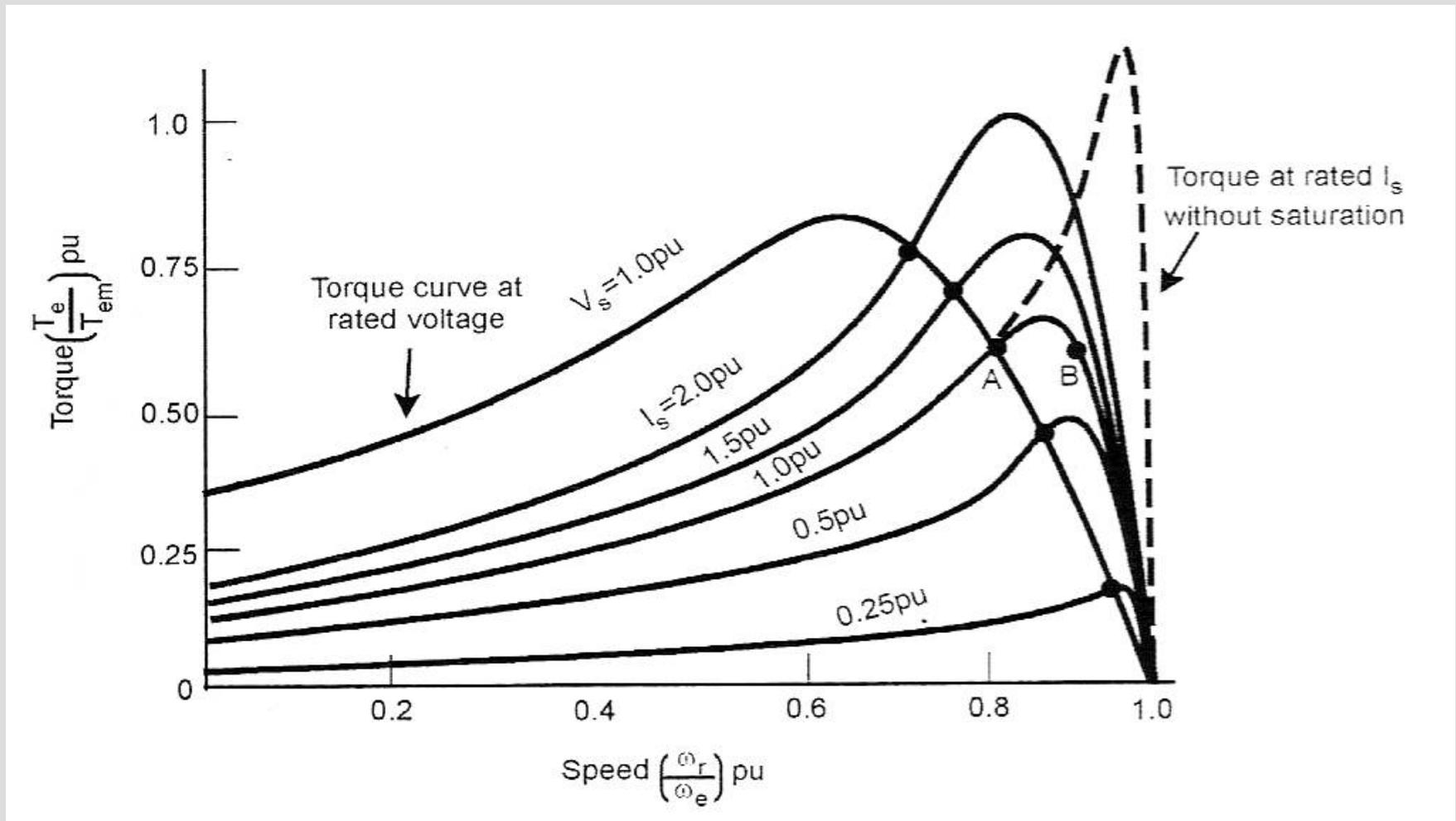
# Operação com Relação V/Hz Constante

- 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

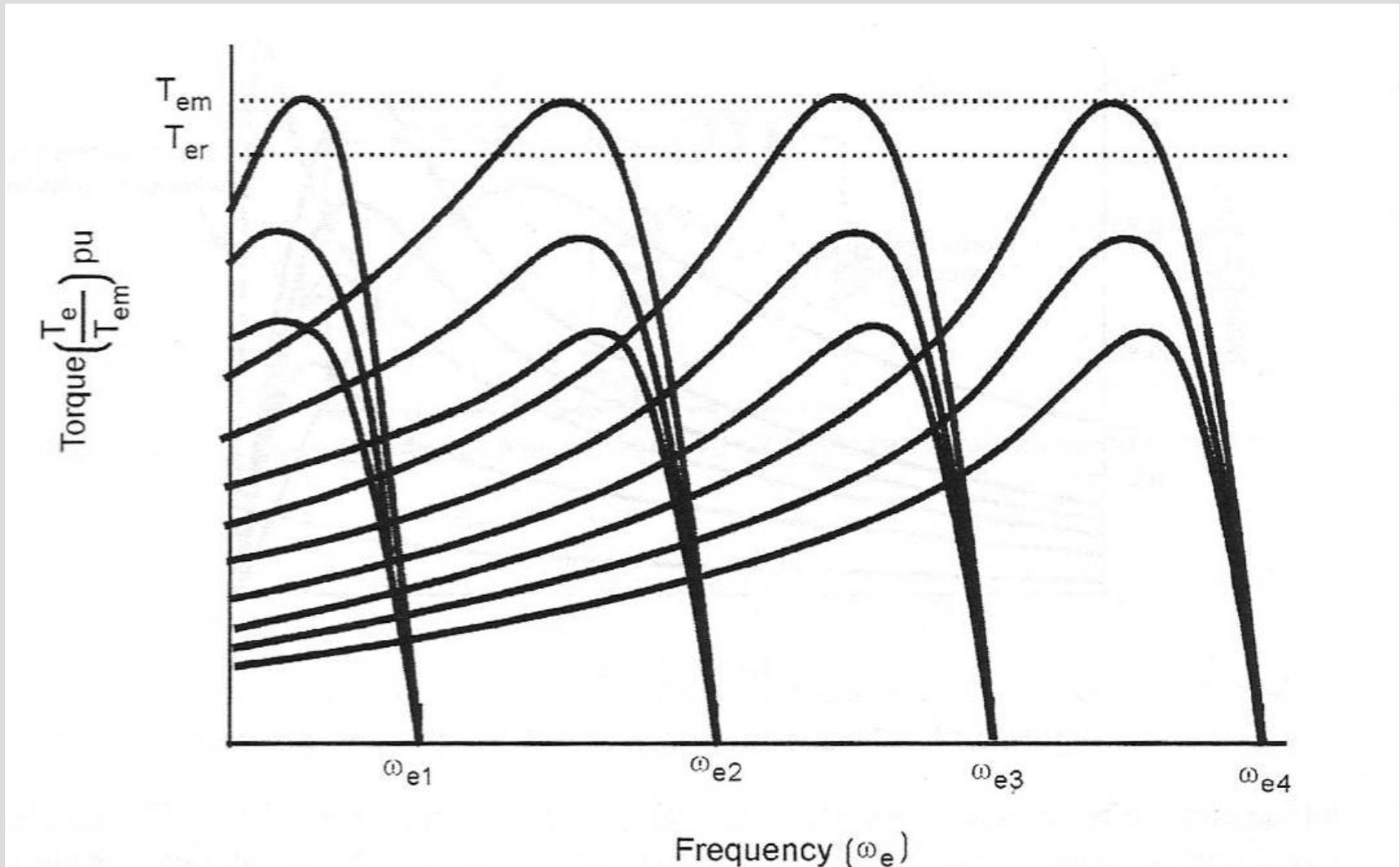
# Operação com Relação V/Hz Constante



# Operação com Frequência Constante e Corrente Variável



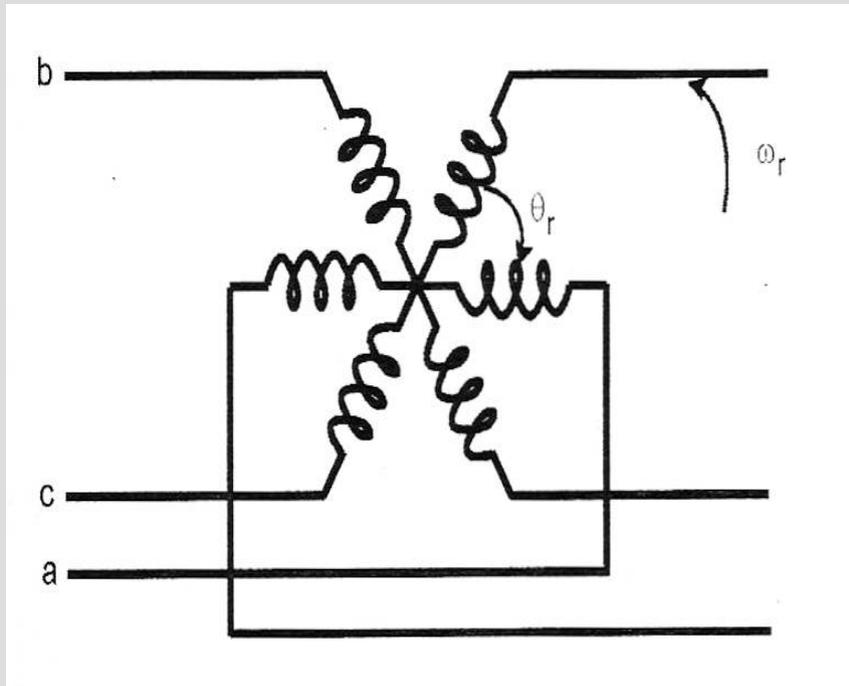
# Operação com Frequência Variável e Corrente Variável



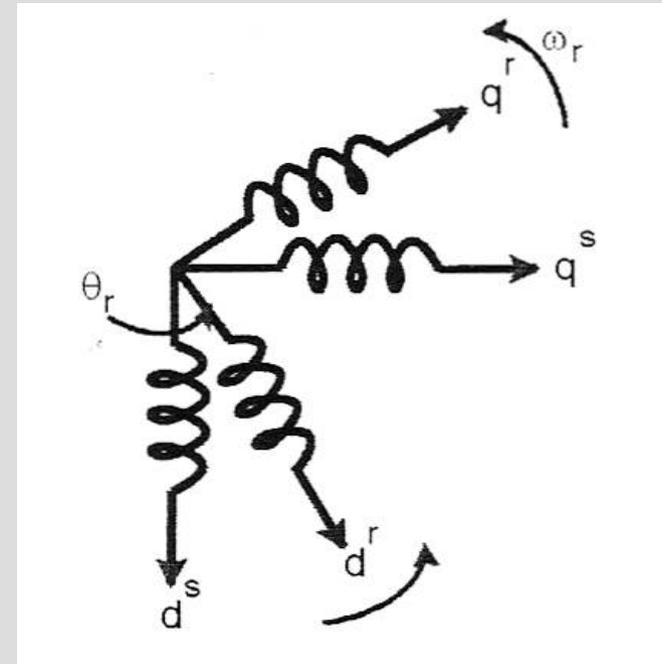
# Modelo Dinâmico $d-q$

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

# Modelo Dinâmico $d-q$

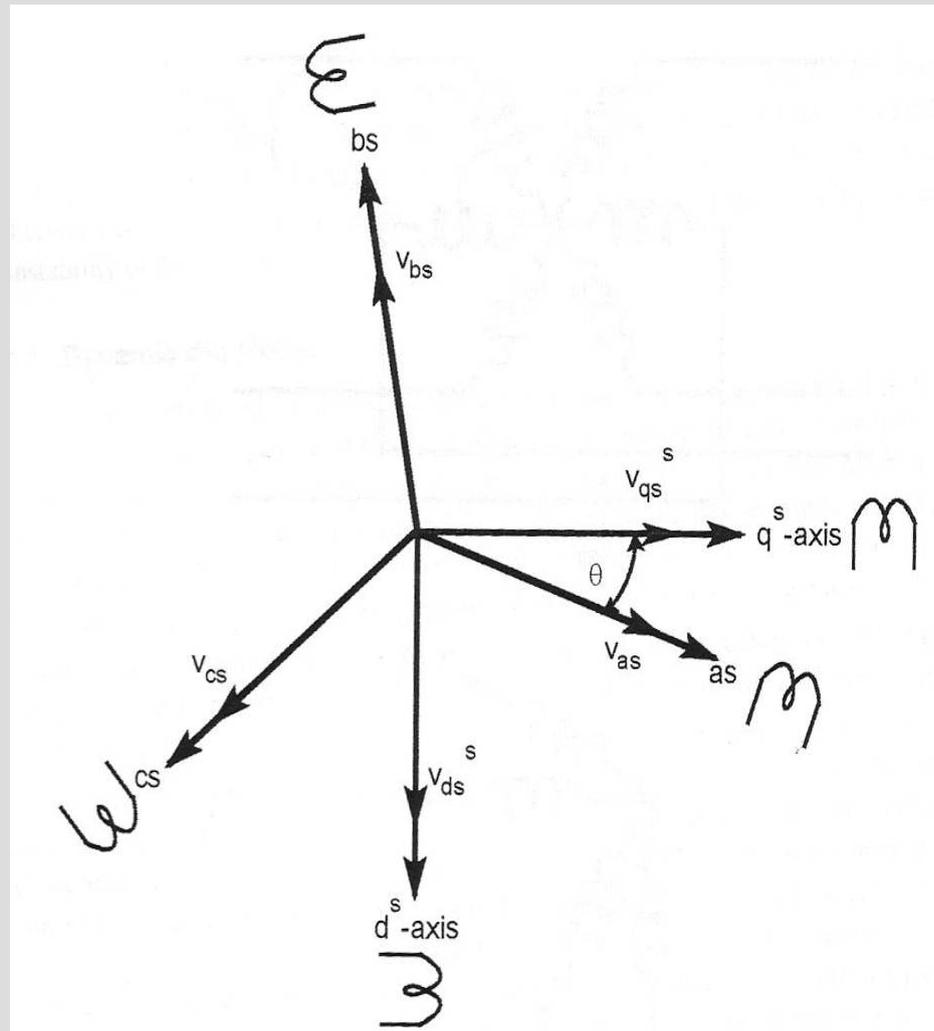


Sistema trifásico

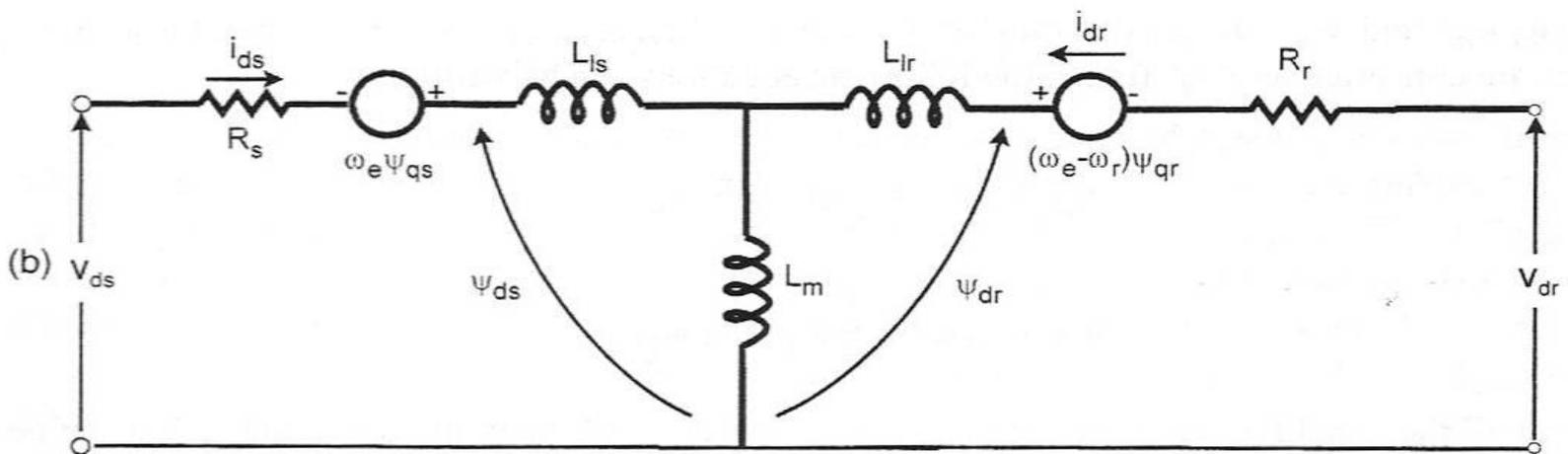
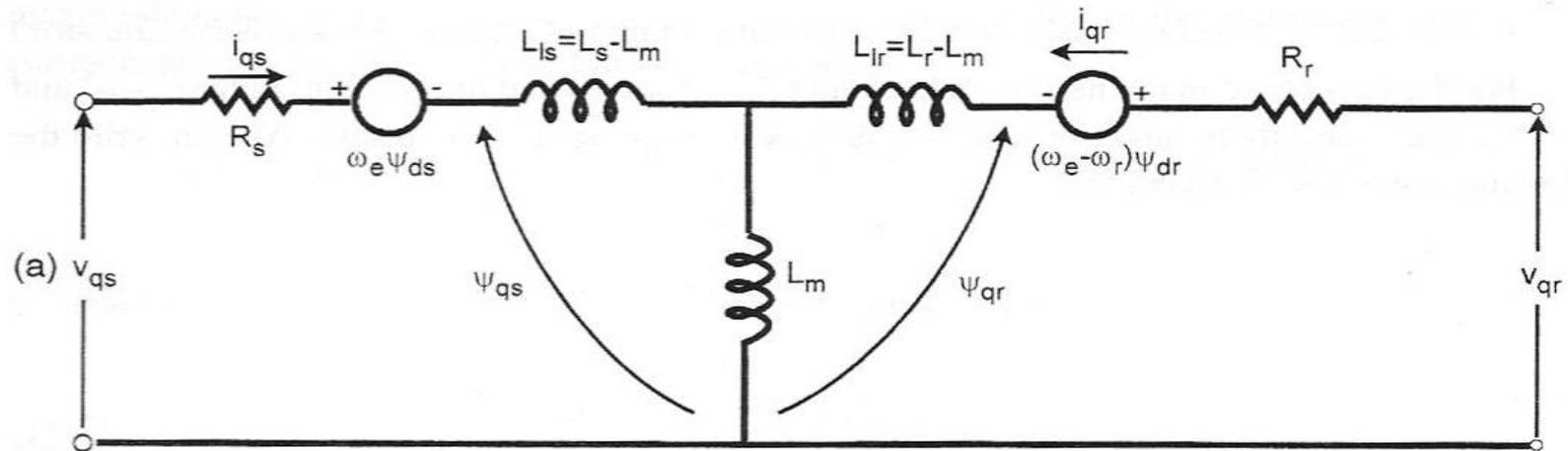


Sistema bifásico  
equivalente

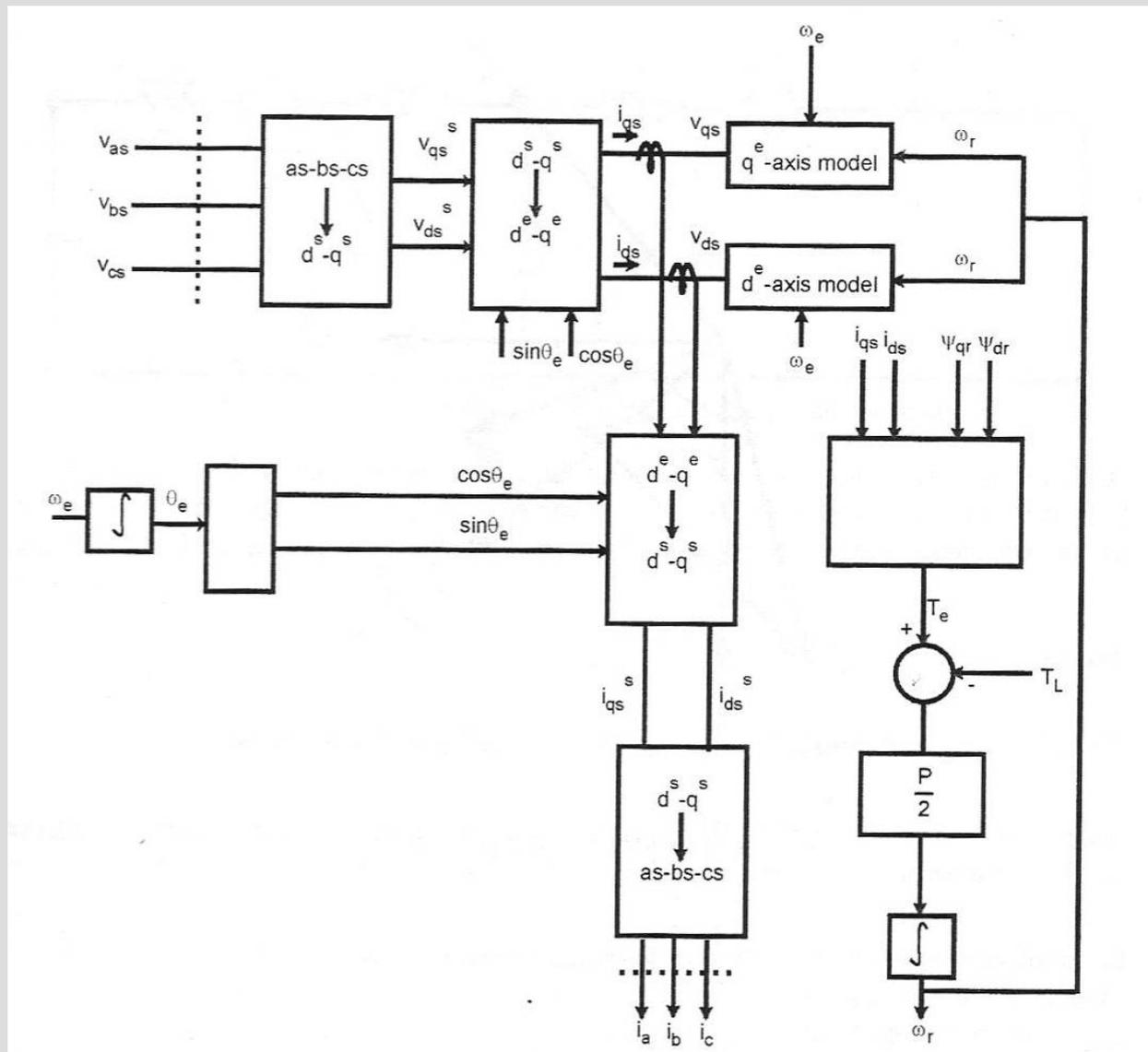
# Transformação do Sistema Estacionário $as-bs-cs$ para $d^s-q^s$



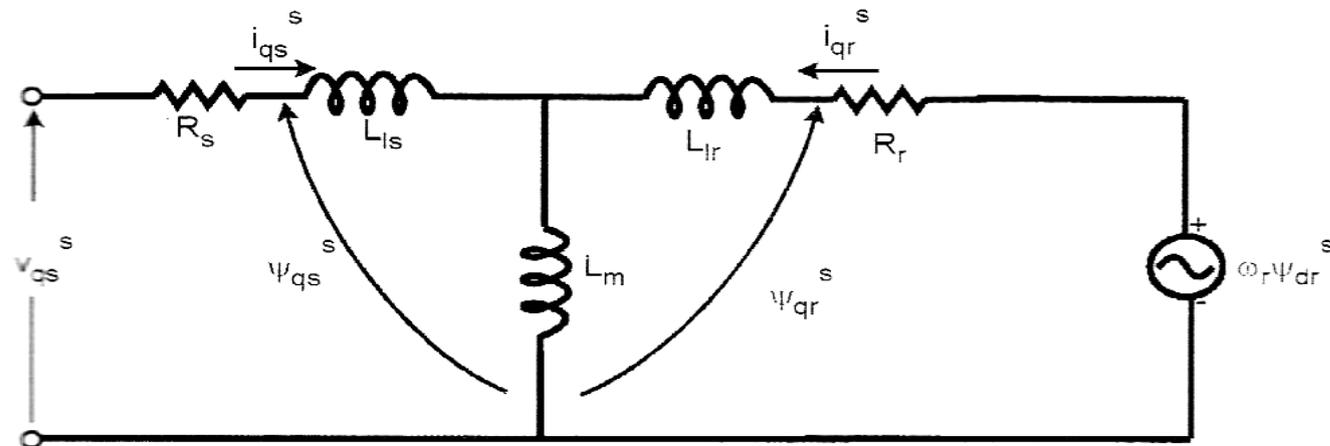
# Circuitos Equivalentes no Sistema Rotativo $d^e$ - $q^e$



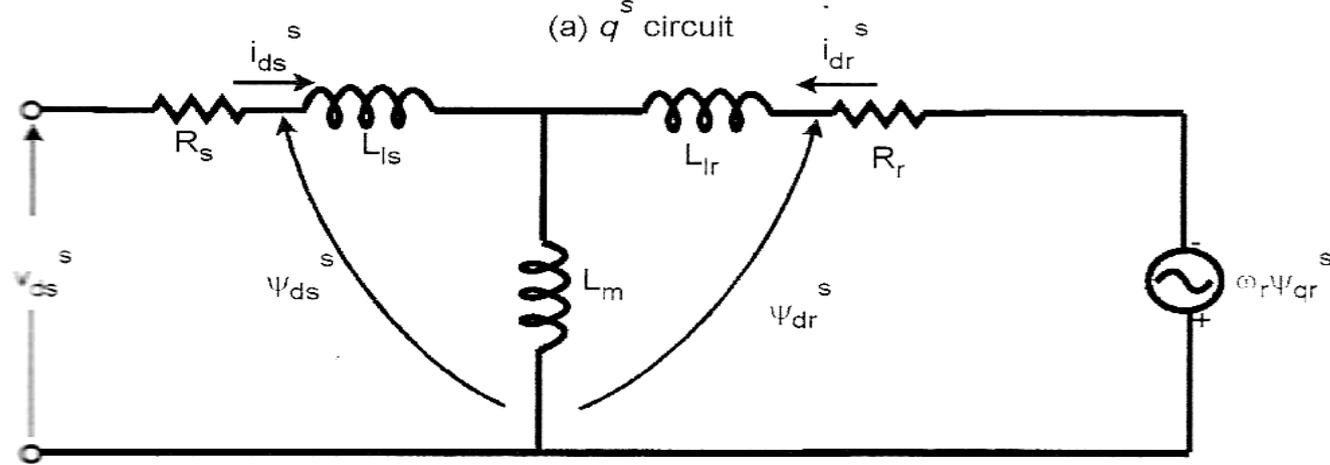
# Modelo da Máquina no Sistema Rotativo



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



(a)  $q^s$  circuit



(b)  $d^s$  circuit

# Equivalente 1 $\phi$ Simplificado no Sistema Estacionário Complexo

