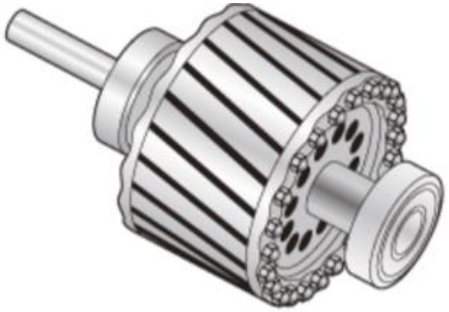
MOTORES DE INDUÇÃO

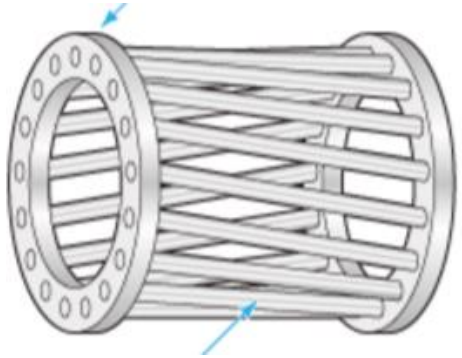
Estator: Campo

- Tres fases
- P polos (4-8)
- Distribução senoidal do fluxo

Rotor: Armadura

- Cilindro de ferro com conductores: Gaiola

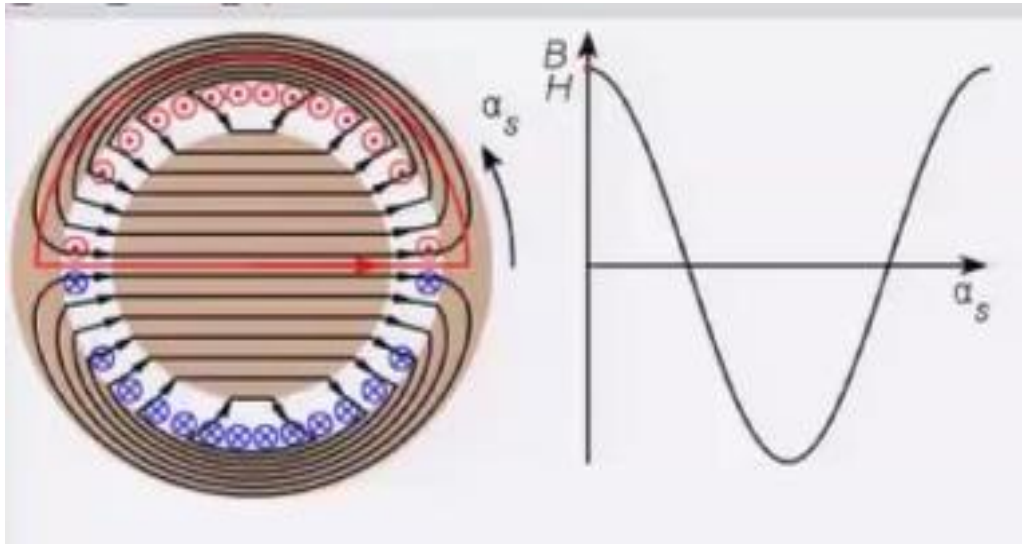




Special Thanks
Sajith K V

www.LearnEngineering.org

CAMPOS MAGNÉTICOS GIRANTES



Distribuição senoidal dos enrolamentos

Variação de campo com a posição angular

Aplicação de correntes senoidais:

Variação com o tempo

MOTOR DE INDUÇÃO. PRINCÍPIO

Imaginemos polos de estator não rotando.

Aplicamos corrente contínua.

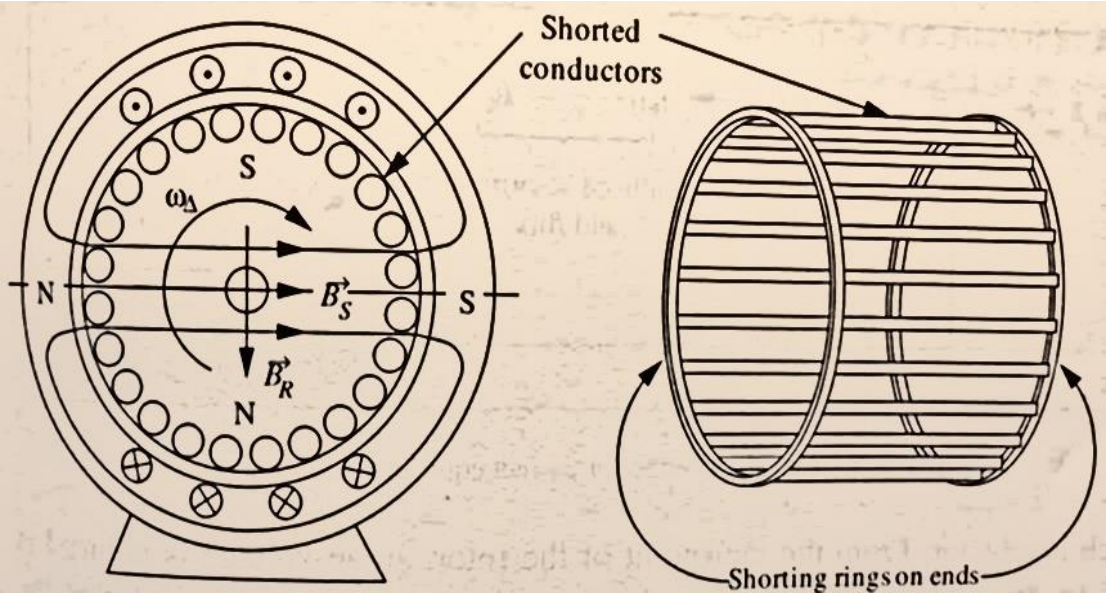
Giramos o rotor (sentido relógio): w_{Δ}

A rotação induz força eletromotriz (v)

$$v = \bar{l} \cdot \bar{u} \times \bar{B}$$

Correntes de Rotor=>Campo de Rotor

Torque sentido contrário as agulhas do relógio



Cogdell, 1999

TORQUE EM MOTOR DE INDUÇÃO (1-FASE)

Torque depende das correntes induzidas =>

(v. resultados provas na louça)

Depende da velocidade de escorregamento

Conforme aumenta a velocidade de escorregamento:

- Aumenta a tensão induzida
- Aumenta impedância do circuito do rotor
  - Escorregamento pequena: resistiva
  - Escorregamento grande: indutiva

MODOS DE OPERAÇÃO

Operação estática:

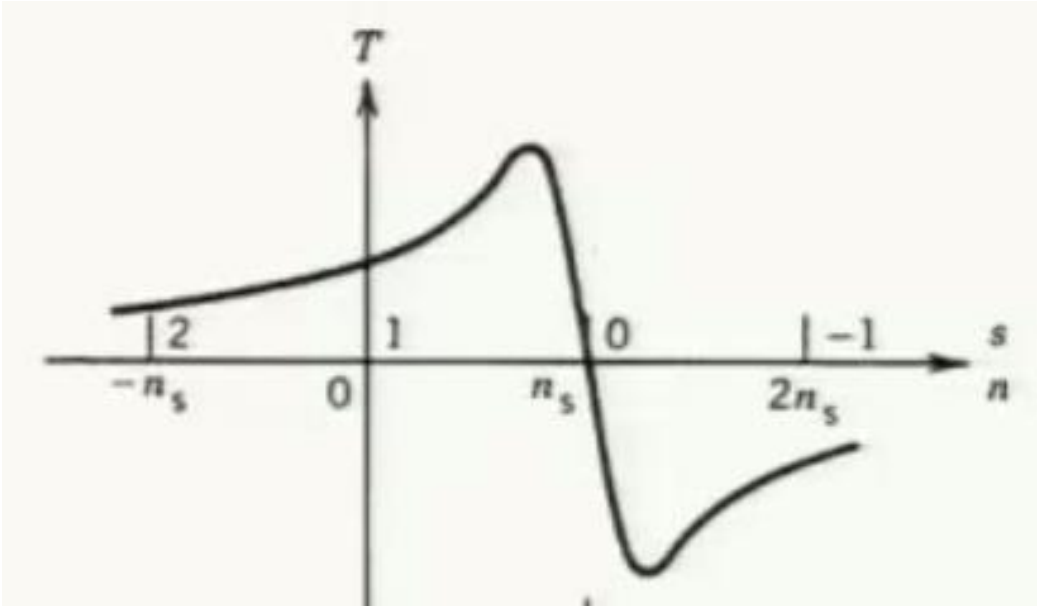
Transformador de fase variável

Em movimento:

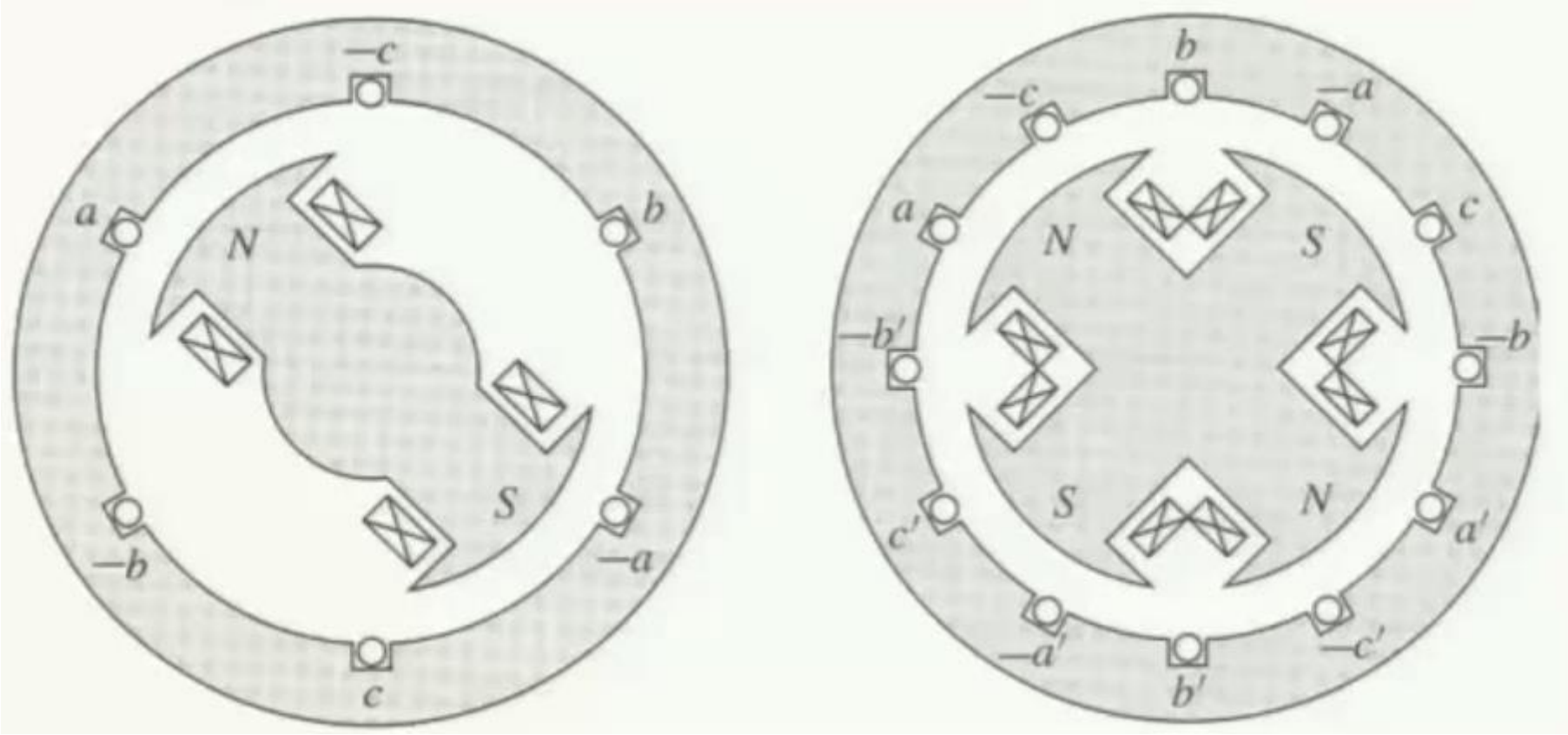
- Motor: Torque

- Gerador: Torque negativo

- “plugging”: dissipador



NP-POLOS,



MODOS DE OPERAÇÃO

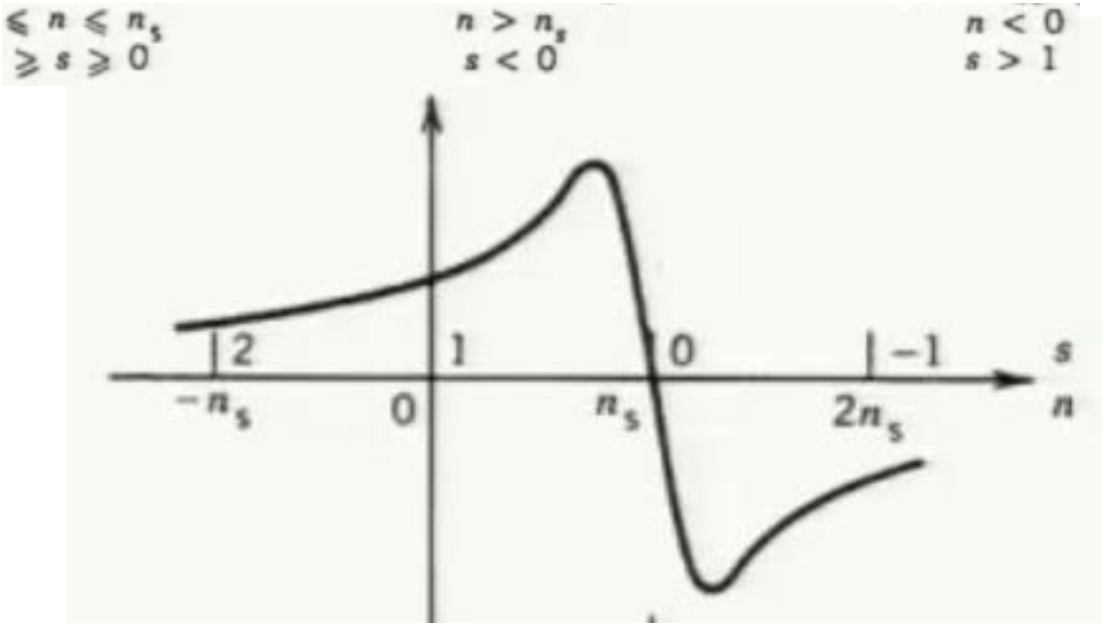
Em movimento:

- Motor: Torque positivo
  - Velocidade angular mecânica menor que a velocidade síncrona

- Gerador: Torque negativo
  - Velocidade angular mecânica maior que a velocidade síncrona:

Só é possível se recebe um torque externo

- Dissipador: “Plugging”



MOTOR DE INDUÇÃO DE TRÊS FASES

Frequência angular elétrica correntes trifásicas de estator: ω

Velocidade síncrona (p-polos); $\omega_s = \frac{2}{p} \cdot \omega$

Escorregamento: $s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}$; ω_m: velocidade do rotor

MOTOR: $0 < \omega_m < \omega_s$

GERADOR: $\omega_s < \omega_m$

- Geradores eólicos: Por quê?

$\omega_m = \omega_s$ não atua nem como gerador nem como motor.

MOTOR DE INDUÇÃO DE TRÊS FASES

Motor:

- Funciona com $\omega_m \approx \omega_s$ (mas não igual!)
- Torque proporcional ao escorregamento
- Ponto de máximo torque
- Inicio do motor corresponde a s=1.
  - Motor trifásico de indução: auto arranque

MOTORES DE INDUÇÃO. QUESTÕES

Para o máximo torque, os polos de estator e rotor devem estar: alinhados 0° ou defasados 90°? 90°

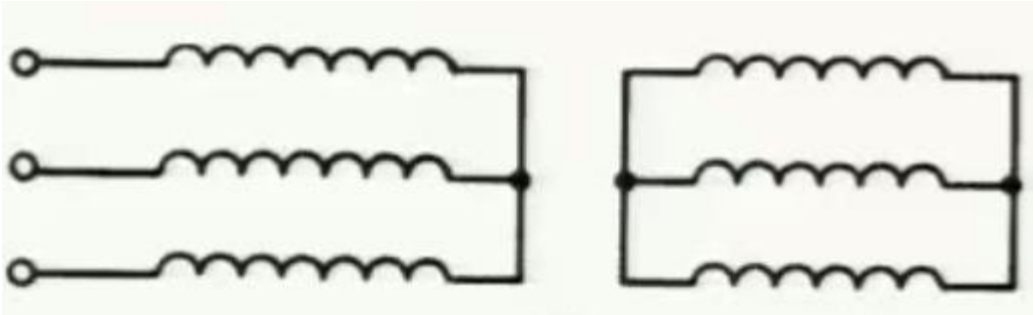
A mais polos um motor de indução gira mais rápido? Não

Temos um motor de indução trifásico (60 Hz) com 2 polos e escorregamento de 5% Qual é:

1. velocidade de rotação do rotor (rpm): 3420 rpm
2. velocidade de rotação do fluxo do rotor (rpm): 3600 rpm
3. frequência das correntes de estator (Hz): 60 Hz
4. frequência das correntes de rotor (Hz): 3 Hz

CIRCUITO EQUIVALENTE

Motor trifásico



Modelo de uma máquina de indução

Estática:

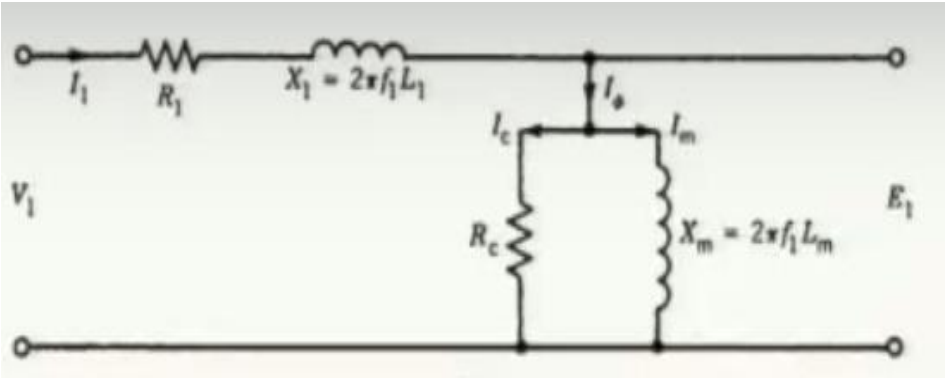
- Funciona com um transformador

Em rotação:

- Existe um atenção induzida no rotor

Podemos supor que tem um comportamento elétrico similar a um transformador

CIRCUITO EQUIVALENTE

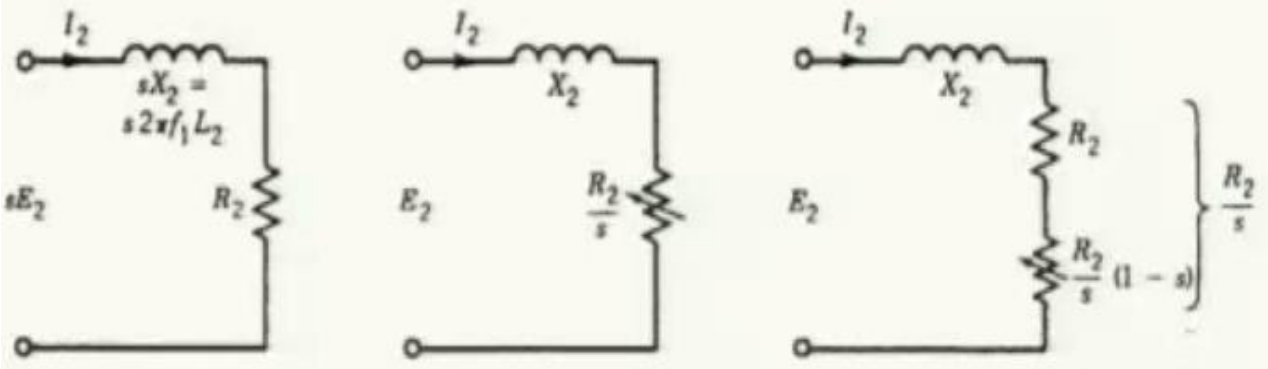


Estator

Rc ("core lossess")

Leakage inductance: Leakage flux:

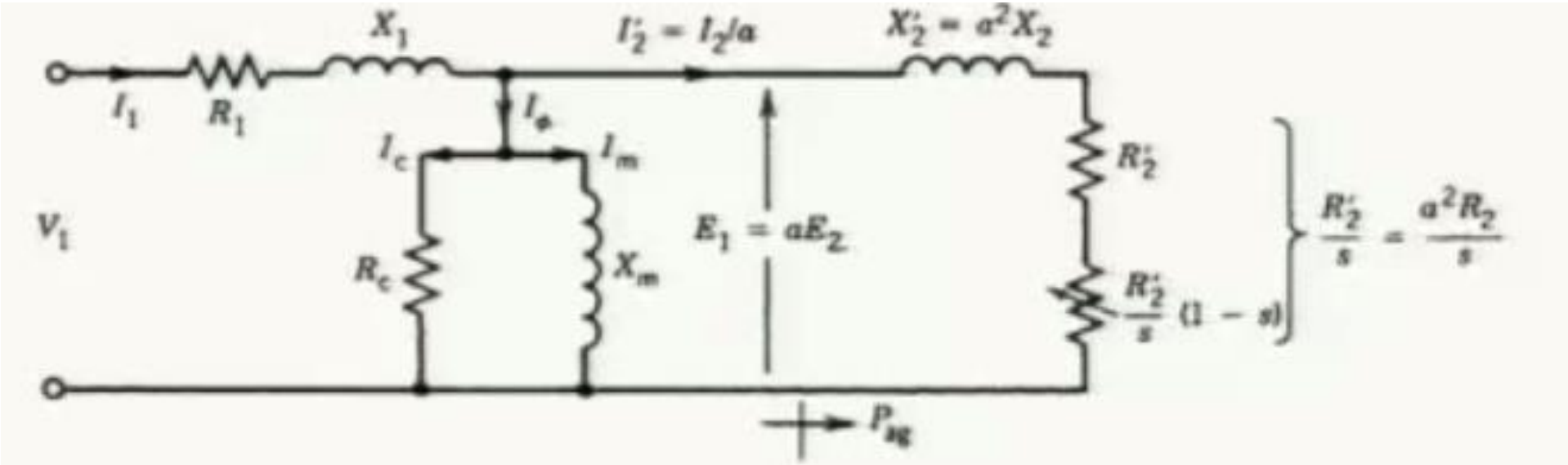
- Fluxo que não atinge o rotor



Rotor

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + \frac{1-s}{s} R_2$$

CIRCUITO EQUIVALENTE



CIRCUITO EQUIVALENTE MOTOR DE INDUÇÃO

Elementos de Rotor:

X'_R: Reatância do rotor

R'_R: Perdas no rotor

Elementos do estator:

R_S : Perdas no estator

X_S : Reatância do estator

$\frac{1-s}{s} R'_R$: Potência util mecânica

Elementos do entreferro

X_e : magnetização

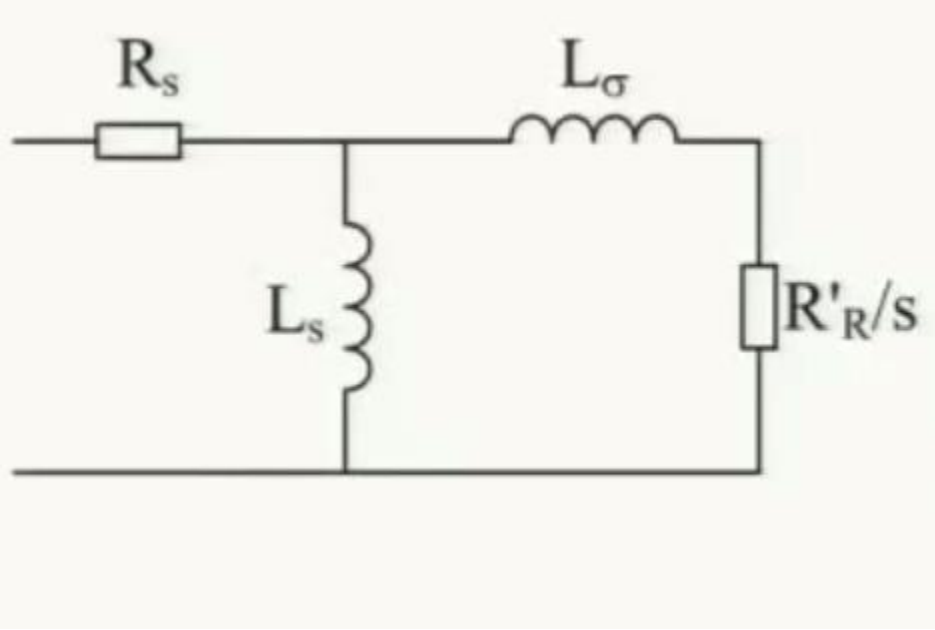
R_i : Perdas circuito magnético

IDENTIFICAÇÃO DE PARAMETROS

- Medida da resistência (corrente cc)

- Ensaio sem carga
  - S=0
  - Termo de resistência infinita: Não circula corrente por essa rama

-Rotor bloqueado
  - S=1
  - Use a pequena tensão (20% do nominal) para evitar correntes elevadas



CIRCUITO EQUIVALENTE DE THEVENIN

Fonte de tensão e impedância equivalente:

$$\bar{V}_{eq} = \bar{V}_S \frac{jX_a}{R_S + j(X_S + X_a)} \; ;$$

$$R_{eq} + jX_{eq} = \frac{(R_S + jX_S)jX_a}{R_S + j(X_S + X_a)} ;$$

Conectando o rotor:

$$\bar{I}_R = \frac{\bar{V}_{eq}}{(R_S + \frac{R'_R}{s}) + j(X_{eq} + X_R)} \; ;$$

TORQUE

- Torque

$$P_m = \omega_m \cdot T_m = \frac{1-s}{s} R'_R \cdot \bar{I}_R{}^2$$

Para uma fase:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}$$

$$T_m = \frac{(\bar{V}_{eq})^2 \left(\frac{R'_R}{s}\right)}{\omega_s\left(R_S + \frac{R'_R}{s}\right) + j(X_{eq} + X_R)}$$

POTENCIA: MECÂNICA E ELÉTRICA

Potencia desenvolvida:

$P_{dev}=w_m T_m = (1-s)w_S T_m$

Perdidas resistivas no rotor

$P_R=sw_S T_m$

Potencia entreferro: Potencia total entregue ao rotor

$P_{ef}= P_{dev} +P_R= w_S T_m$

Potencia total entregue ao rotor:

$P_T = (R_R /s)I_R^2$;

Perdas resistivas:

$P_{ROTOR} = R_R I_R^2$;

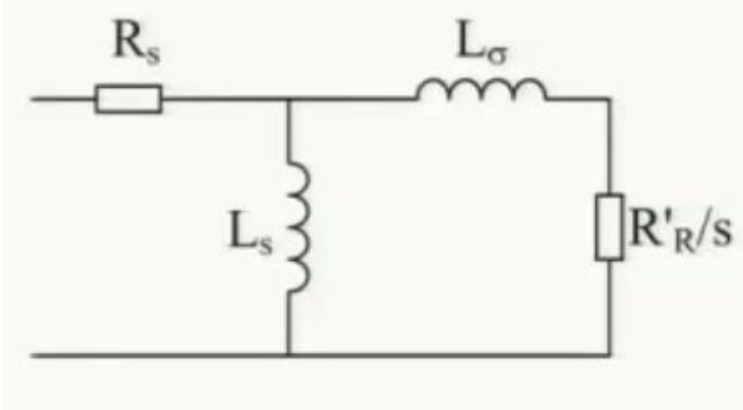
Potencia mecânica util:

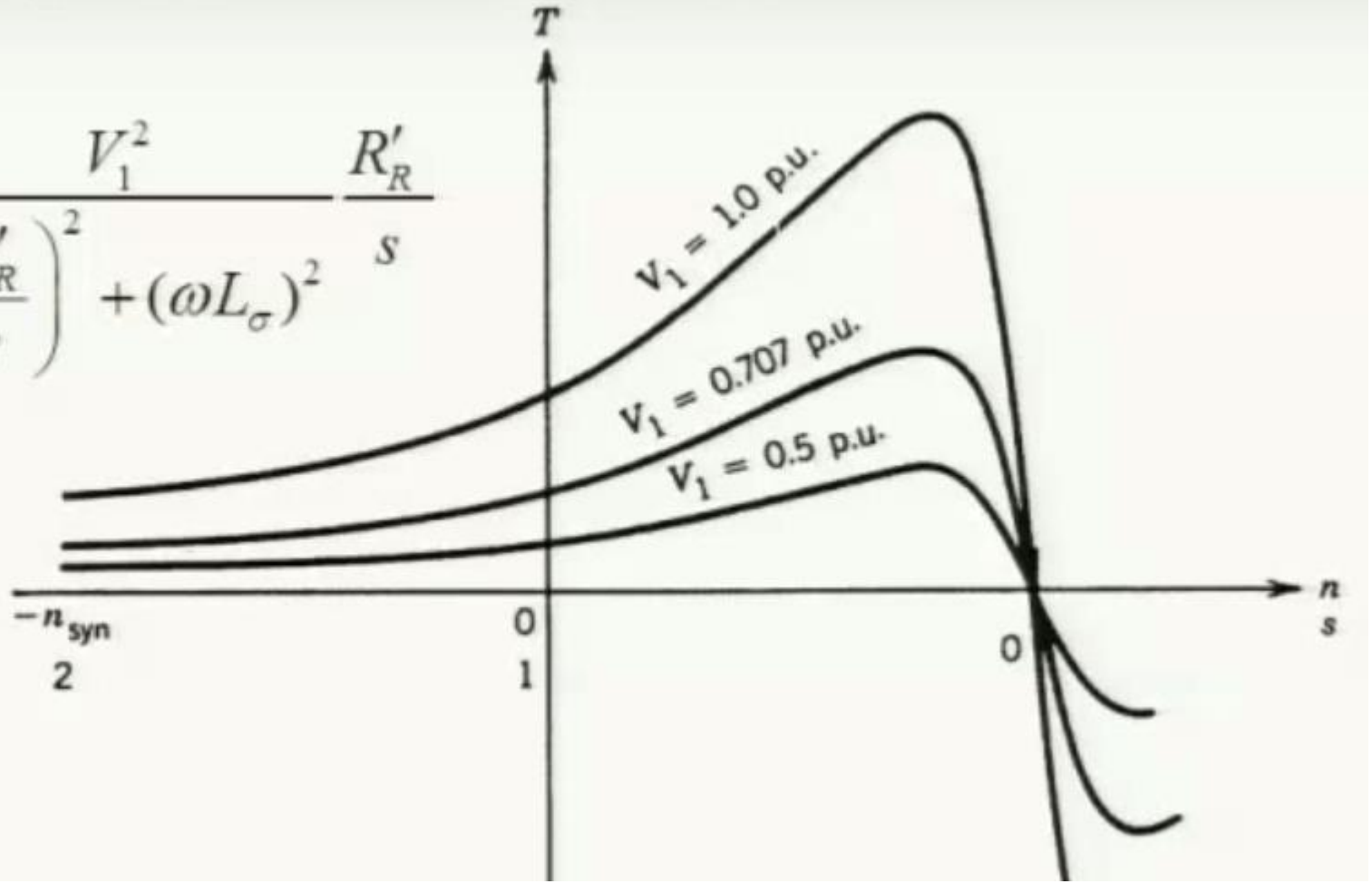
$P_{mec} = P_T - P_{ROTOR} =(R_R /s)I_R^2 - R_R I_R^2 =$

$= (1-s) P_T$;

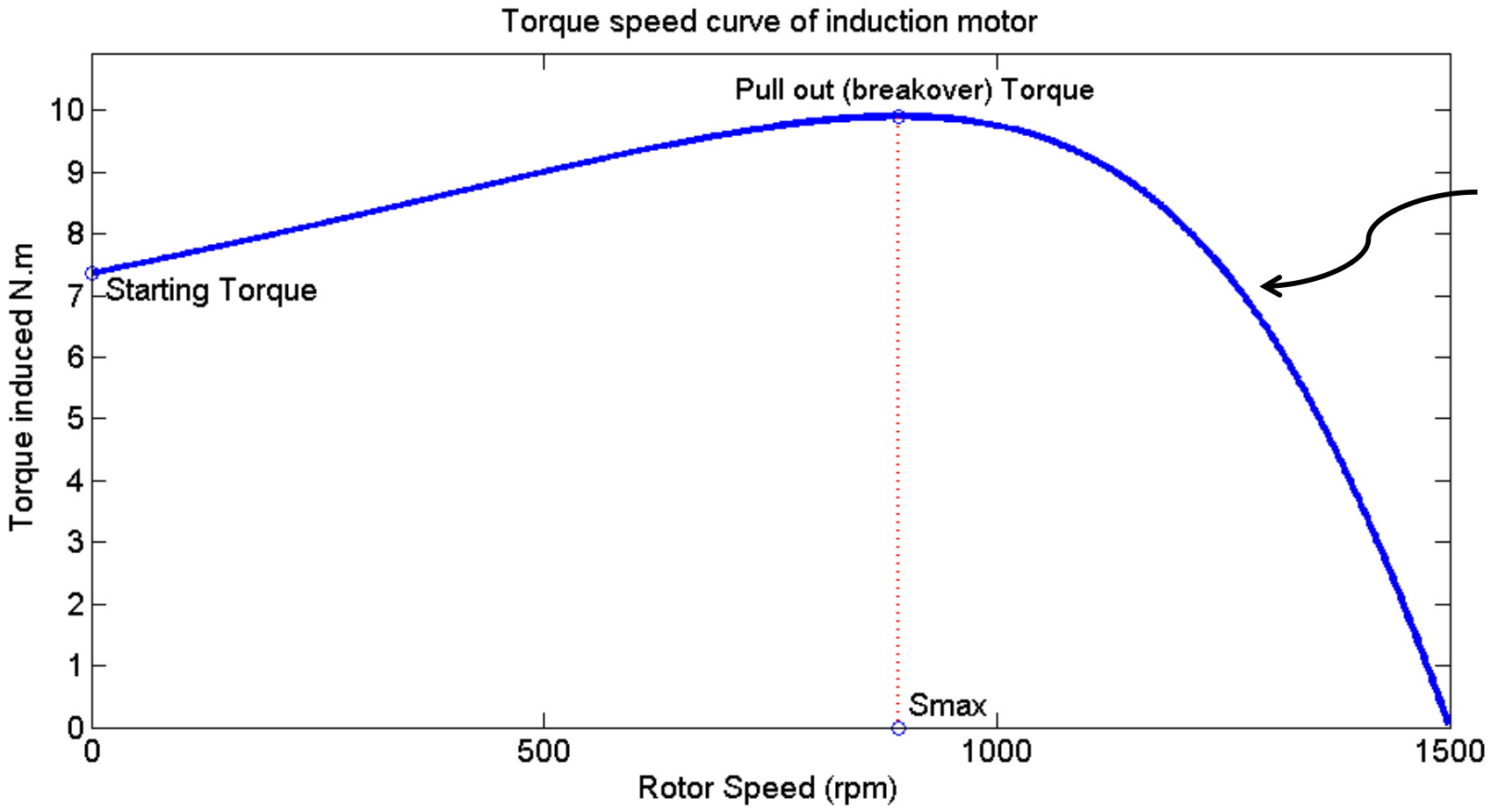
TORQUE-VELOCIDADE MOTOR DE INDUÇÃO

$$T_{mech} = \frac{p}{2\omega} \frac{V_1^2}{\left(\frac{R'_R}{s}\right)^2 + (\omega L_\sigma)^2} \frac{R'_R}{s}$$





TORQUE



Small-slip region:

Linear!!! (quase)

TORQUE

Torque máximo:

- Não depende da R'_R
- A w_m torque maximo com R'_R

Região de small-slip w_m -> w_s :

- Região de operação
- Quase-linear

$$T_{mec}(s) \approx s \cdot \frac{V^2{}_T}{\omega_S R'_R};$$

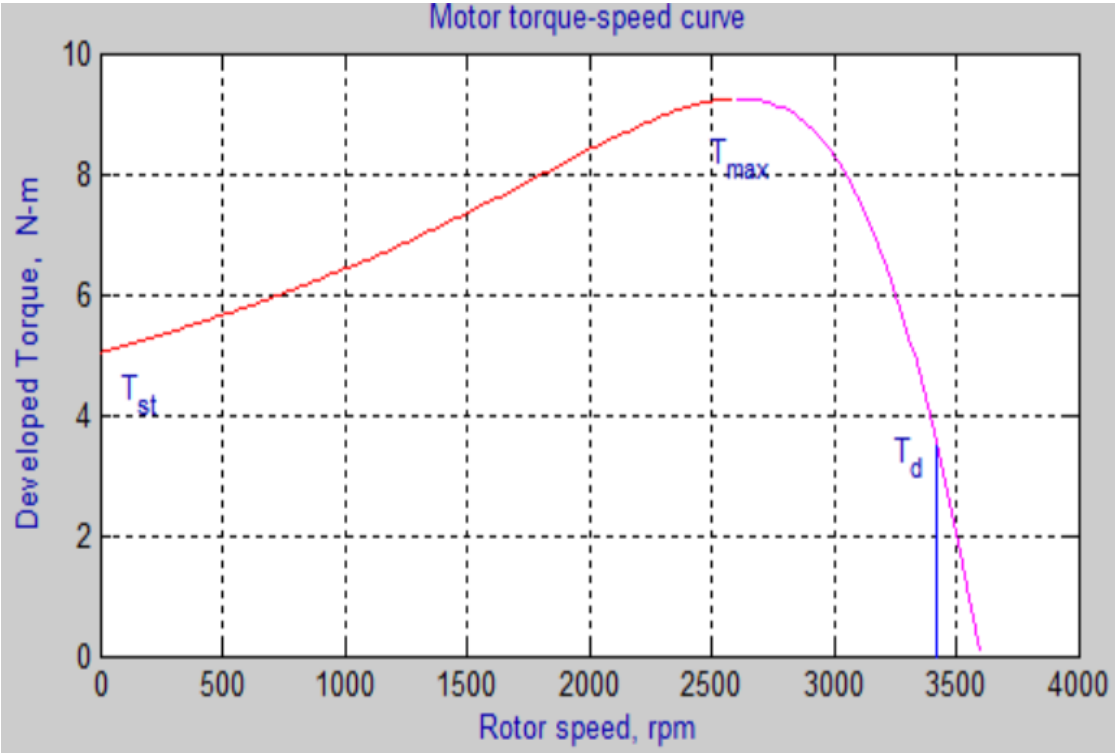
Resistência de Rotor R'_R

- Diminui => Aumenta eficiência
- Aumenta => Torque de arranque grande

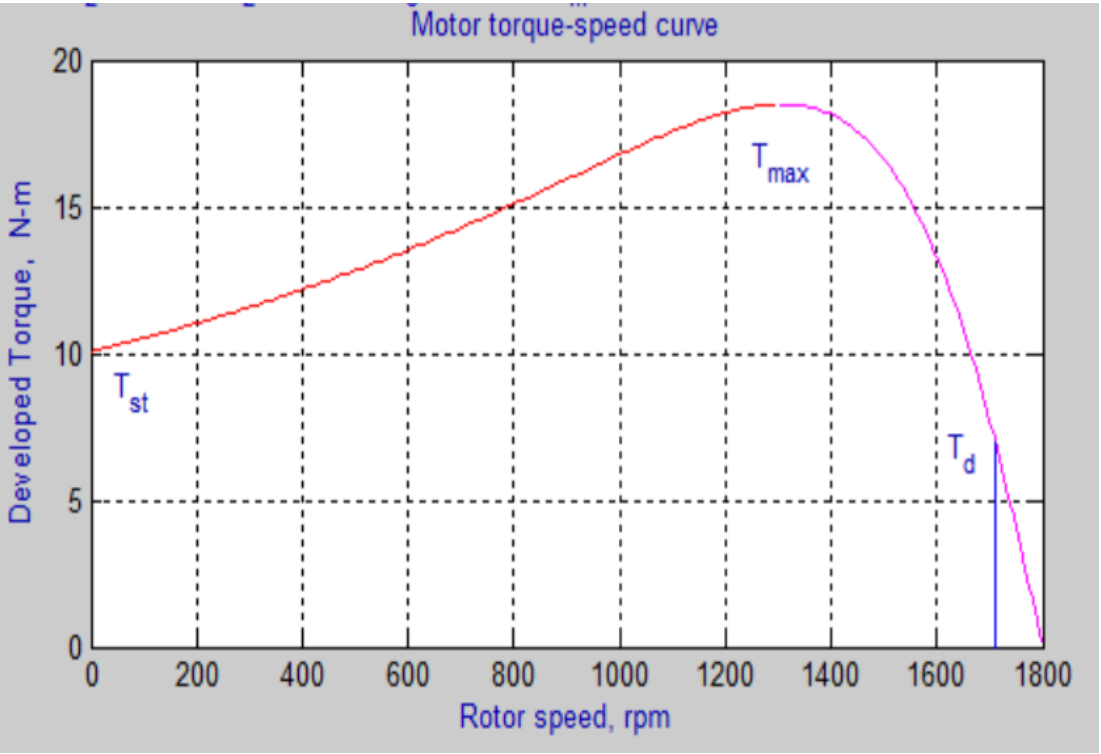
$$\mathrm{P}(s) \approx (1 - s) \cdot s \cdot \frac{V^2{}_T}{\omega_S R'_R}$$

VARIAÇÃO DO NUMERO DE POLOS

V=120, Npolos=2

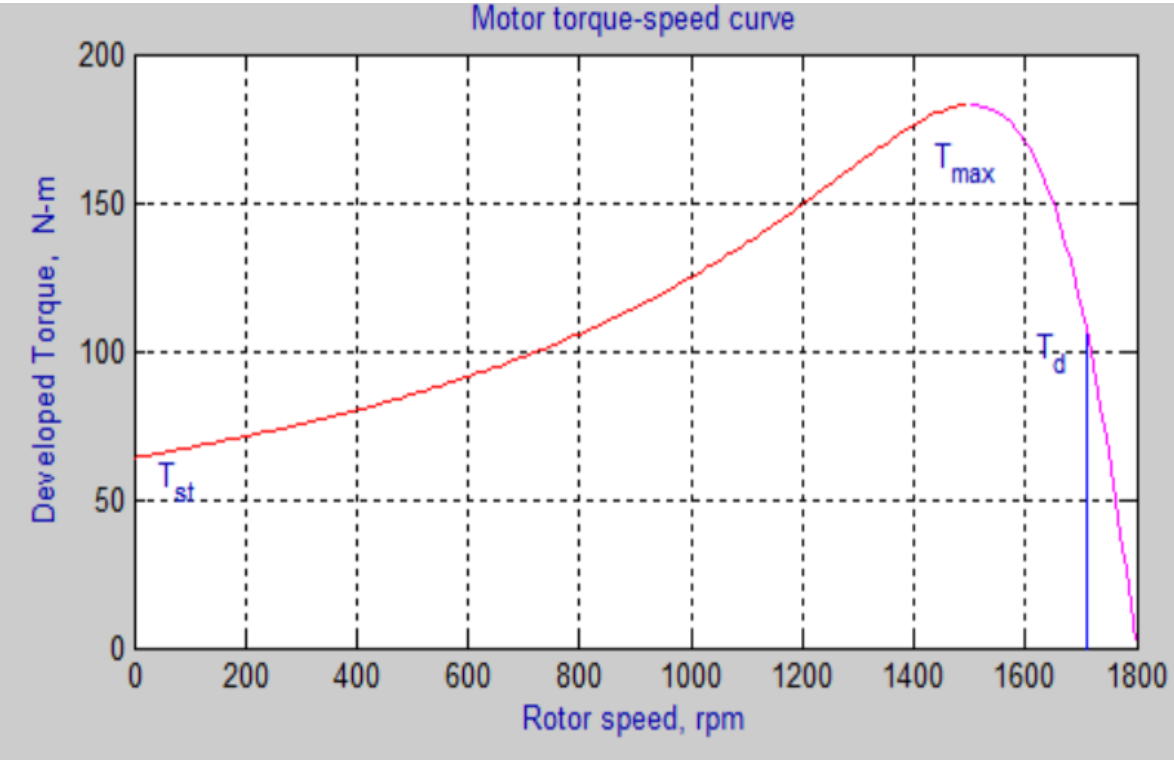


V=120, Npolos=4

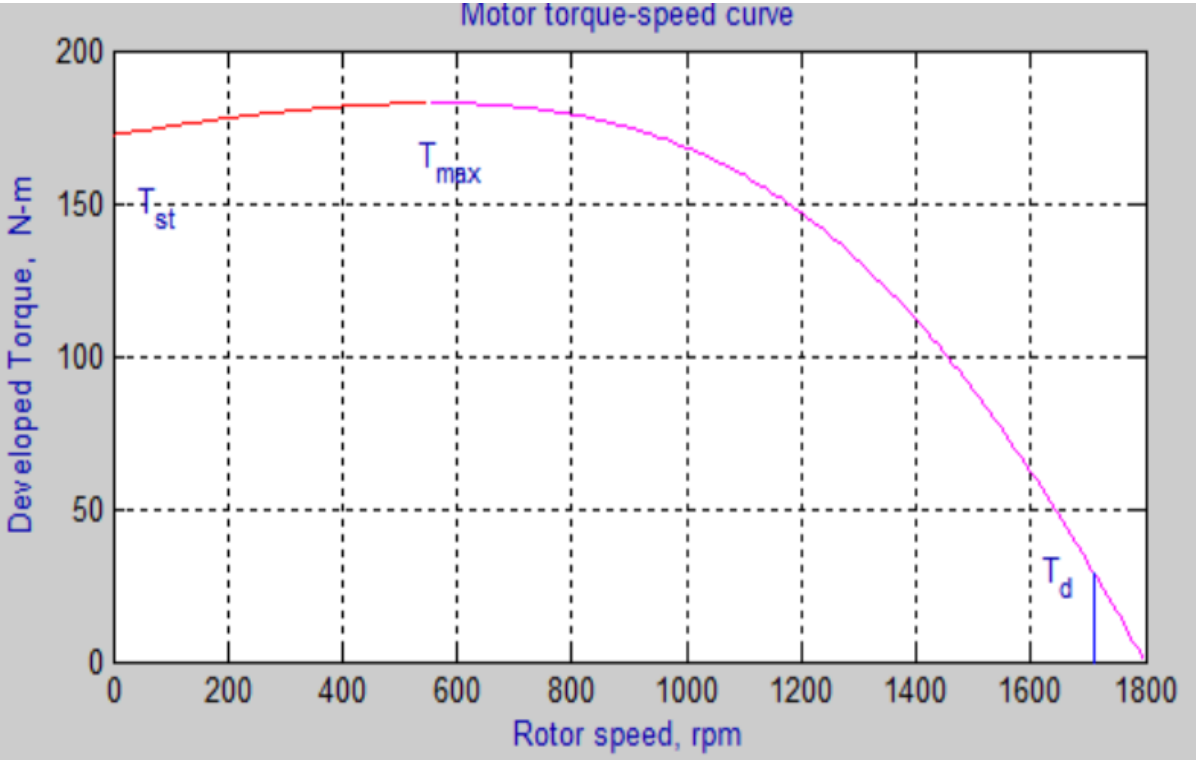


VARIAÇÃO DA RESISTENCIA DE ROTOR

V=380V; p=4; R'_R=0.3Ω

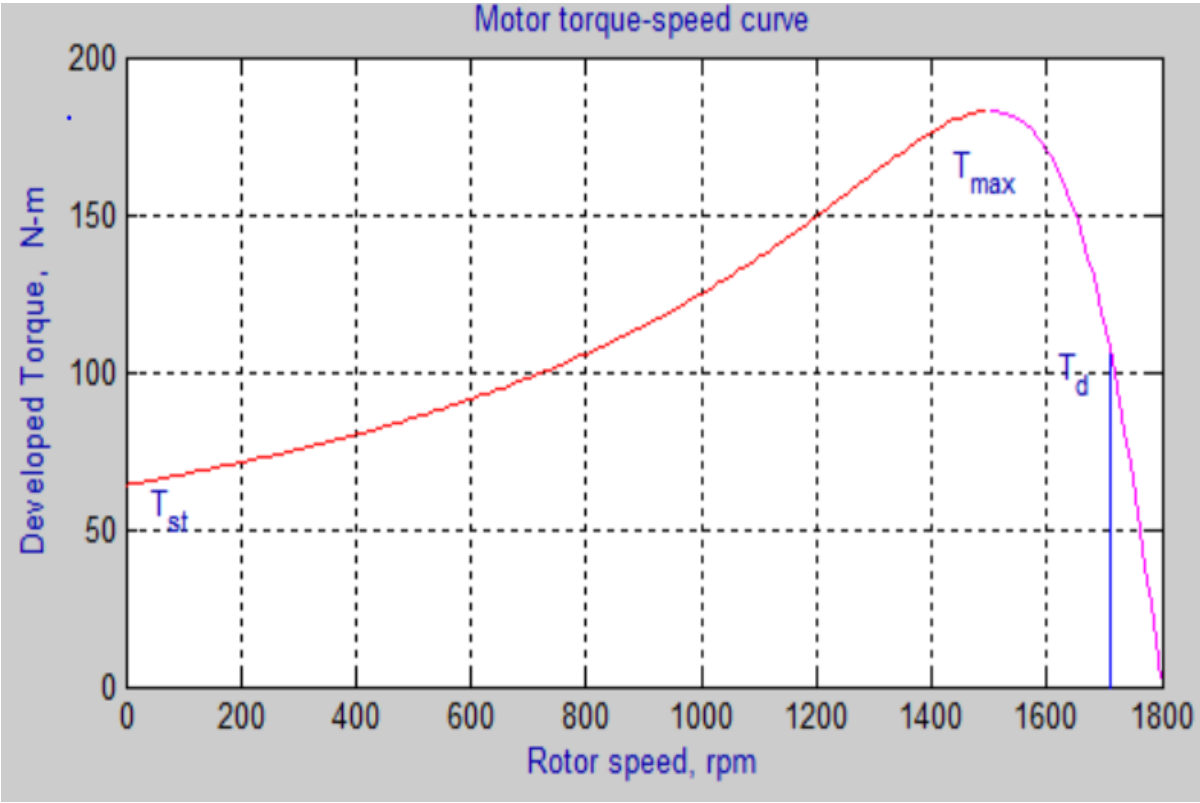


V=380V; p=4; R'_R=1.25Ω

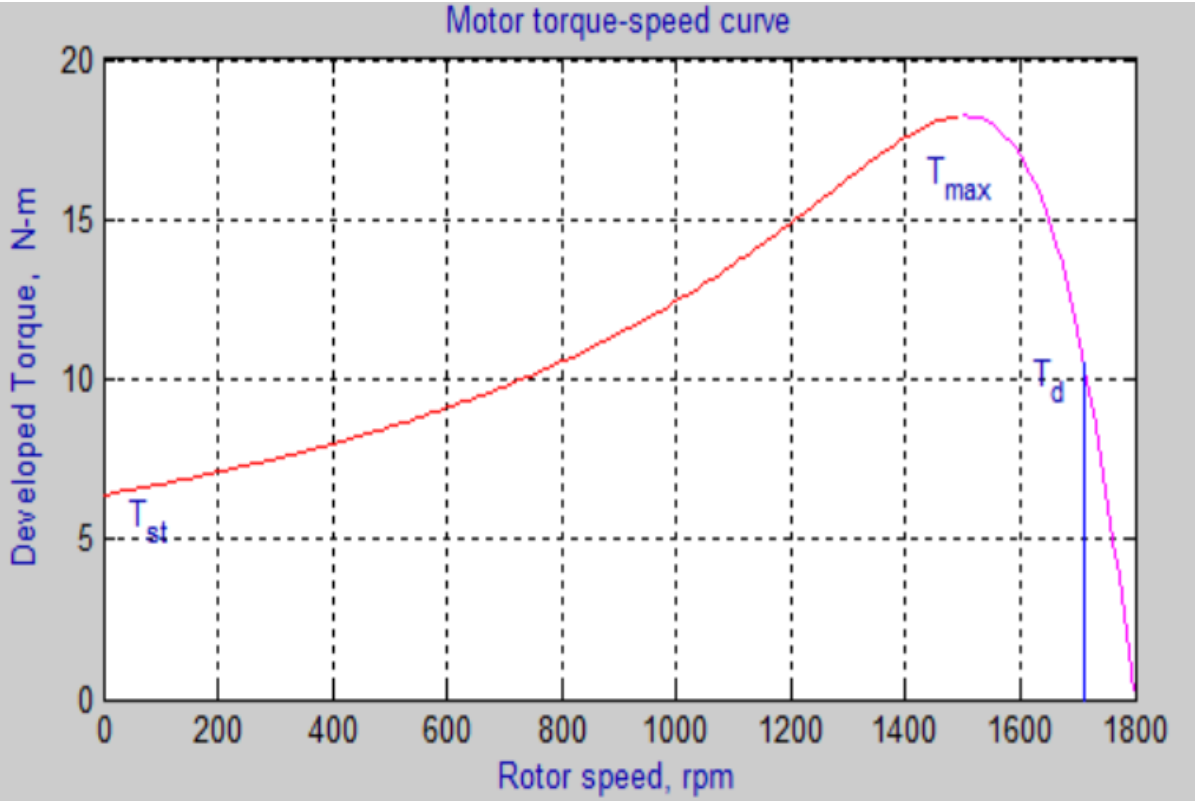


VARIAÇÃO TENSÃO

V=380 V



V=120 V



ANÁLISE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO (COGDELL, 1999)

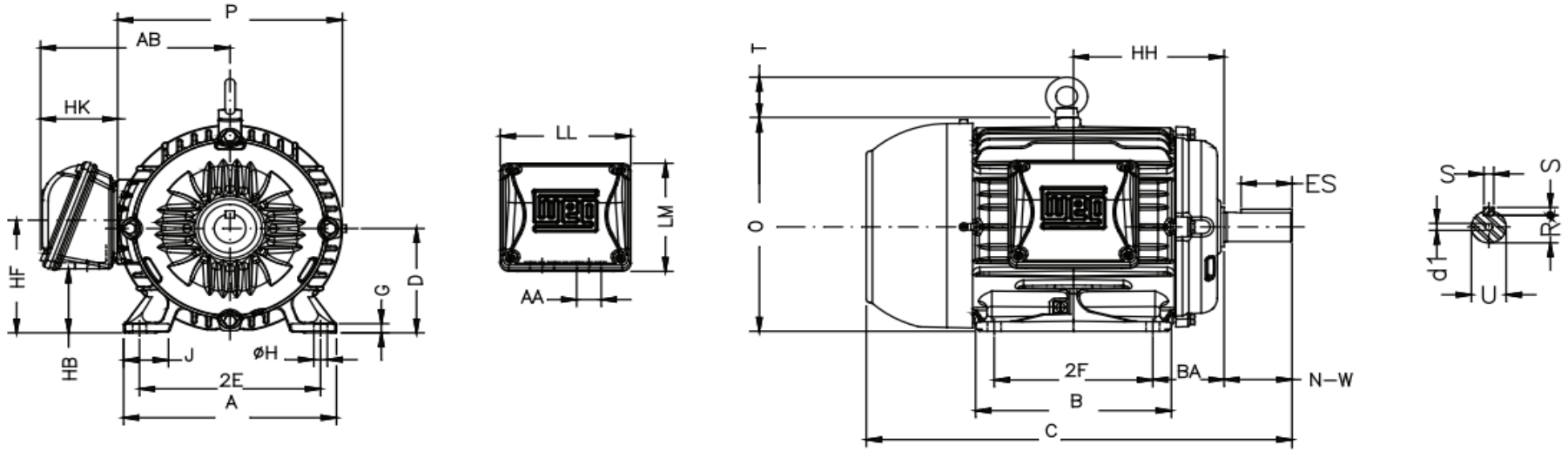
Informações do motor:

- Three-phase 60 Hz induction motor
- 50 hp
- 1765 rpm
- NEMA 326T frame
- 208-230/460 V
- 140-122/61 A
- Time Rating: continuous
- Insulation Class: F
- 1.15 service factor
- Max ambient temperature 40°
- NEMA code: G
- NEMA design: B
- NEMA nominal efficiency: 92.4%
- NEMA minimum efficiency: 91.0%

NEMA SIZE

NEMA Standard Dimensions

Frames 143T to 444/5T



NEMA SIZE

324TS	12.500	10.500	0.657	5.250	15.157	13.071	28.120	8.000	1.300	3.189	15.953	3.189	15.827	2.441	0.5
324T							29.620								
326TS		12.000				14.567	29.616								
326T							31.116								

PROBLEMA

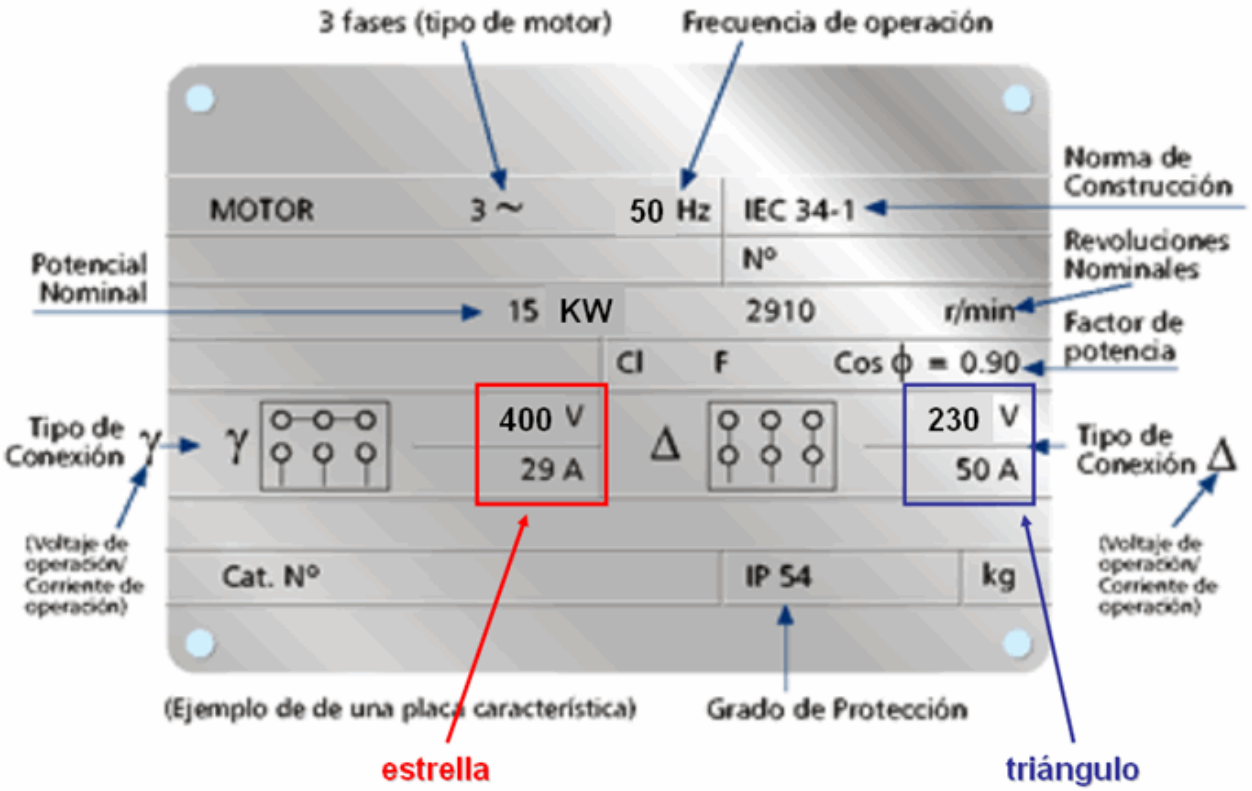
Considere um motor de indução trifásico, dois pólos, tensão fase-neutro de 230 V que a 60 HZ tem os seguintes parâmetros:

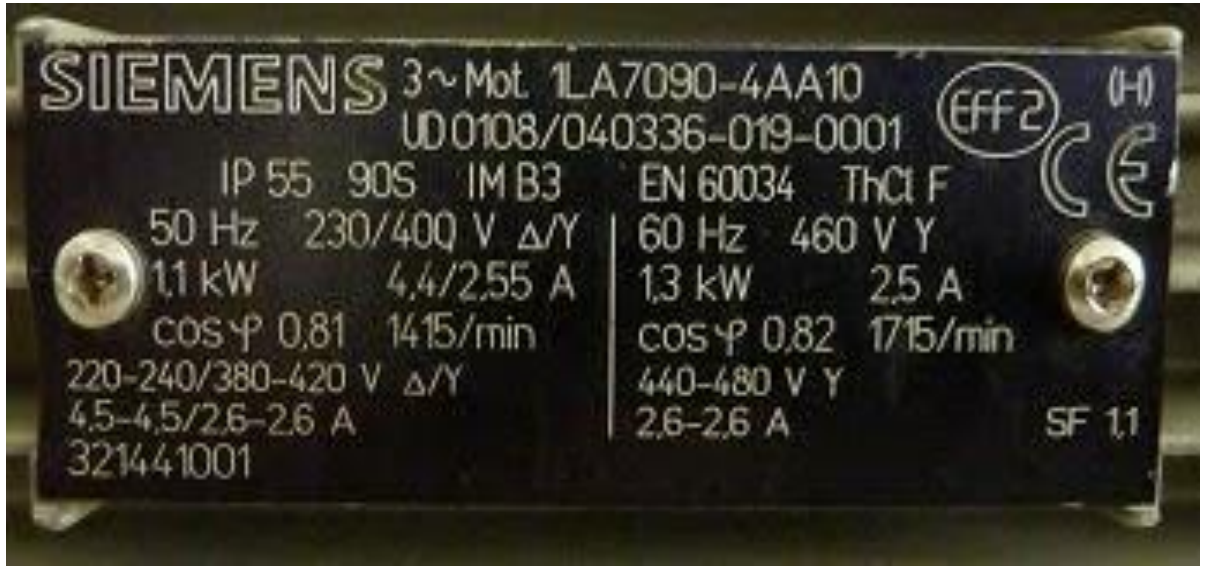
(Suponhamos que a as resistências são desprezíveis na frequência)

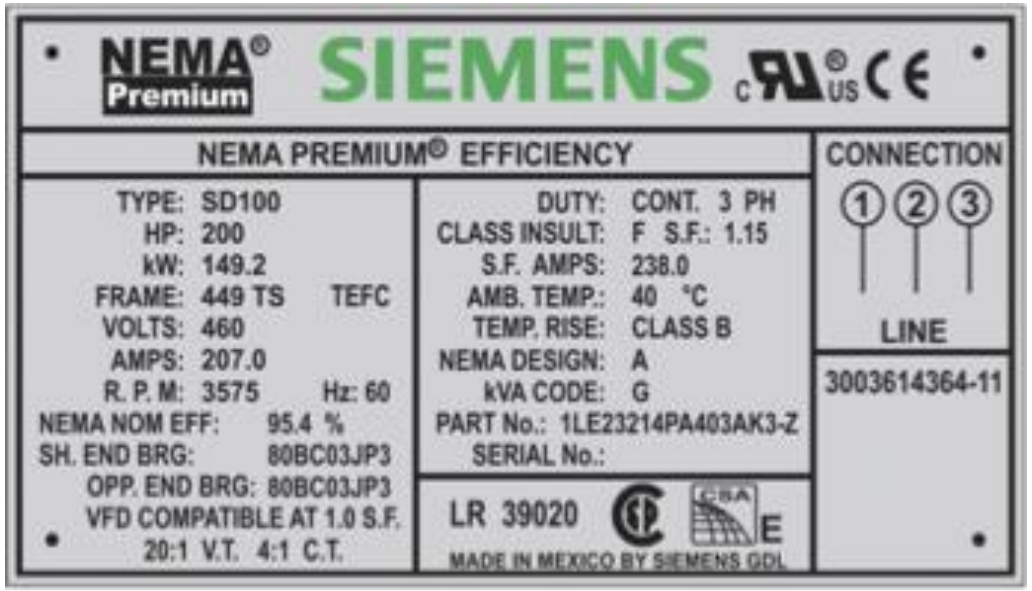
$X_S = 0.68\ ohm;\ X_a = 18.7\ ohm\ ; X'_R \quad = 0.68\ ohm; R'_R \quad = 0.5\ ohm;$

O motor está alimentado com frequência de 40Hz e aciona uma carga que requer um torque: $T_{mec} = 0.003 \cdot \omega_m^2$

Determinar o escorregamento e a tensão de alimentação fase-neutro.

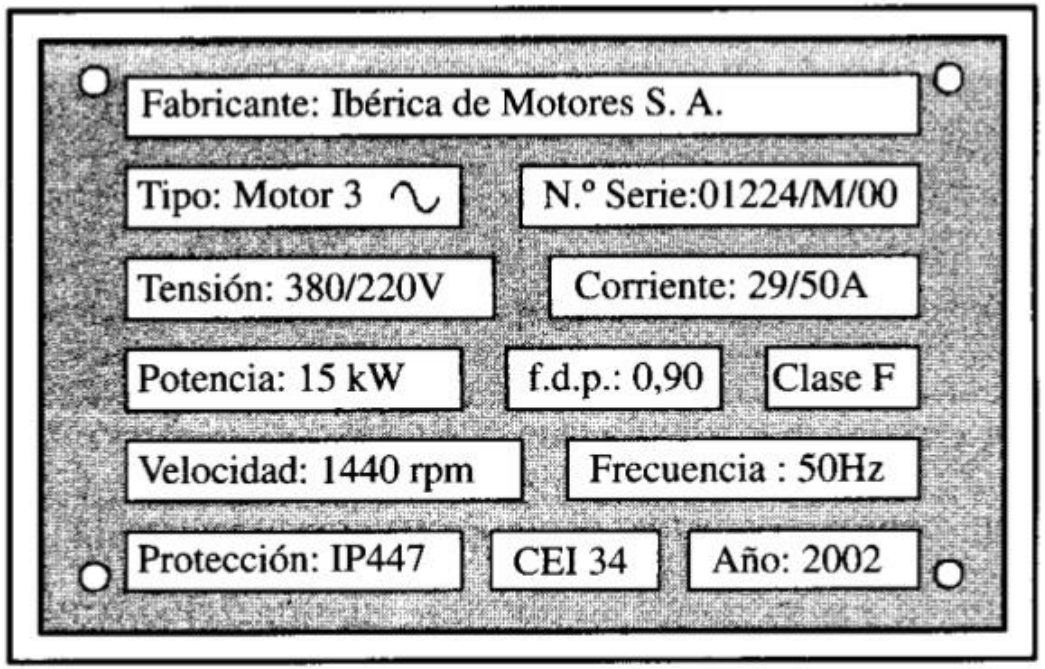

3 fases (tipo de motor)
Frecuencia de operación
Norma de Construcción
MOTOR
3 ~
50 Hz
IEC 34-1
Revoluciones Nominales
Nº
Potencial Nominal
15 KW
2910
r/min
Factor de potencia
Cl
F
Cos ϕ = 0.90
Tipo de Conexión γ
γ
400 V
29 A
Δ
230 V
50 A
Tipo de Conexión Δ
(Voltaje de operación/ Corriente de operación)
(Voltaje de operación/ Corriente de operación)
Cat. Nº
IP 54
kg
(Ejemplo de de una placa característica)
Grado de Protección
estrella
triángulo


SIEMENS 3~Mot. 1LA7090-4AA10
UD 0108/040336-019-0001
EFF2
IP 55 90S IM B3 EN 60034 ThCl F
50 Hz 230/400 V Δ/Y
1,1 kW 4,4/2,55 A
cos φ 0,81 1415/min
220-240/380-420 V Δ/Y
4,5-4,5/2,6-2,6 A
321441001
60 Hz 460 V Y
1,3 kW 2,5 A
cos φ 0,82 1715/min
440-480 V Y
2,6-2,6 A
SF 1,1


NEMA Premium
SIEMENS
NEMA PREMIUM© EFFICIENCY
TYPE: SD100
HP: 200
kW: 149.2
FRAME: 449 TS TEFC
VOLTS: 460
AMPS: 207.0
R. P. M: 3575 Hz: 60
NEMA NOM EFF: 95.4 %
SH. END BRG: 80BC03JP3
OPP. END BRG: 80BC03JP3
VFD COMPATIBLE AT 1.0 S.F.
20:1 V.T. 4:1 C.T.
DUTY: CONT. 3 PH
CLASS INSULT: F S.F.: 1.15
S.F. AMPS: 238.0
AMB. TEMP.: 40 °C
TEMP. RISE: CLASS B
NEMA DESIGN: A
kVA CODE: G
PART No.: 1LE23214PA403AK3-Z
SERIAL No.:
LR 39020
MADE IN MEXICO BY SIEMENS GDL
CONNECTION
1 2 3
LINE
3003614364-11

Máquinas Eléctricas
J. Fraile Mora

Placa de características eléctricas



IP

IP Indice de proteção

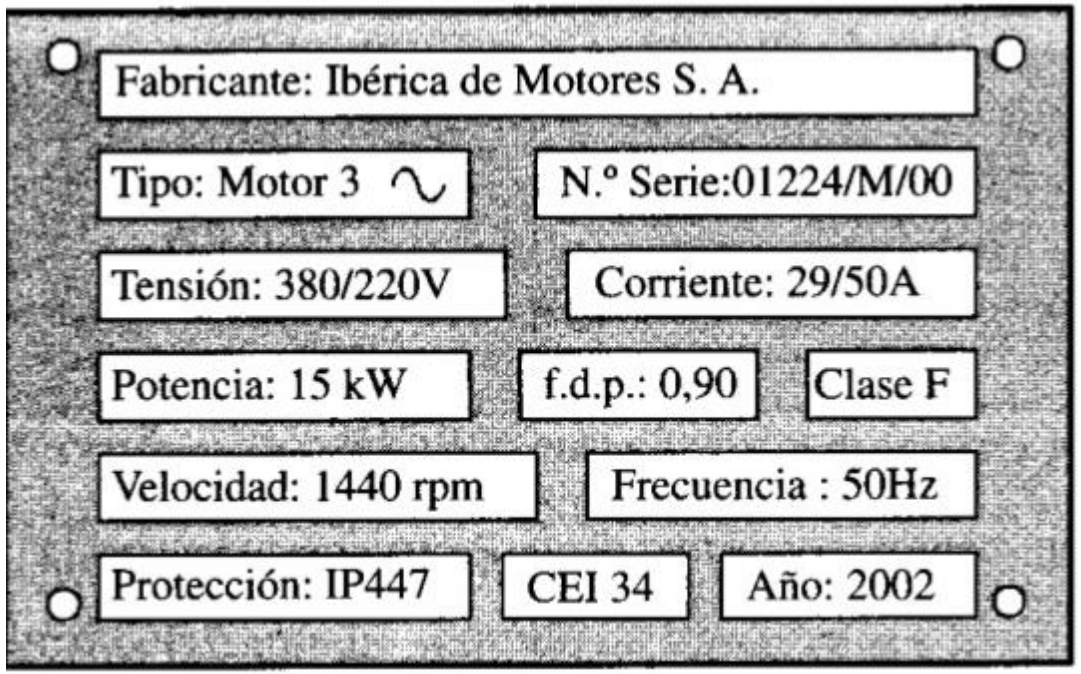
Norma CEI 34

(CEI 34-5:1991)

- Exteriores: IP55
- Motobomba em deposito de agua: IP68

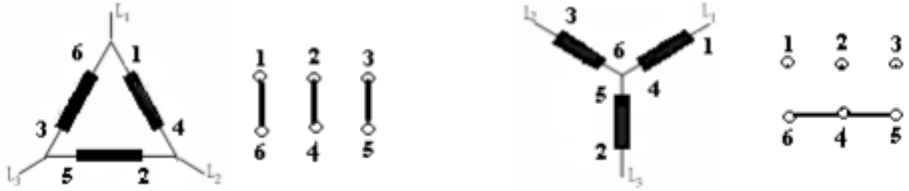
TABELA PARA GRAU DE PROTEÇÃO PARA EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS		
PRIMEIRO DÍGITO		
Dígito	Descrição	Proteção
0	Não protegido	Sem proteção especial
1	Protegido contra objetos sólidos maiores que 50 mm.	Grande superfície do corpo humano como a mão. Nenhuma proteção contra penetração liberal no equipamento.
2	Protegido contra objetos sólidos maiores que 12 mm.	Dedos ou objetos de comprimento maior do que 80 mm, cuja menor dimensão é maior do que 12 mm.
3	Protegido contra objetos sólidos maiores que 2,5 mm.	Ferramentas, fios, etc, de diâmetro e espessura maiores que 2,5 mm, cuja menor dimensão é maior que 2,5 mm.
4	Protegido contra objetos sólidos maiores que 1,0 mm.	Fios, fitas de largura maior do que 1,0 mm, objetos cuja menor dimensão seja maior que 1,0 mm.
5	Proteção relativa contra poeira e contato a partes internas ao invólucro.	Não totalmente vedado contra poeira, mas se penetrar não prejudicará o funcionamento do equipamento.
6	Totalmente protegido contra penetração de poeira e contato a partes internas ao invólucro.	Não é esperada nenhuma penetração de poeira no interior do invólucro.

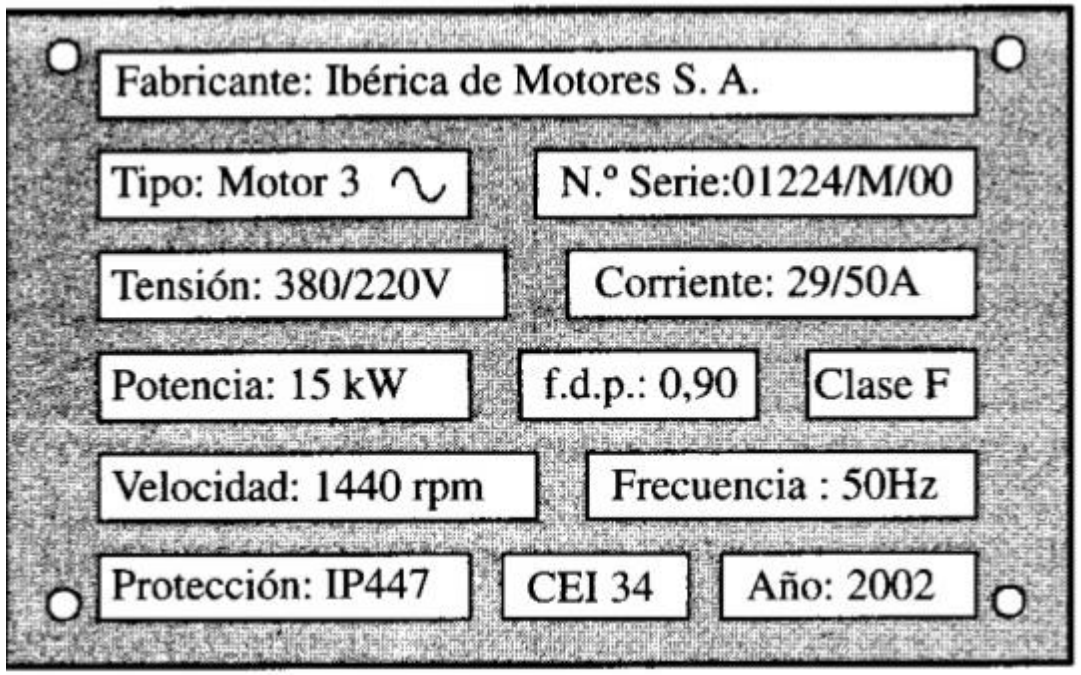
TABELA PARA GRAU DE PROTEÇÃO PARA EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS		
SEGUNDO DÍGITO		
Dígito	Descrição	Proteção
0	Não protegido.	Nenhuma proteção especial. Invólucro Aberto.
1	Protegido contra queda vertical de gotas de água.	Gotas de água caindo na vertical não prejudicam o equipamento, (condensação).
2	Protegido contra queda com inclinação de 15° com a vertical.	Gotas de água não tem efeito prejudicial para inclinações de até 15° com a vertical.
3	Protegido contra água aspergida.	Água aspergida de 60° com a vertical não tem efeitos prejudiciais ao equipamento.
4	Protegido contra projeções de água.	Água projetada de qualquer direção não tem efeito prejudicial.
5	Protegido contra jatos de água.	Água projetada por bico em qualquer direção não tem efeitos prejudiciais contra o equipamento.
6	Protegido contra ondas do mar.	Água em forma de onda, ou jatos potentes não tem efeitos prejudiciais ao equipamento.
7	Protegido contra efeitos de imersão.	Sob certas condições de tempo e pressão não há penetração de água. Ex.: Inundações.
8	Protegido contra submersão.	Adequado à submersão contínua e sob condições específicas. Ex.: Equipamento Submerso



3~ Trifasico corrente alterna

Tensão: 380/220 V. Tensões de linha para conectar o motor. Deve ser conectado em triangulo em redes de 220 V e em estrela para redes de 380V





Potencia: 15KW: pode desenvolver essa potência por um tempo prolongado sem superar os limites de aquecimento dos isolamentos.

Poderíamos superar essa potência por tempos curtos (aquecimento)

A essa potência as corrente será de:

29A (tensão de 380)

50ª (tensão de 220V)

F.D.P.

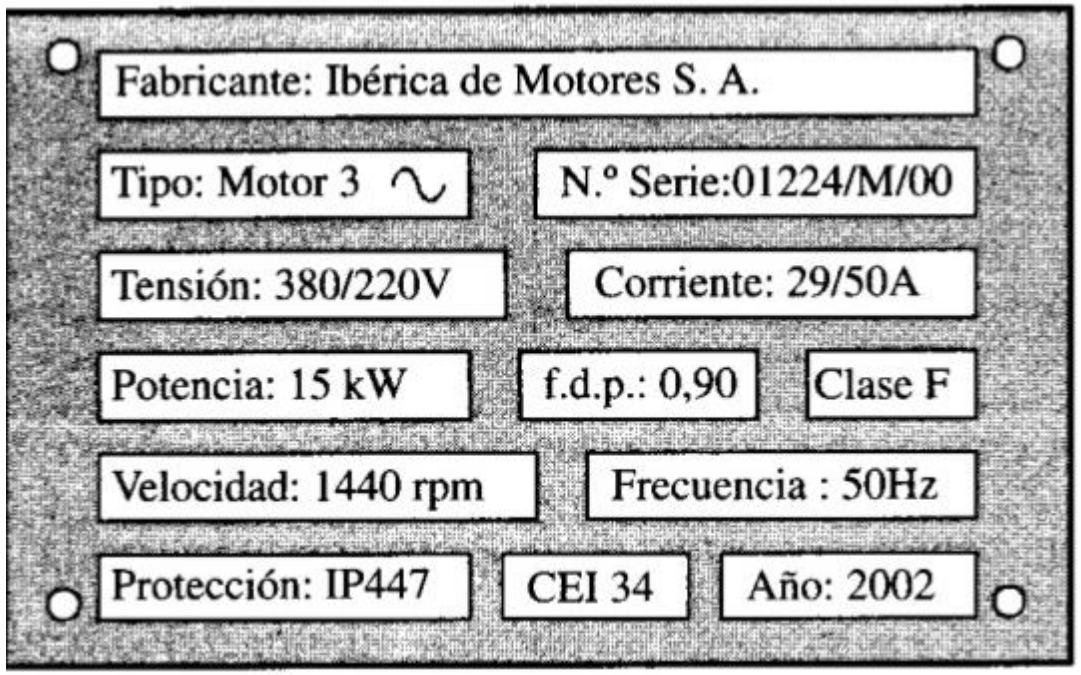
Fator de Potência (a carga plena)

Então a potência elétrica absorvida será:

$$Pa = \sqrt{3}\, U\, I\, cos\varphi \;\; = \sqrt{3}\, 400\; 29\; 0.9 \;\; \approx 18083\; W$$

O rendimento do motor será:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_a} = \frac{15000}{18083} \approx 83\%$$



Frequência é de 50 Hz

(aqui seria conectado a 60 Hz)

Velocidade de giro (a carga plena)

1440 rpm

Qual será o número de pólos do motor?

Qual será a velocidade de giro aqui (de maneira aproximada)?

Que quer dizer Clase F?

VELOCIDADE DE GIRO

Lembrando:

Velocidade de sincronismo: $n_s = f\ 60\ \frac{2}{np}$

Então se consideramos que os motores assíncronos de indução trabalham um pouco por debaixo da velocidade de sincronismo podemos comprovar que a velocidade de sincronismo fica próxima a 1440 rpm para 4 pólos:

$$n_s = 50\ 60\ \frac{2}{4} = 1500\ rpm$$

(Nota: aqui $n_s = 60\ 60\ \frac{2}{4} = 1800\ rpm$)

ESCORREGAMENTO E TORQUE

Escorregamento a carga plena:

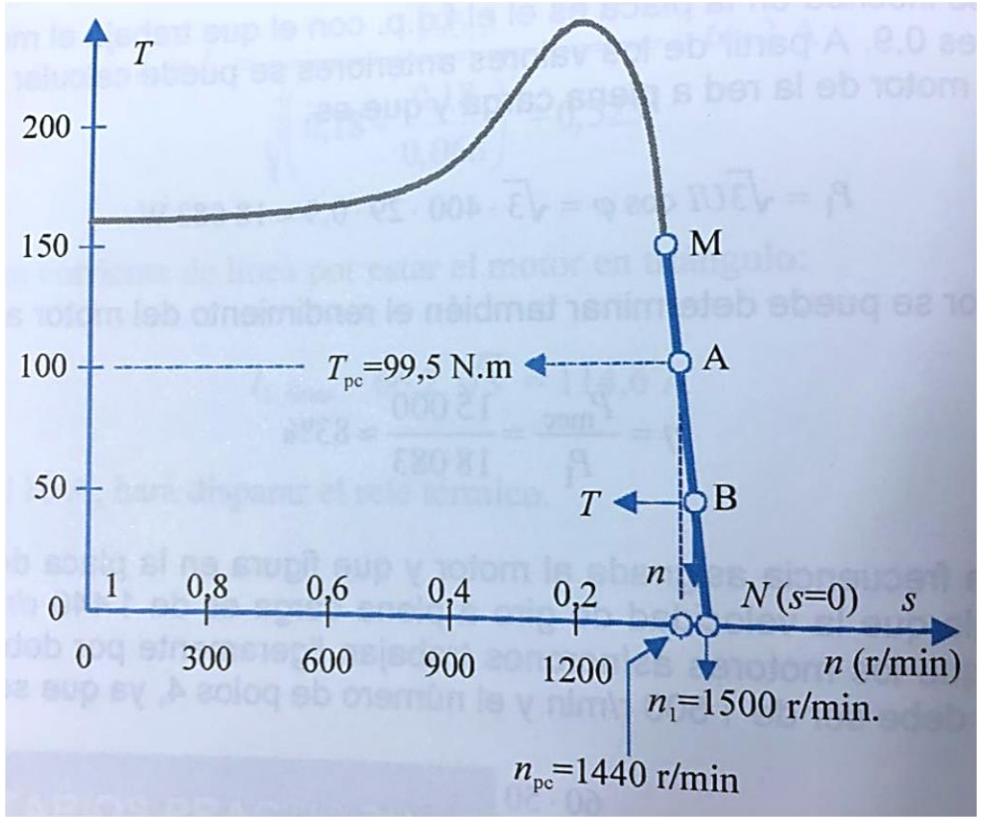
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500-1440}{1500} = 4\%$$

Poderíamos estimar a velocidade de giro a carga plena no Brasil supondo que o escorregamento é do 4% (1728 rpm)

O Torque

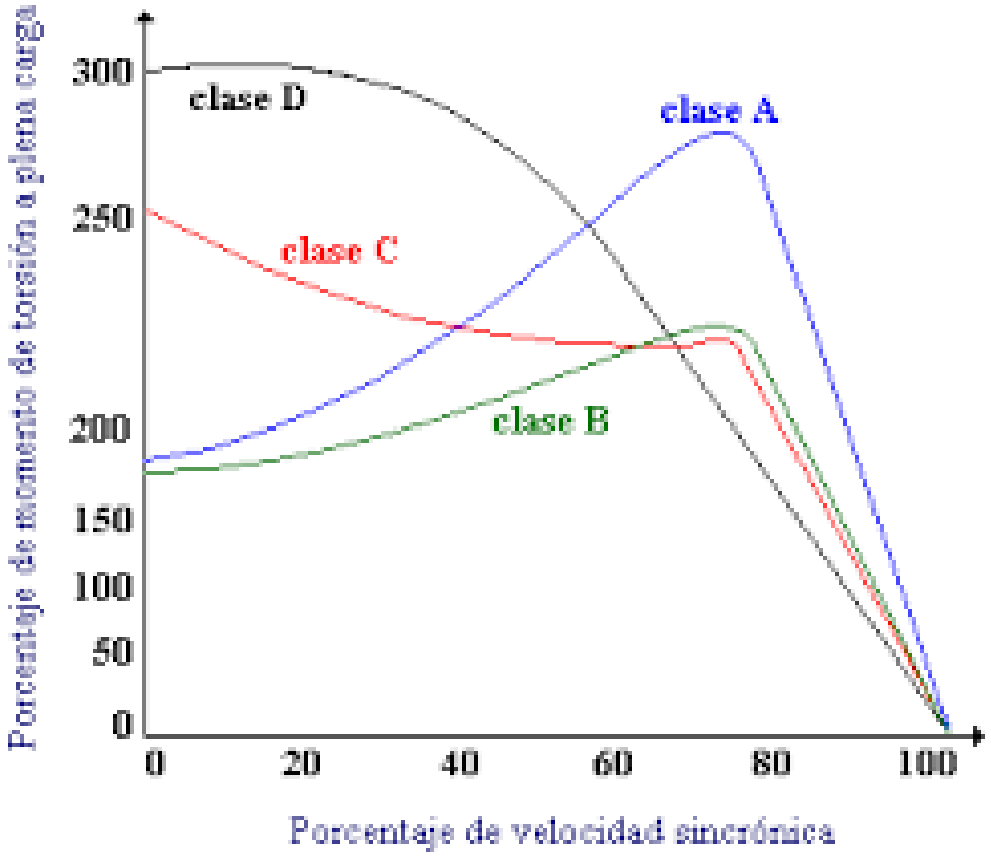
$$T_N = \frac{P_{mec}}{\Omega} = \frac{15000}{2\pi\frac{1440}{60}} \approx 99.5\ Nm$$

APROXIMAÇÃO LINEAR (LOUSA).



Máquinas Eléctricas
J. Fraile Mora

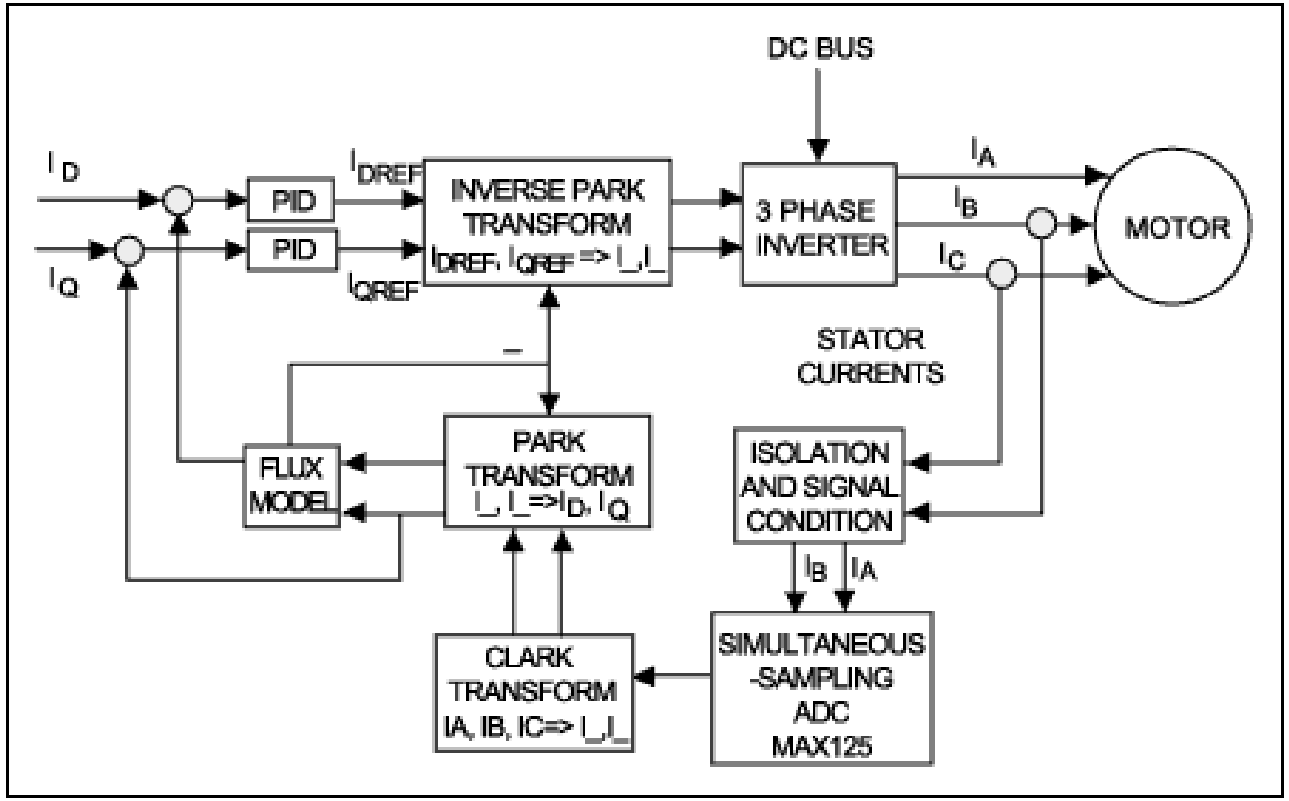
CLASES NEMA MOTORES DE INDUÇÃO



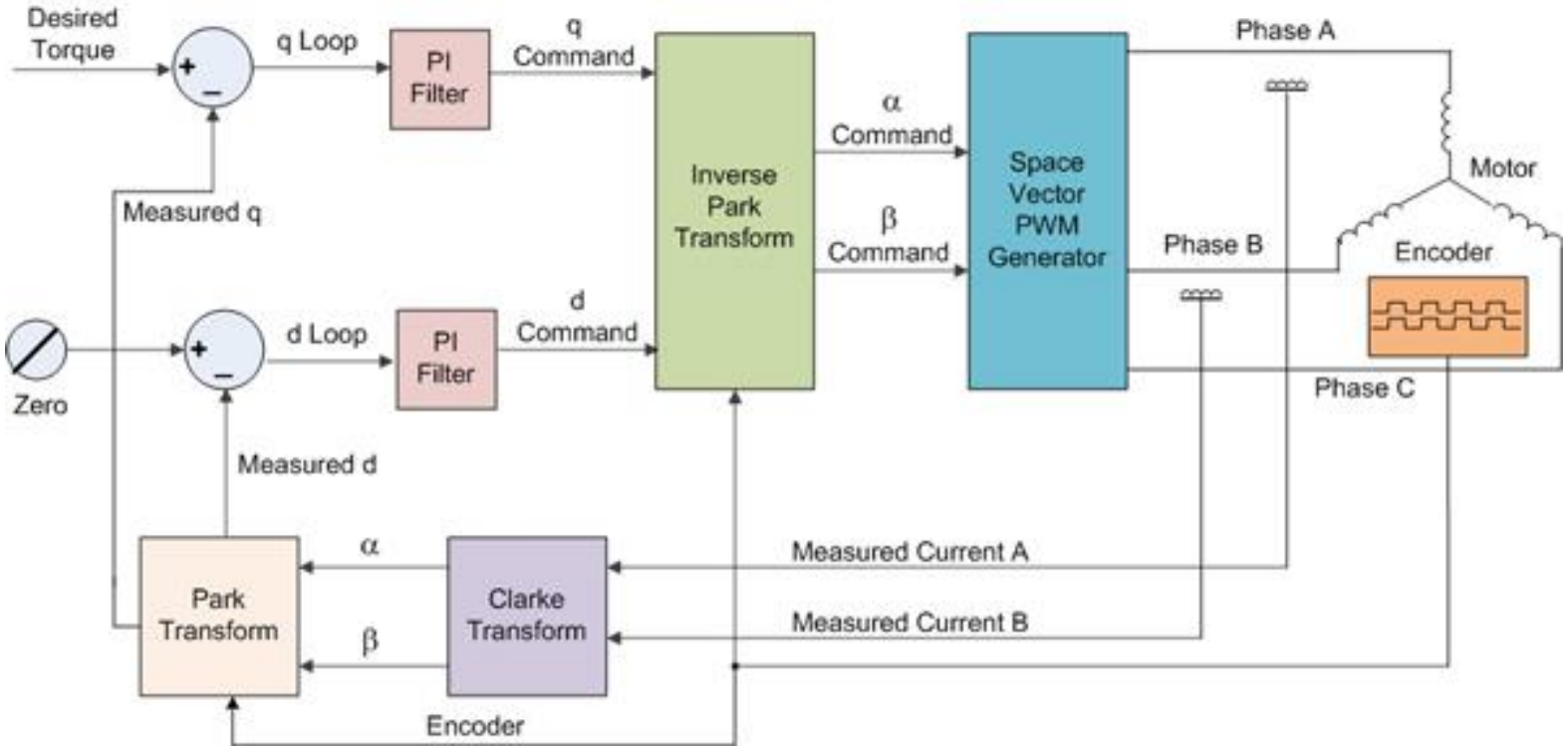
CLASSE NEMA

Clase NEMA	Par de arranque (# de veces el nominal)	Corriente de Arranque	Regulación de Velocidad (%)	Nombre de clase Del motor
A	1.5-1.75	5-7	2-4	Normal
B	1.4-1.6	4.5-5	3.5	De propósito general
C	2-2.5	3.5-5	4-5	De doble jaula alto par
D	2.5-3.0	3-8	5-8 , 8-13	De alto par alta resistencia
F	1.25	2-4	mayor de 5	De doble jaula, bajo par y baja corriente de arranque.

CONTROLE VETORIAL DE MOTORES DE INDUÇÃO



Maxim Integrated


Desired Torque
q Loop
PI Filter
q Command
Inverse Park Transform
α Command
β Command
Space Vector PWM Generator
Phase A
Motor
Phase B
Encoder
Phase C
Measured q
Zero
d Loop
PI Filter
d Command
Measured d
Park Transform
α
β
Clarke Transform
Measured Current A
Measured Current B
Encoder