

PROJETO MECÂNICO (SEM 0347)

Notas de Aulas v.2020

Aula 08 – Motores Elétricos

Professor: Carlos Alberto Fortulan
Colaborador: Marcos Paulo Gonçalves Pedroso

Introdução

Tipos de motores

Motores Elétricos;
Motores a Combustão;
Motores Hidráulicos;
Motores Pneumáticos

Sites:

www.faulhaber.com/

www.maxonmotor.com

www.bosch.com.br

www.kalatec.com.br

www.weg.com.br

www.ampflow.com/ampflow_motors.htm

www.pololu.com/category/87/stepper-motors

O que é um Motor Elétrico?

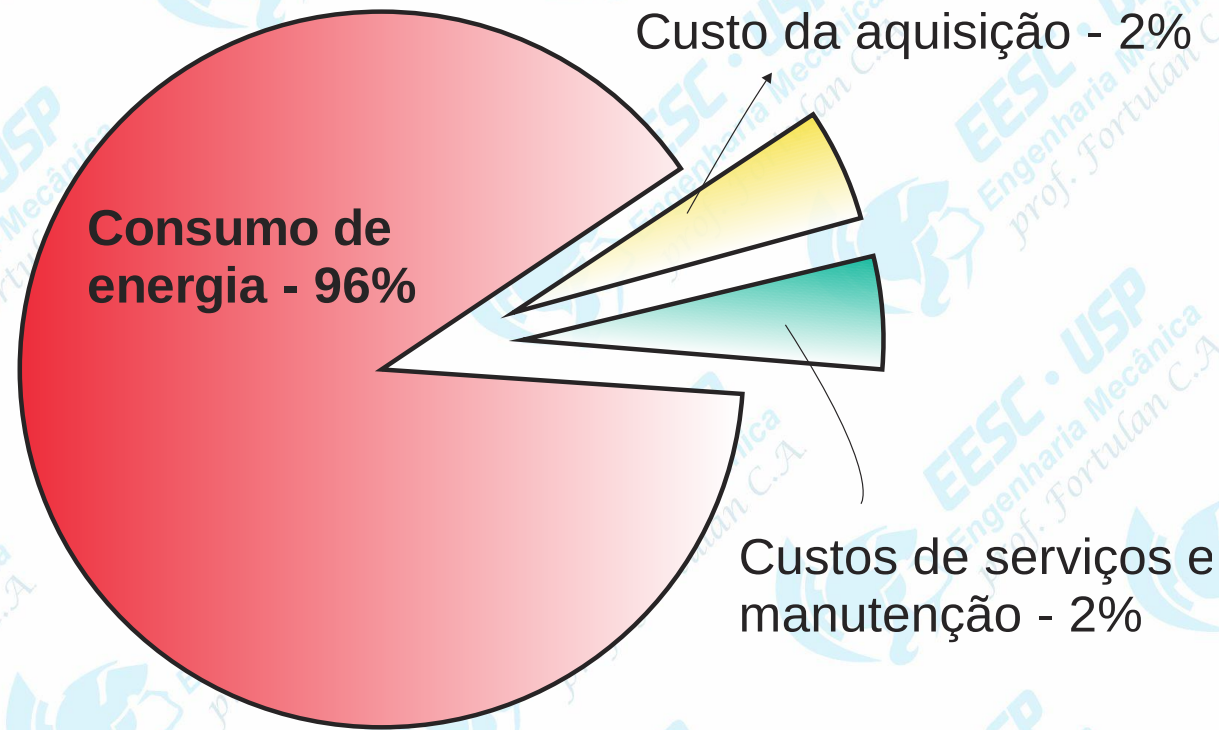
Componente eletromecânico que converte energia elétrica em energia mecânica;

Aplicado em:

- Rotação de bombas, ventiladores, sopradores;
- compressores;
- elevação;
- **movimentação;**

Motores na Indústria: 70% do consumo elétrico.

Dimensionamento de motores



Custo do ciclo de vida de um motor elétrico

Wilfried Voss. A comprehensible guide to servo motor sizing. Copperhill Technologies Corporation. 2007.

- ✓ O dimensionamento convencional de um motor é baseado no sistema de carregamento, ou seja do torque requerido e das forças de atrito.
- ✓ É um processo que demanda um tempo excessivo e que deve considerar o torque necessário para acelerar o próprio rotor.
- ✓ O dimensionamento incorreto leva ao superaquecimento, gasto de energia e vibrações.
- ✓ Devido as incertezas (incertezas das cargas, aumento da carga devido ao envelhecimento dos componentes (atrito), disponibilidade) é comum um superdimensionamento e, é absolutamente aceitável até **20%** de superdimensionamento.

Etapas do dimensionamento de motores

Objetivos da movimentação;

- ✓ Movimento linear na horizontal?
- ✓ Movimento linear na vertical?
- ✓ Movimento rotativo?

- ✓ Definição do sistema;
- ✓ Seleção dos componentes mecânicos;
- ✓ Seleção do motor;
- ✓ Cálculo da carga.

Definição do Sistema:

Configuração dos componentes.

Cinemática: perfil de velocidade,
velocidade máxima da carga,
rotação máxima do motor,
aceleração da carga,
aceleração do motor.

Dinâmica: massa, inércia, força, torque.

Crítérios: rotação, razão de inércia, torque, Torque RMS

Cinemática

- ✓ Regime de serviço (contínuo, intermitente, variável....)?
- ✓ Tipo de carregamento? → capacidade de sobrecarga

Carregamento	Descrição	Exemplos
Torque constante	Potência de saída variável	Transportadores, fornos rotativos, bombas de deslocamento constante
Torque variável	Torque varia com o quadrado da velocidade de operação	Bombas centrífugas, ventiladores
Potência constante	Torque varia inversamente com a velocidade	Máquinas ferramentas

- ✓ Precisão de posicionamento?
- ✓ Faixa de variação? → desempenho dinâmico – rapidez?
- ✓ Controle (posição, rotação, torque)? → Precisão

Componentes mecânicos

- ✓ Acoplamento direto;
- ✓ Redutores (fixo ou variáveis);
- ✓ Fusos;
- ✓ Acoplamentos;
- ✓ Polias x correias.

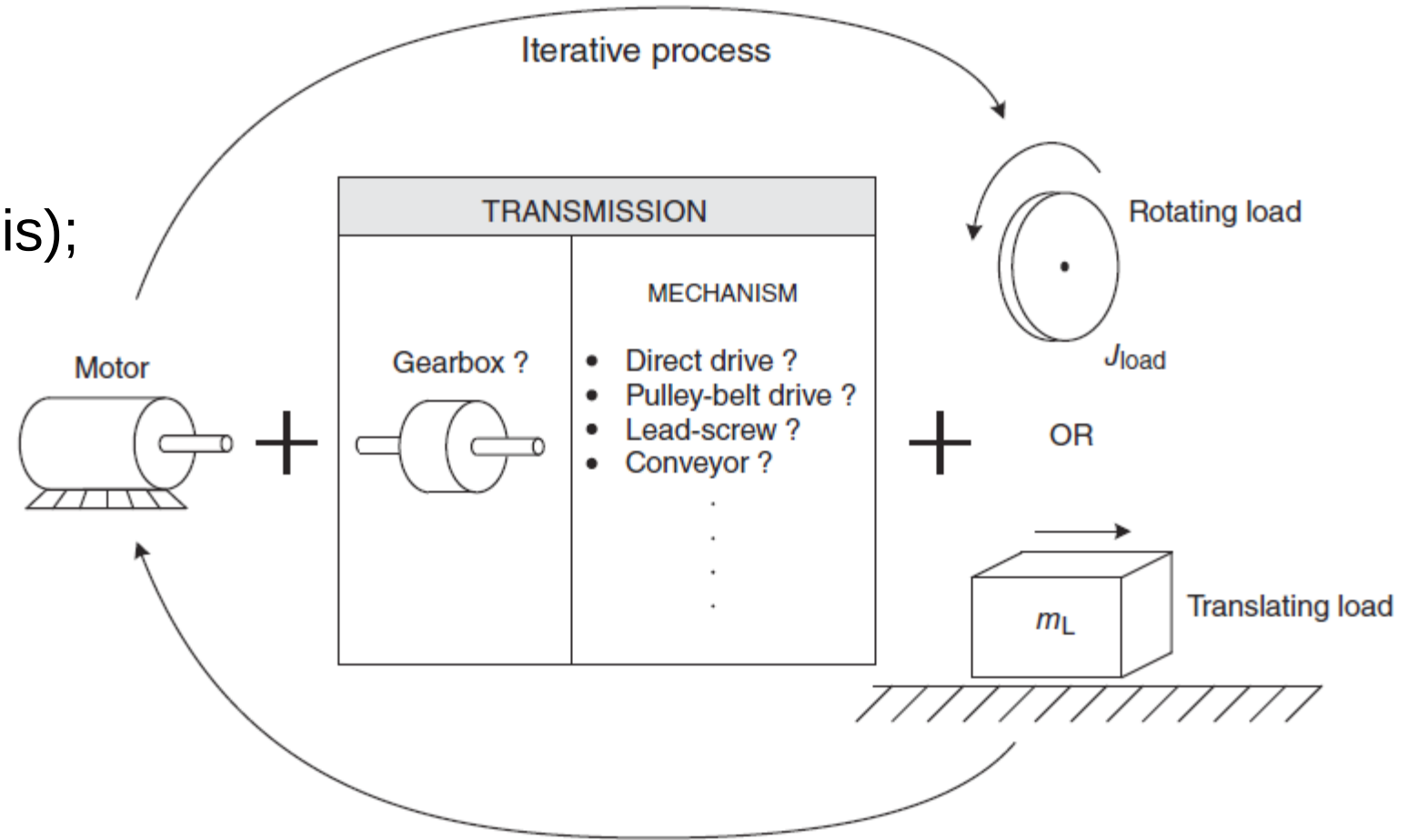
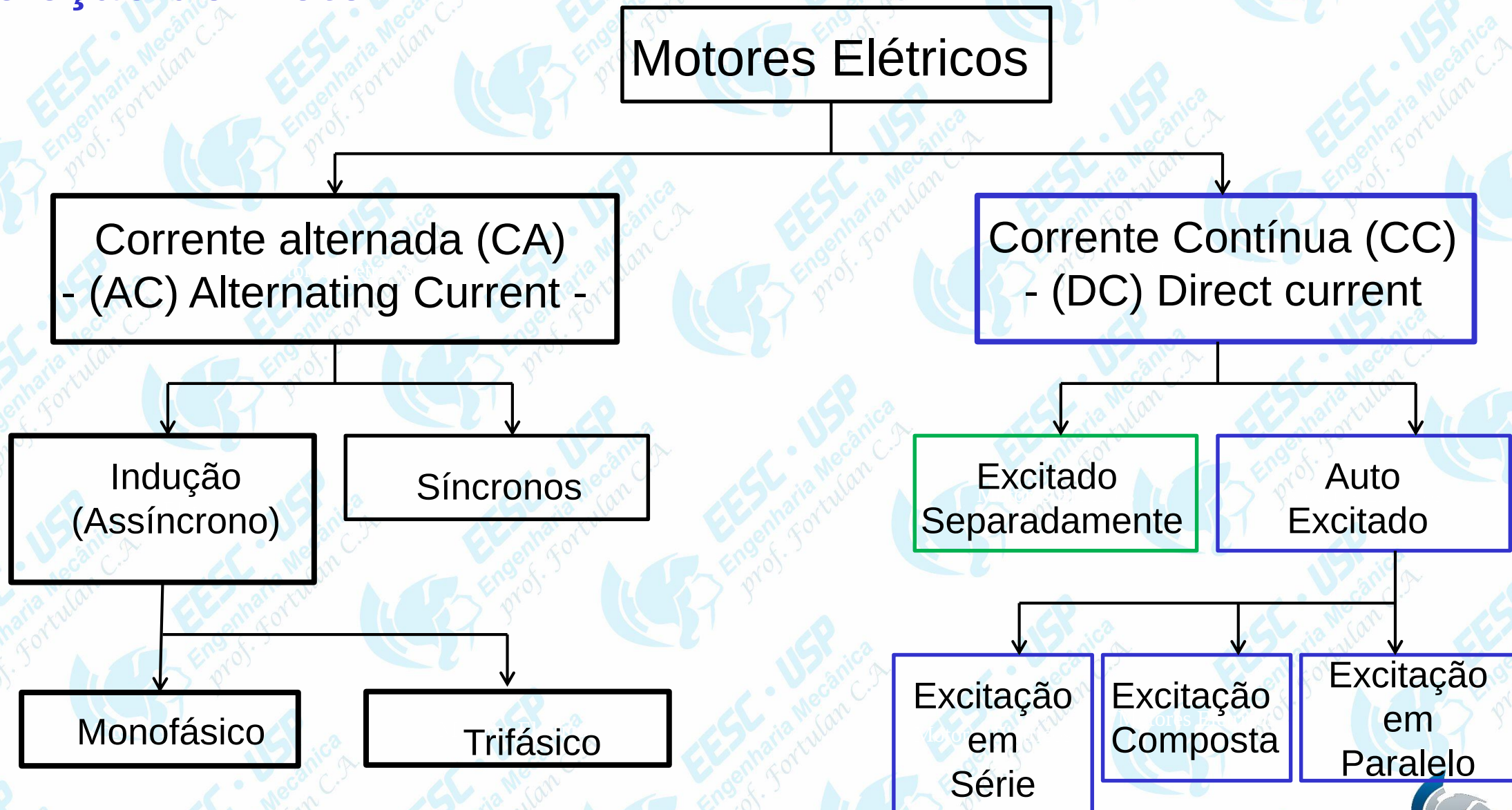
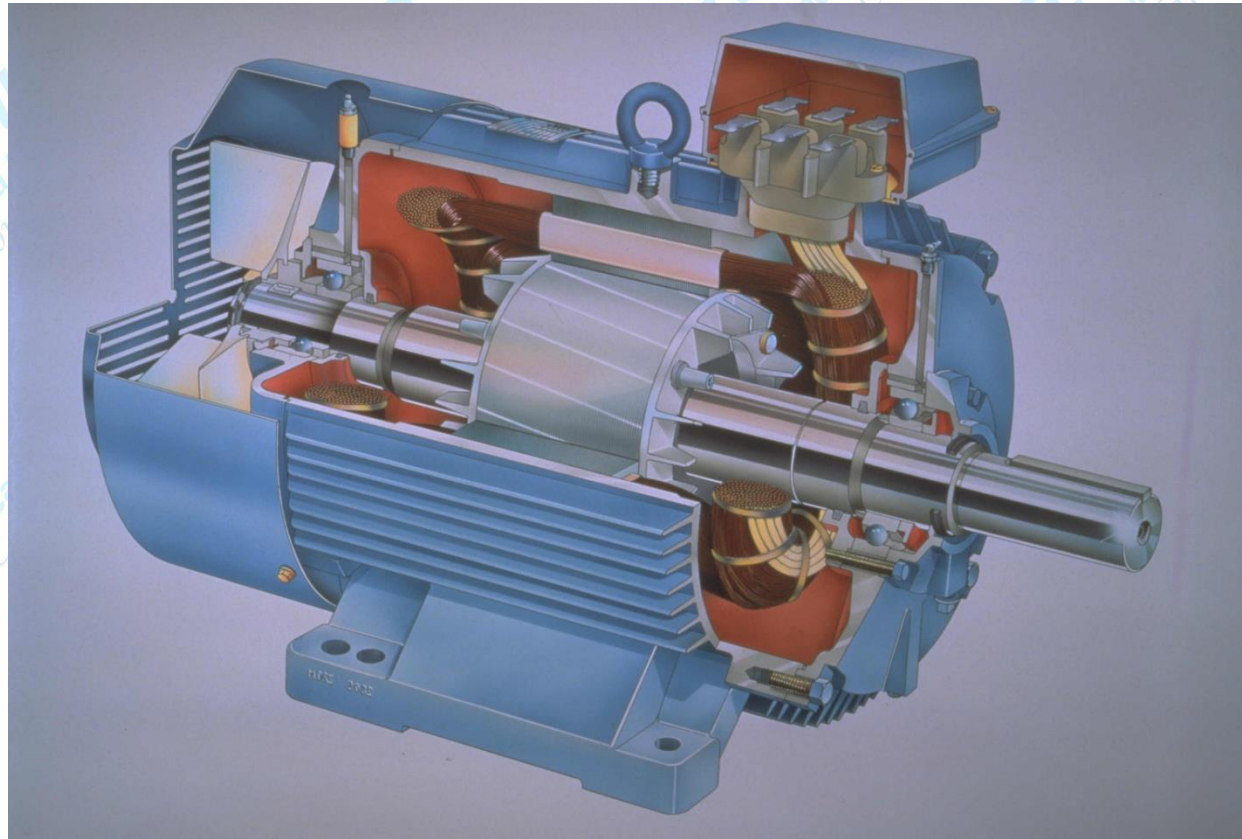


Figure 3.1 Iterative drive-train design process

Seleção do Motor



Motor de Corrente Alternada - Assíncronos



Vantagens

- relativamente simples;
- construção robusta;
- de fácil montagem e manutenção;
- tem custo de manutenção desprezível, apenas os mancais;
- suporta altas sobrecargas.

Desvantagens

- A intensidade da corrente de partida, necessária à plena tensão, provoca uma indesejável queda de tensão no sistema.

Função

Uma energia mecânica é aplicada sob a forma de movimento rotativo, a potência desenvolvida depende do torque e da velocidade de rotação n .

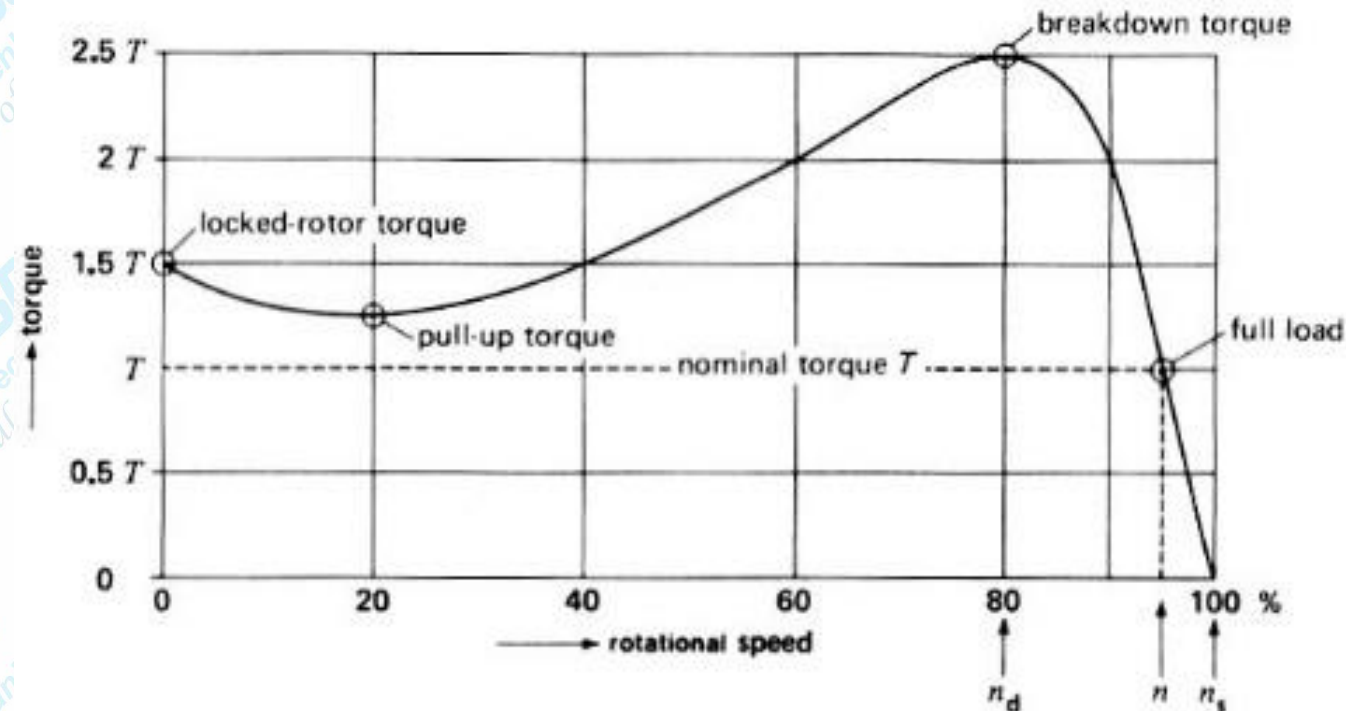
$$\begin{array}{l} P \text{ (cv)} = \frac{C \text{ (kgfm)} \cdot n \text{ (rpm)}}{716} = \frac{C \text{ (Nm)} \cdot n \text{ (rpm)}}{7024} \\ P \text{ (kW)} = \frac{C \text{ (kgfm)} \cdot n \text{ (rpm)}}{974} = \frac{C \text{ (Nm)} \cdot n \text{ (rpm)}}{9555} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} C \text{ (kgfm)} = \frac{716 \cdot P \text{ (cv)}}{n \text{ (rpm)}} = \frac{974 \cdot P \text{ (kW)}}{n \text{ (rpm)}} \\ C \text{ (Nm)} = \frac{7024 \cdot P \text{ (cv)}}{n \text{ (rpm)}} = \frac{9555 \cdot P \text{ (kW)}}{n \text{ (rpm)}} \end{array}$$

WEG, *Especificação de motores elétricos*, Cód: 50032749, rev13 (2014) 67p.

Operação

O motor, a cada aceleração, segue uma curva característica de torque até seu ponto operacional estável, onde se cruzam as curvas características da carga e do motor, e neste ponto, o momento de carga deve ser inferior ao torque de partida ou ao torque mínimo.



Conjugado (Torque)

O motor de indução tem conjugado igual a zero na velocidade síncrona. À medida que a carga aumenta, a rotação do motor cai gradativamente, até um ponto em que o conjugado atinge o valor máximo que o motor é capaz de desenvolver em rotação normal. Se o conjugado da carga aumentar mais, a rotação do motor cai bruscamente, podendo chegar a travar o rotor.

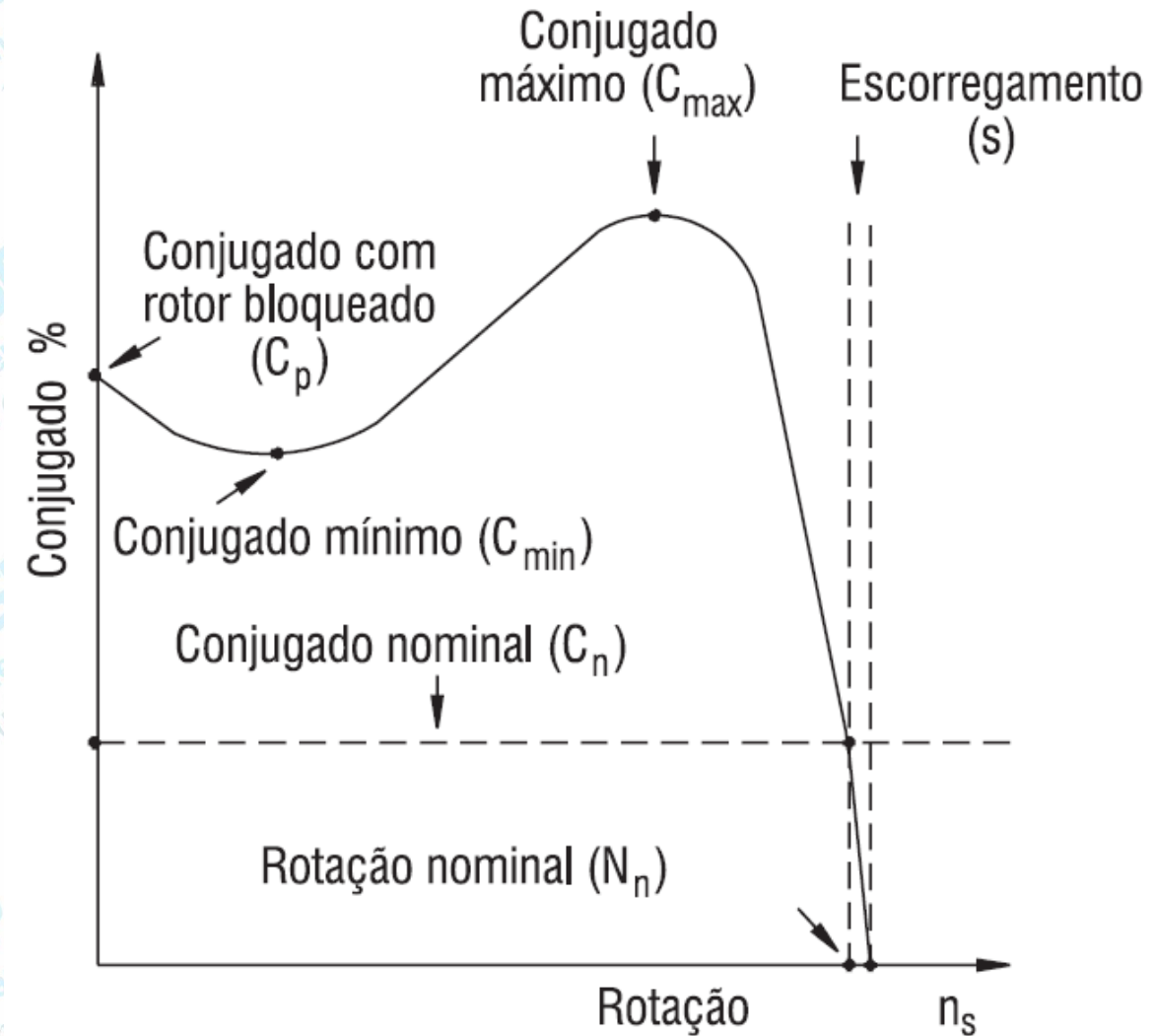


Figura 4.1 - Curva conjugado x rotação

Velocidade Síncrona (n_s) é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de polos ($2p$) do motor e da frequência (f) da rede, em Hertz.

Polos:

$$n_s = 2 \cdot \frac{f \cdot 60}{p}$$

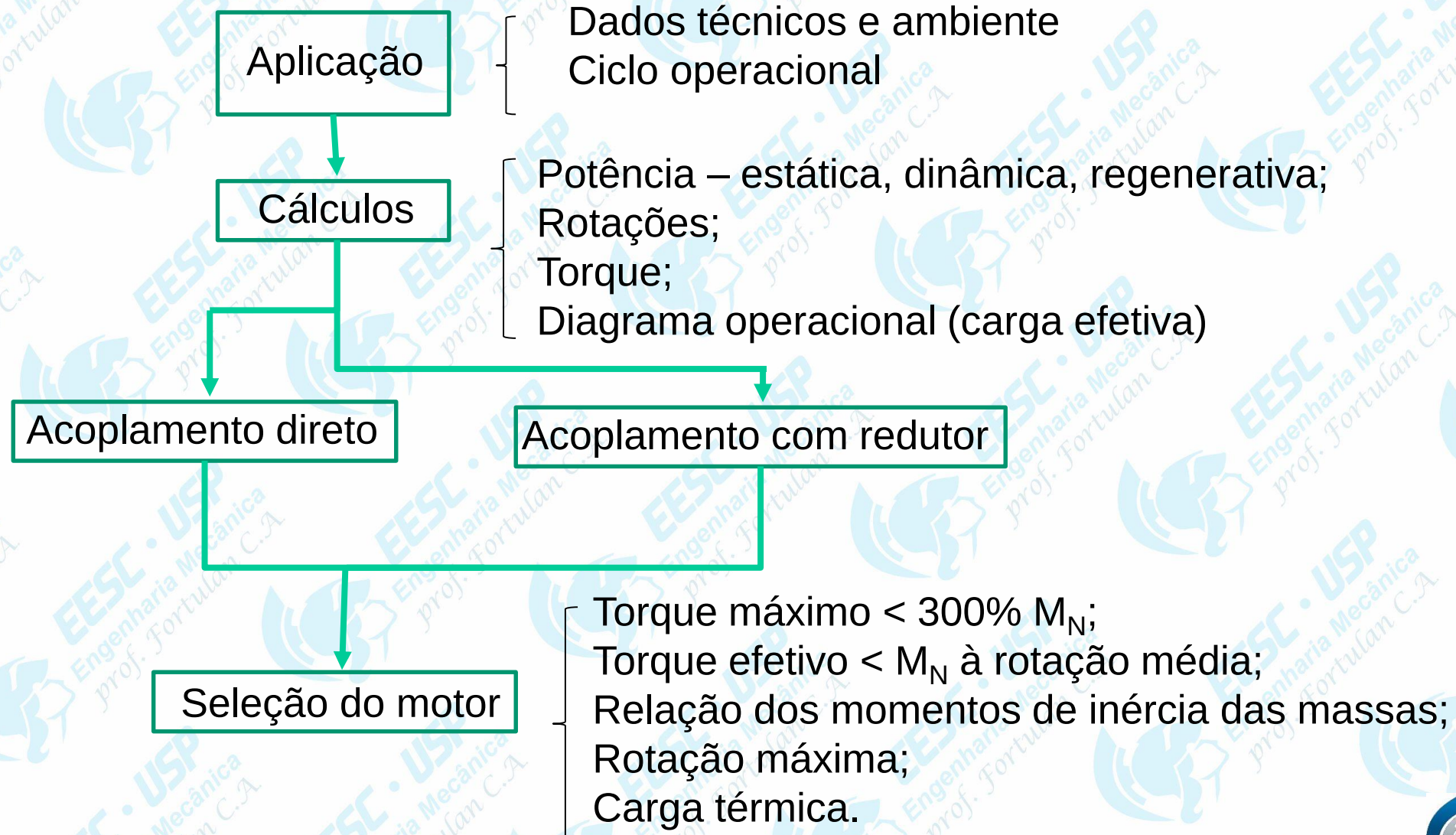
n_s [rpm] Rotação Síncrona

f [Hz] Frequência da corrente no estator

p [-] Número de pólos do motor

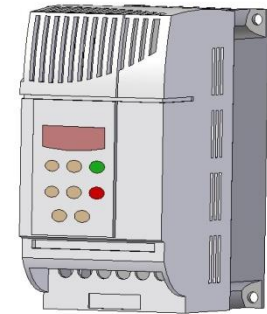
Frequência =	50Hz	60Hz
2-pólos: n_s =	3000 rpm	→ 3600 rpm
4-pólos: n_s =	1500 rpm	→ 1800 rpm
6-pólos: n_s =	1000 rpm	→ 1200 rpm
8-pólos: n_s =	750 rpm	→ 900 rpm

Dimensionamento de motor Assíncrono



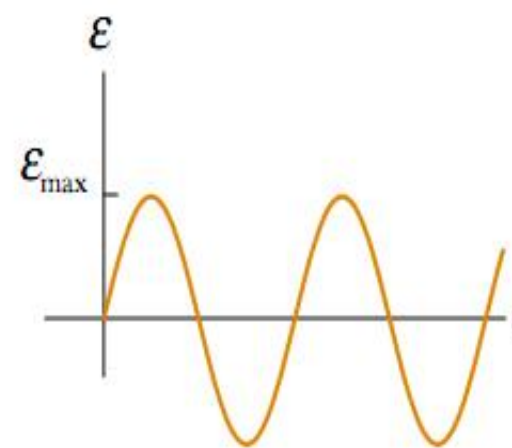
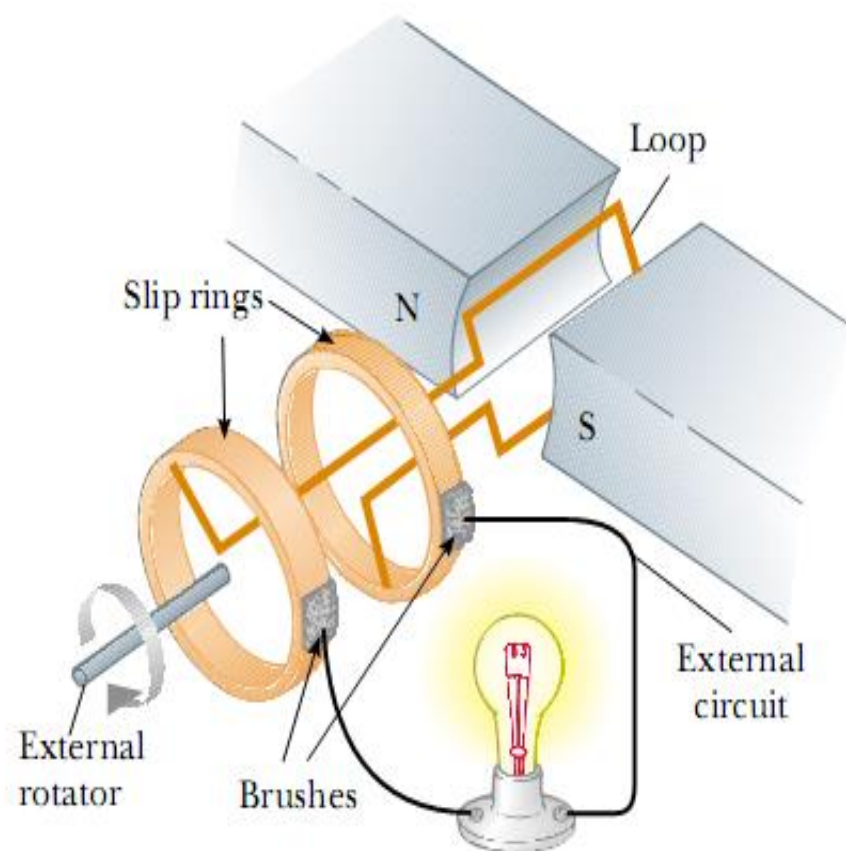
Variação de velocidade através de Inversor de Frequência

- ✓ Aceleração e arranque controlados
- ✓ Desaceleração e paragem controladas
- ✓ Inversão do sentido de marcha
- ✓ Proteção integrada
 - proteção térmica
 - sobretensões e quedas de tensão
 - desequilíbrios de fases
 - conversão monofásico x trifásico (baixa potência)
 - curto circuitos entre fases e entre fase e terra



Motores síncronos

Tem seu rotor constituído por um eletroímã alimentado por CC (corrente contínua) ou constituído por ímãs permanentes. Como o campo magnético do rotor independe do campo magnético do estator, quando o campo magnético do rotor tenta se alinhar com o campo magnético girante do estator, o rotor adquire velocidade proporcional a frequência da alimentação do estator e acompanha o campo magnético girante estabelecido no mesmo, sendo por este motivo denominado síncrono. O aumento ou diminuição da carga não afeta sua velocidade. Se a carga ultrapassar os limites nominais do motor, este para definitivamente



- ✓ Caracterizam-se por funcionar com uma velocidade que depende da frequência da rede que os alimenta independentemente da carga;
- ✓ Os motores síncronos são alternadores que funcionam como motores.
- ✓ Aplica-se como gerador, na correção do fator de potência, nos compressores, laminadores, sopradores e **conversores** de frequência.

Vantagens

- Velocidade constante em regime permanente, tanto em vazio como com carga
 - Na indústria, motores síncronos são muitos utilizados onde a velocidade constante é desejada.
 - Os motores síncrono são utilizados em grandes estações de bombeamento.
- Podem ser utilizados como geradores de energia elétrica, sendo o principal equipamento de conversão de energia no sistema de potência elétrico mundial.
- Reatância da armadura reduzida;
- Melhoria do isolamento;
- Peso e inércia do rotor reduzidos.

Desvantagens:

O emprego de corrente contínua para a sua excitação. Havendo qualquer perturbação no sistema, o motor poderá sair de sincronismo, causando a sua parada (enquanto o motores síncronos continuam a girar).

Motor de corrente contínua

Tipos:

- ✓ Com escova;
- ✓ Sem escovas;
- ✓ Motor de passo.



DC motor



DC Brushless motor



Stepper motor



Servo motor

Armadura (rotor) de um motor DC

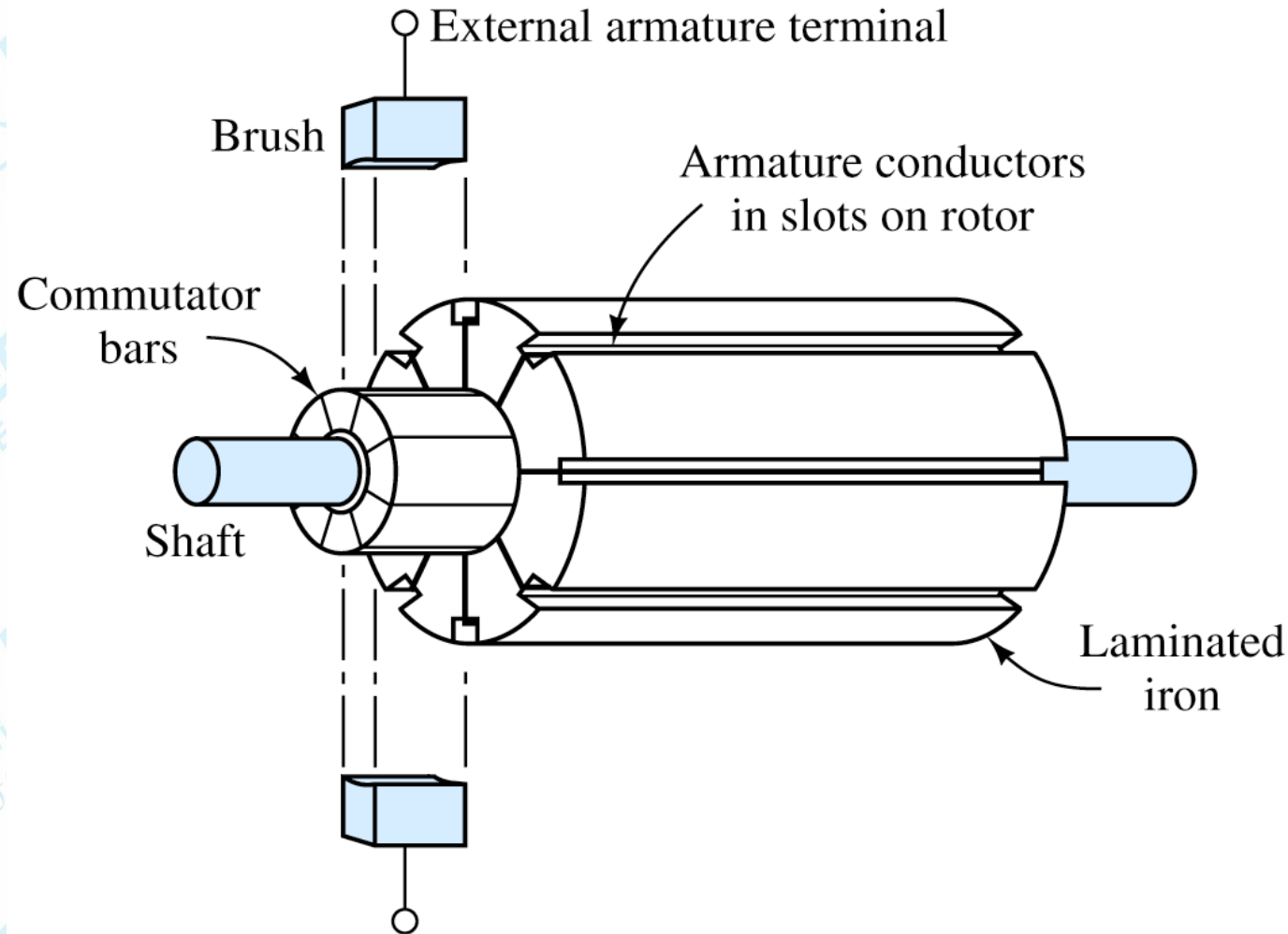


Figure 16.9 Rotor assembly of a dc machine.

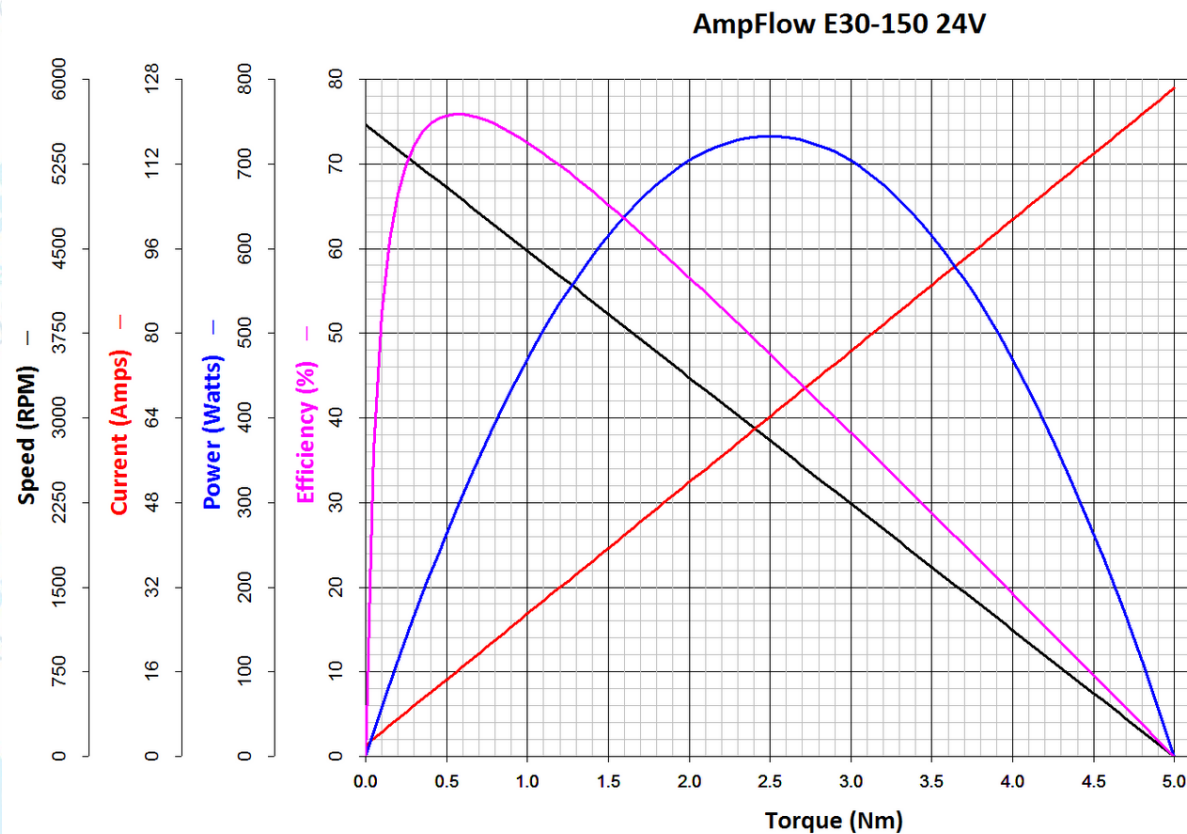
Curva Característica

Exemplo: Modelo econômico



http://www.ampflow.com/E30-150_N.JPG

Type	Economy
Model	E30-150
Peak Horsepower	1.0
Diameter (inches)	3.1
Length (inches)	4.0
Stall Torque (oz-in)	710
Efficiency	76%
Voltage*	24*
No-Load RPM	5600
Pounds	3.6
Price	\$79



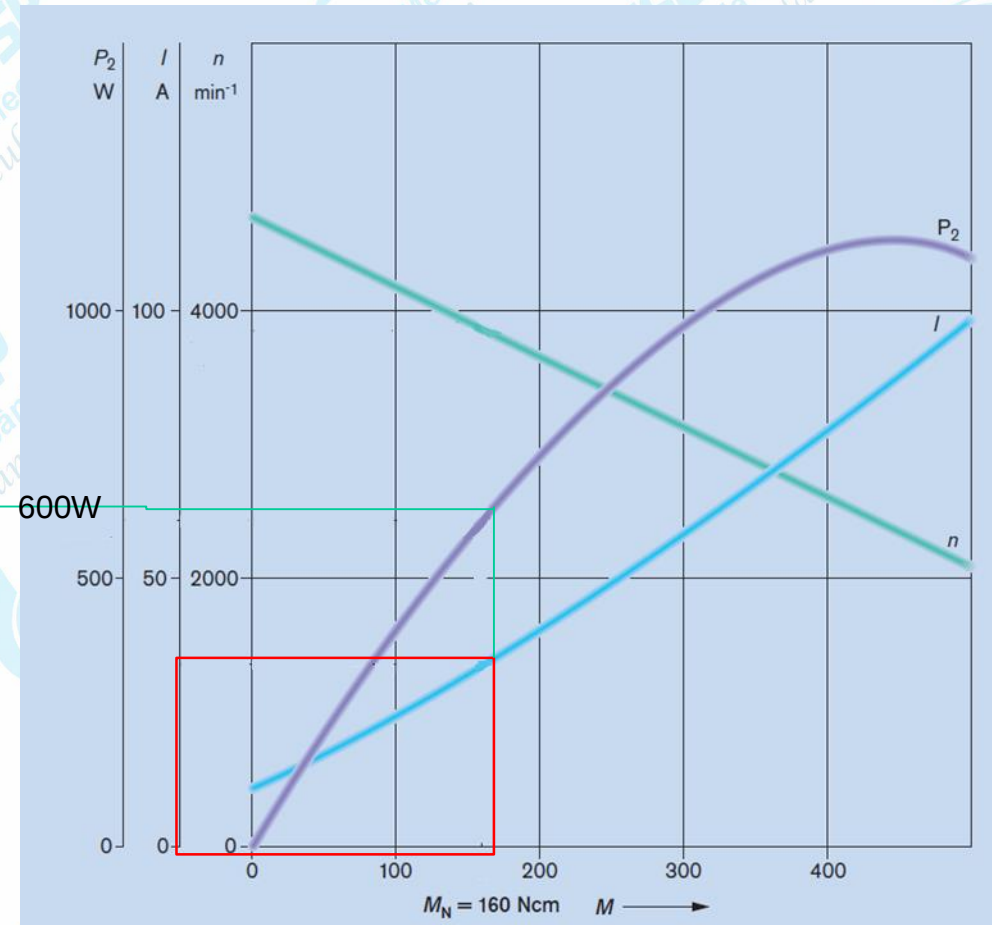
http://www.ampflow.com/E30-150_Chart.png

Exercício

Calcule a potência de entrada, a potência de saída e o rendimento para um motor cuja voltagem nominal é de 24 V a uma corrente nominal de 35 A. A curva característica é dada abaixo:

$$P_i = U \cdot i = 24 \cdot 35 = 840W$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{600}{840} = 71\%$$



Exercício

A equação teórica de potência para a Potência de entrada P_1 é:

$$P_1 = U_N \cdot I_N;$$

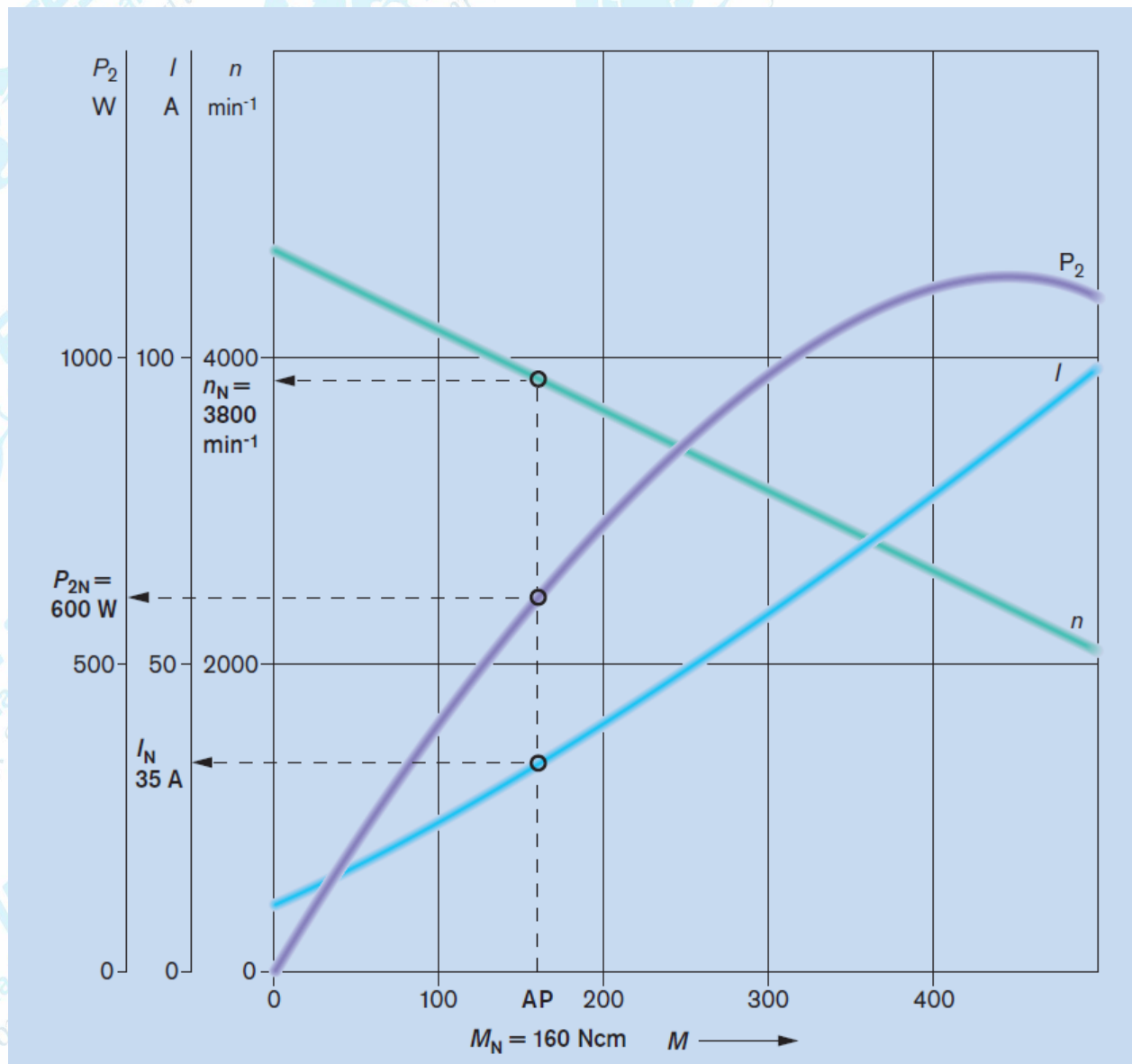
$$P_1 = 24 \text{ V} \cdot 35 \text{ A};$$

$$P_1 = 840 \text{ W}$$

Através desta potência de entrada P_1 e da potência de saída P_{2N} determinada pelo padrão de curva característica, pode-se calcular a eficiência η :

$$\eta = \frac{P_{2N}}{P_1} = \frac{600 \text{ W}}{840 \text{ W}} = 0,71 = 71\%$$

Bosch Catálogo – Motores Elétrico 2004/2005

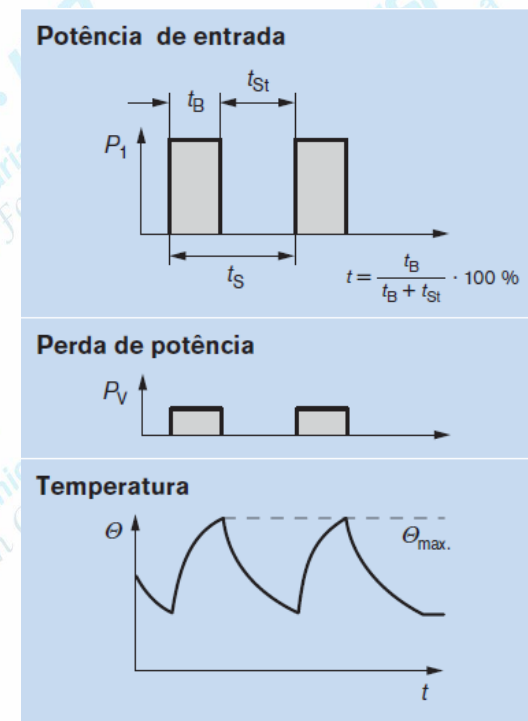
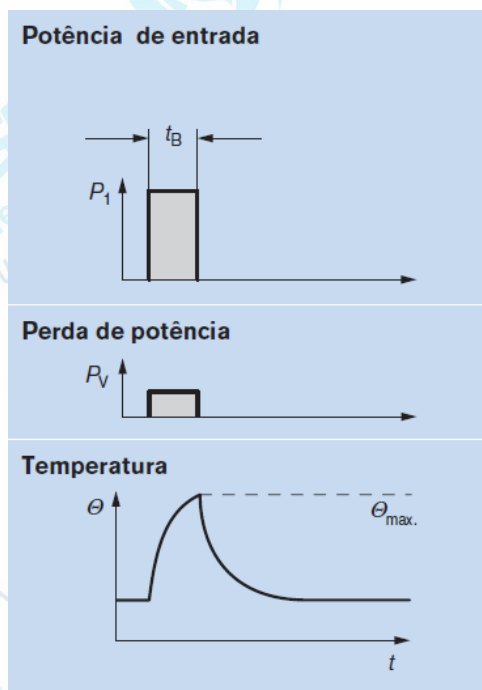
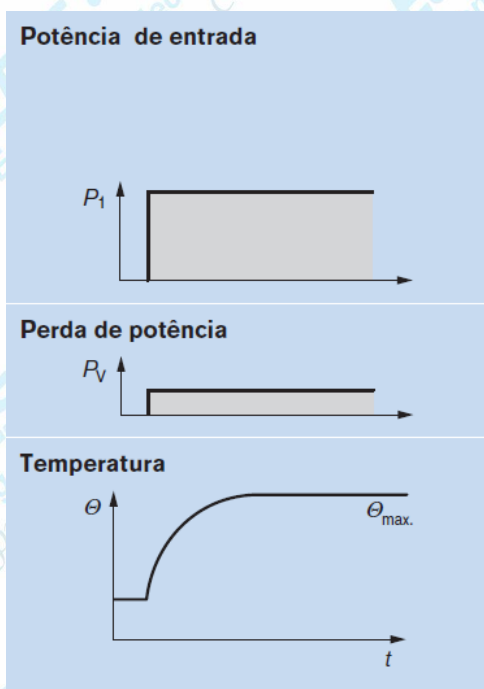


Classes de funcionamento

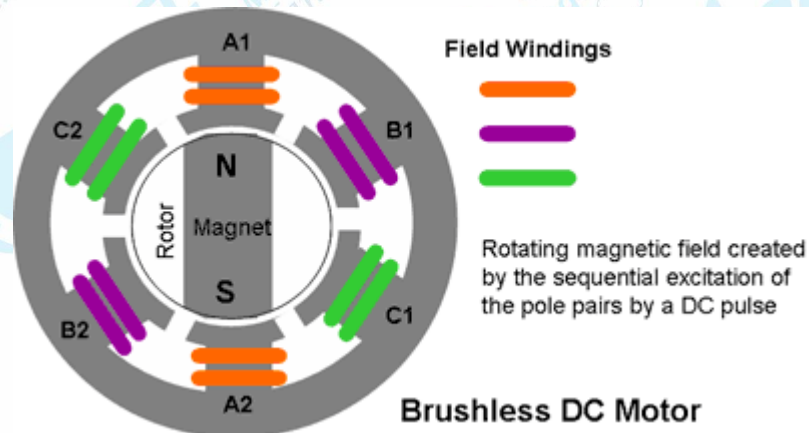
Serviço contínuo S1 - Operação em carga contínua, com duração em que se pode alcançar um equilíbrio térmico suficiente.

Serviço de curta duração S2 - Operação em carga constante, duração em que, no entanto, não seja suficiente para alcançar o equilíbrio térmico, com uma parada subsequente que dure até que a temperatura do motor torne-se diferente da do resfriador em não mais que 2 K.

Serviço intermitente-periódico S3 - Operação composta de uma sequência de ciclos idênticos na qual cada ciclo inclui um período numa carga constante e uma parada, onde a corrente inicial não possui nenhum efeito considerável no aquecimento.



Motor DC sem escovas - Motores BLDC (brushless DC)



Em relação ao motor com escova

Vantagens

- ✓ mais eficientes
- ✓ confiabilidade mais elevada
- ✓ ruído reduzido,
- ✓ a vida útil mais longa
- ✓ a eliminação da ionização do comutador
- ✓ redução total de EMI (interferência eletromagnética).

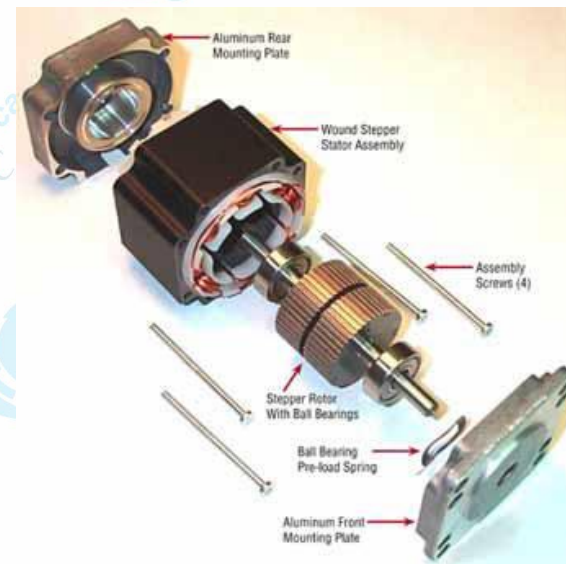
Desvantagens

- ✓ custo mais elevado;
- ✓ requerem dispositivos MOSFET de alta potência - controlador eletrônico de velocidade

Aplicações

- ✓ Motores para injeção de combustíveis;
- ✓ Motores de acionamento de fluidos, tais como bombas de água;
- ✓ Motores de ventilação.
- ✓ Motores de bicicletas elétricas.
- ✓ Motores para aplicação em equipamentos eletro-médicos.

Motor de Passo



www.compumotor.com
www.kalatec.com.br

Motor de Passo: O que é?

Dispositivo eletro-mecânico que converte pulsos elétricos em movimentos mecânicos, cujo rotor ou eixo é rotacionado com pequenos incrementos angulares.

São motores elétricos síncronos *brushless*, que convertem pulsos digitais de sinais em movimento mecânico rotativo de **precisão**.

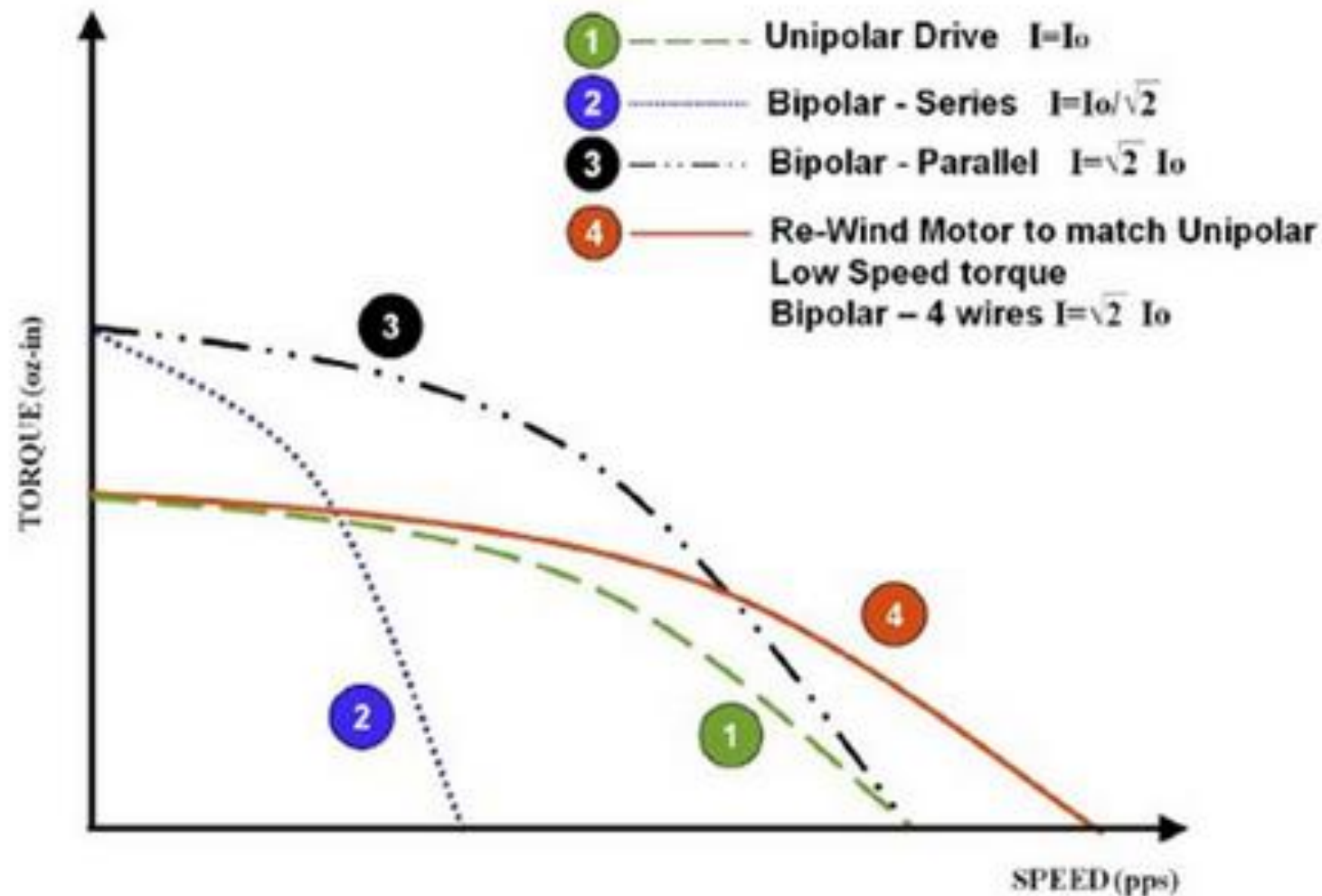
O rotor ou eixo de um motor de passo é rotacionado em pequenos incrementos angulares denominados “passos”, quando pulsos elétricos são aplicados em uma determinada sequência em seus terminais.

Como funciona?

Rotação é diretamente relacionada aos impulsos elétricos, bem como com a seqüência e frequência que estes são aplicados, o que determina o sentido e velocidade de avanço do rotor. O ângulo de giro é proporcional ao número de passos acionados.

Tipos:

UNIPOLAR VS. BIPOLAR



Aplicações:

Movimentos com precisão (ângulo de rotação, velocidade, posição e sincronismo).

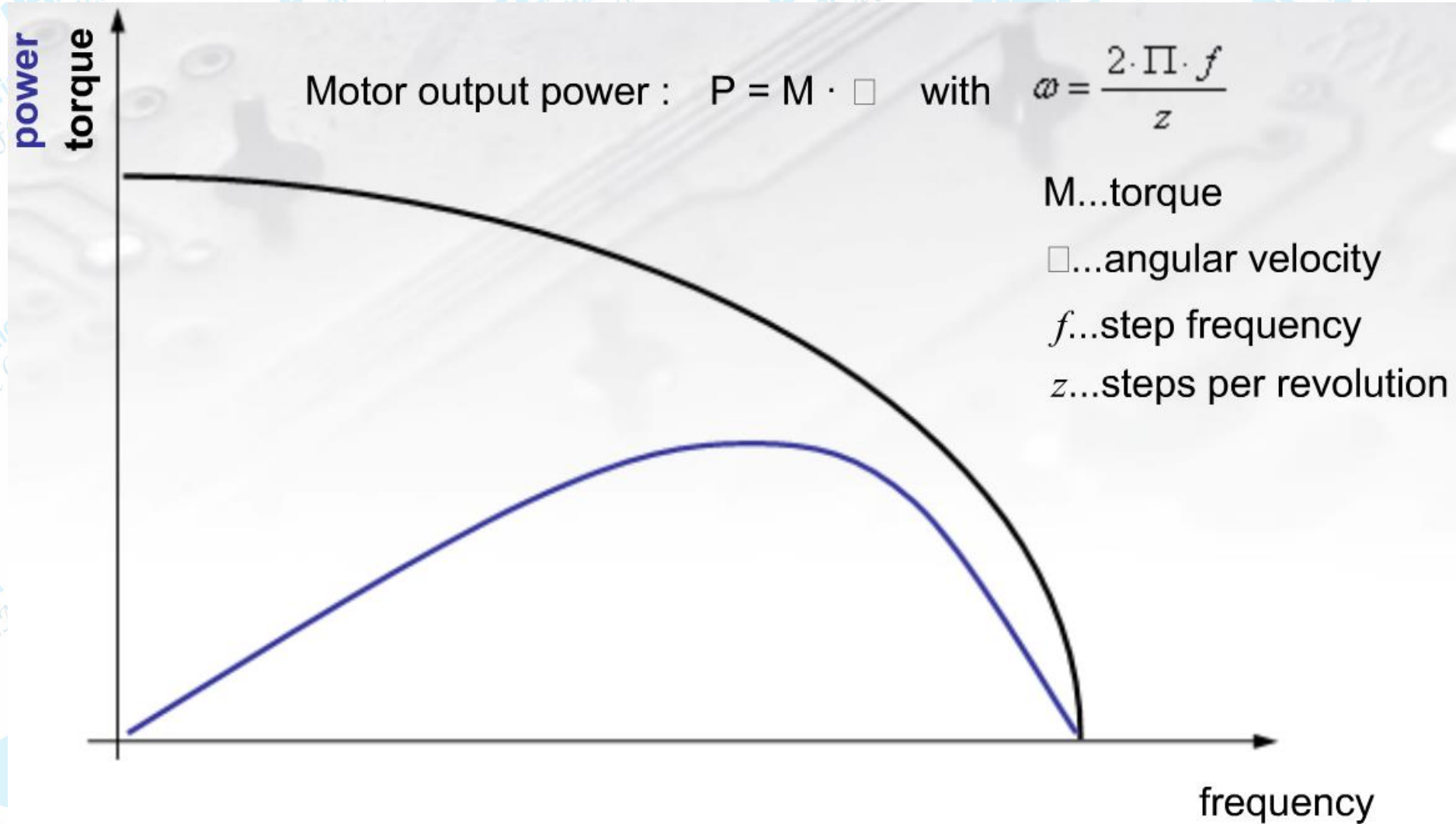
Automação industrial, impressoras, robôs, scanners

Vantagens:

- baixo custo para o controle alcançado;
- robusto;
- simplicidade de construção;
- pode operar em um sistema aberto malha de controle;
- baixa manutenção;
- menos propensos a parar ou escorregar;
- funcionar em qualquer ambiente;
- alta confiabilidade

Desvantagens:

- Requer um circuito de controle dedicado;
- Exige mais corrente que um motor DC;
- Alto torque de partida alcançados a baixas velocidades;
- Desempenho bruto em baixa velocidade, a menos que um *microstep* seja usado;
- Responsabilidade para a perda de posição, como resultado da operação de malha aberta;
- Consomem corrente, independentemente da carga;
- Perdas em velocidade é relativamente alta e pode causar um aquecimento excessivo e são frequentemente ruidosa (especialmente em altas velocidades).



Controlador CNC

HobbyCNC PRO Chopper Driver Board Kit

- 4 eixos independentes e interpolados;
- Comunicação: Porta paralela;
- 12 a 36V – 3A por fase motor passo;
- Softwares:
 - Turbocnc; emc2; KCAM....



SERVOMOTOR

Servoacionamentos, são destinados à aplicações quando são requeridos: elevada dinâmica, controle de torque, precisão de velocidade e que se mantenham aliadas a um elevado desempenho.

Servo Motor CC – *DC Servo motor DC*

Servo Motor AC - *AC Servo Motors*

Servo motor DC

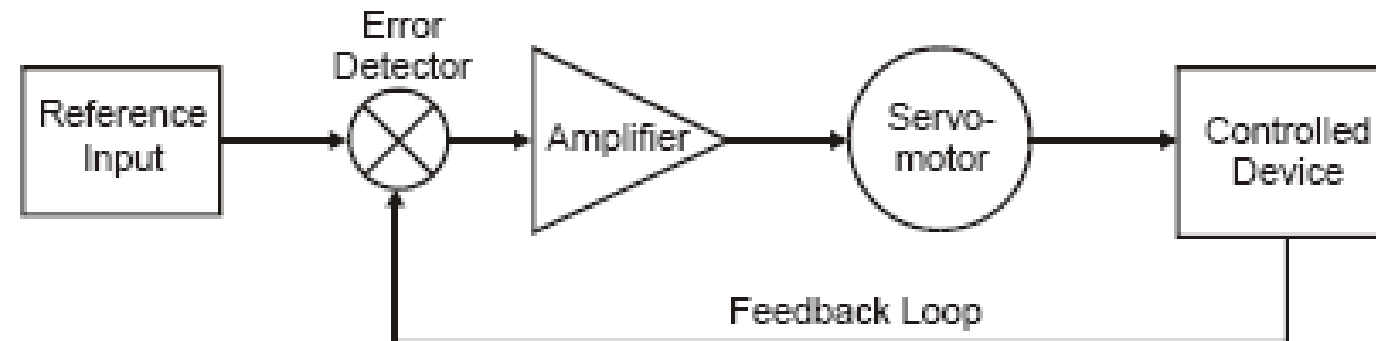
É um conjunto de quatro partes:

- um motor DC,
- uma caixa de redução,
- um encorder e;
- um circuito de controle.

A função do servo é receber um sinal de controle, que representa uma posição de saída desejada, e fornecer energia para que o motor DC gire até esta posição. Ele usa o dispositivo sensor de posição para reconhecer a posição de rotação do eixo.

SERVOMOTOR

Os servomotores DC são acionados por uma corrente proveniente de amplificadores eletrônicos ou amplificadores CA com demoduladores internos ou externos, reatores saturáveis, amplificadores retificadores controlados a silício ou tiristorizados, ou por qualquer um dos vários tipos de amplificadores rotativos. Os servomotores DC tem tamanhos que vão de 0,05 a 1.000 HP.



www.weg.com.br

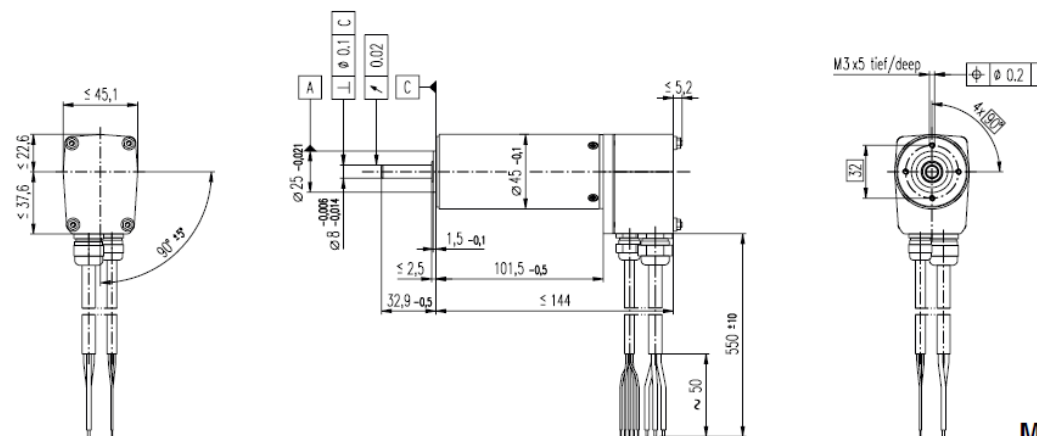
www.compumotor.com

www.kalatec.com.br

	Y-circuit	136207
	Δ-circuit	
Motor Data		
1 Assigned power rating	W	250
2 Nominal voltage	Volt	24.0
3 No load speed	rpm	5300
4 Stall torque	mNm	2250
5 Speed / torque gradient	rpm / mNm	2.40
6 No load current	mA	435
7 Terminal resistance phase to phase	Ohm	0.46
8 Max. permissible speed	rpm	12000
9 Max. continuous current at 5000 rpm	A	7.10
10 Max. continuous torque at 5000 rpm	mNm	283
11 Max. efficiency	%	83
12 Torque constant	mNm / A	43.3
13 Speed constant	rpm / V	220
14 Mechanical time constant	ms	5
15 Rotor inertia	gcm ²	209
16 Terminal inductance phase to phase	mH	0.170
17 Thermal resistance housing-ambient	K / W	1.7
18 Thermal resistance winding-housing	K / W	1.1
19 Thermal time constant winding	s	16
20 Thermal time constant stator	s	850

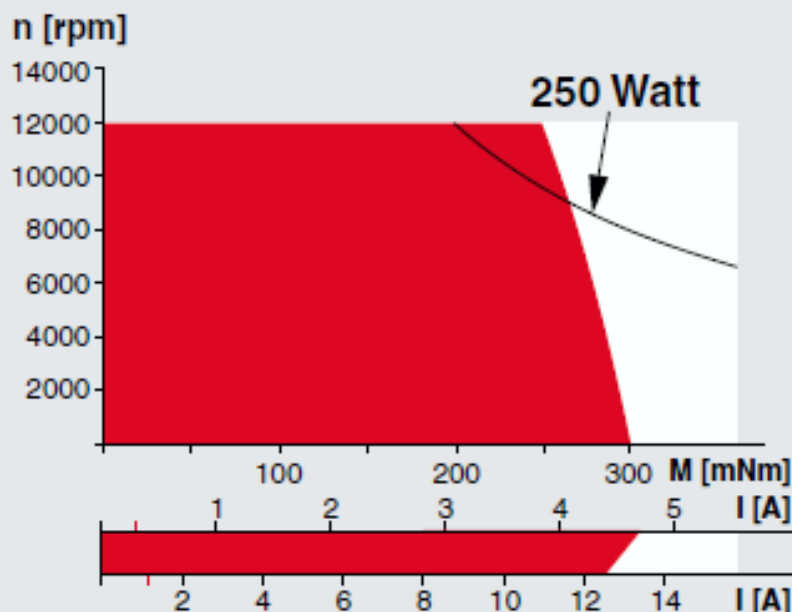
maxon EC motor

EC 45 Ø45 mm, brushless, 250 Watt, CE approved



M 1:4

Operating Range



Comments

Details on page 148

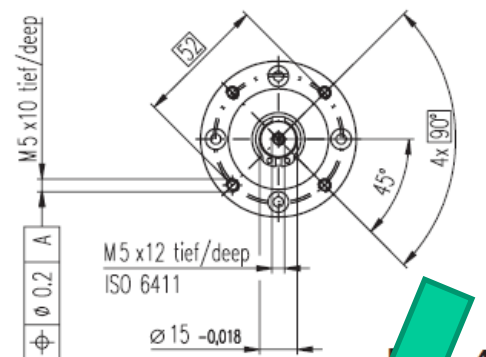
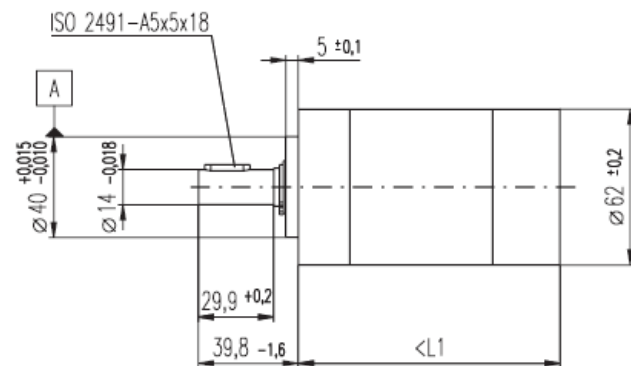
- Curve of constant assigned power rating
- Continuous operation
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
= Thermal limit
- Short term operation
The motor may be briefly overloaded (recurring).

136209 Motor with high resistance winding

136210 Motor with low resistance winding

Nº 110501

Planetary Gearhead GP 62 A Ø62 mm, 8 - 50 Nm



Technical Data

Planetary Gearhead	straight teeth
Output shaft	steel
Bearing at output	ball bearing
Radial play, 7 mm from flange	max. 0.08 mm
Axial play	max. 1 mm
Max. permissible axial load	120 N
Max. permissible force for press fits	1000 N
Sense of rotation, drive to output	=
Recommended input speed	< 3000 rpm
Recommended temperature range	-30 ... +140°C
Number of stages	1 2 3
Max. radial load, 24 mm from flange	240 N 360 N 570 N

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

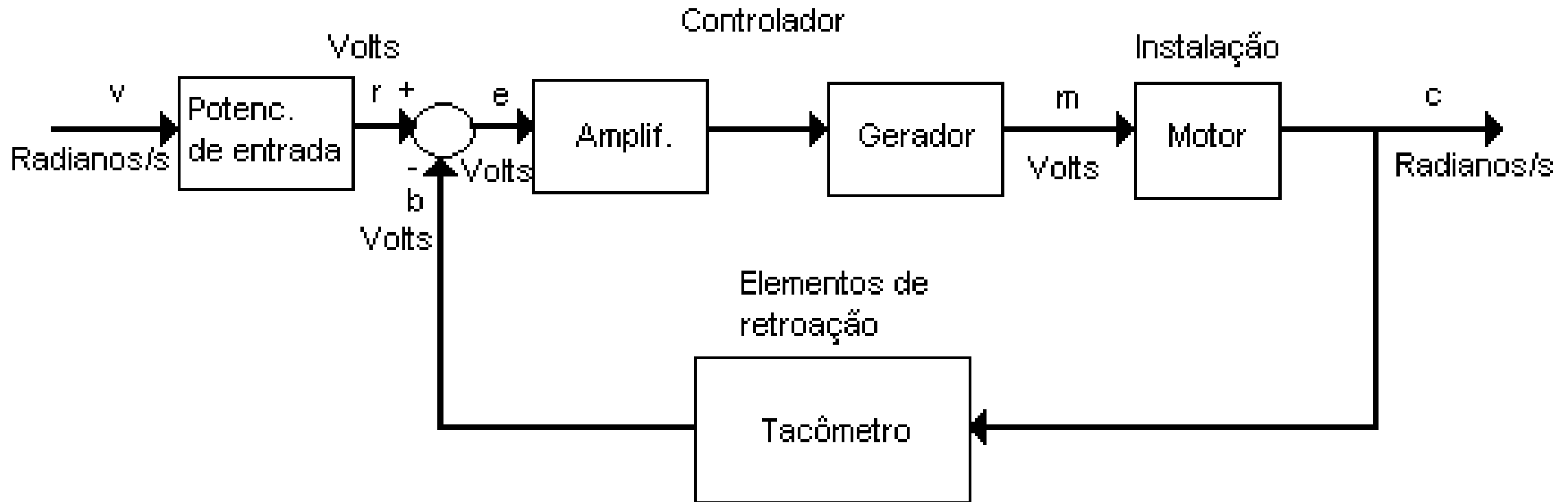
Order Number

110499 110501 110502 110503 110504 110505 110506 110507 110508

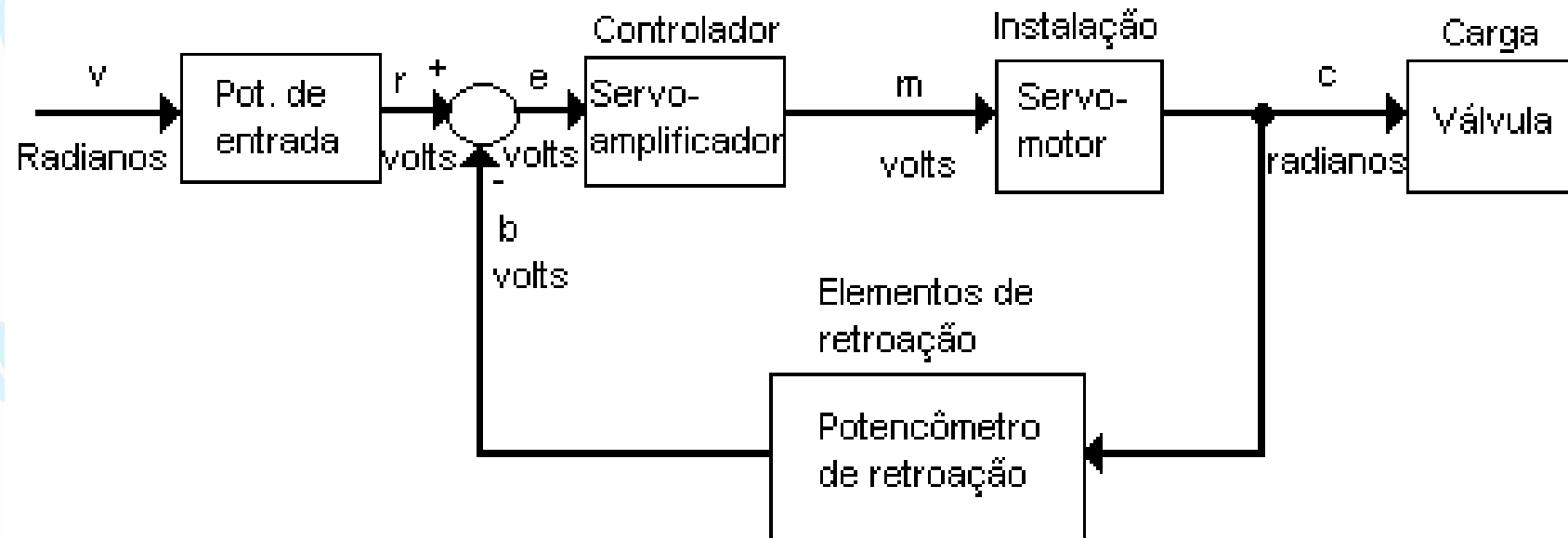
Gearhead Data

1 Reduction		5.2 : 1	19 : 1	27 : 1	35 : 1	71 : 1	100 : 1	139 : 1	181 : 1	236 : 1
2 Reduction absolute		57/11	3591/187	3249/121	1539/44	226223/3179	204687/2057	185193/1331	87723/484	41553/176
3 Max. motor shaft diameter	mm	8	8	8	8	8	8	8	8	8
4 Number of stages		1	2	2	2	3	3	3	3	3
5 Max. continuous torque	Nm	8	25	25	25	50	50	50	50	50
6 Intermittently permissible torque at gear output	Nm	12	37	37	37	75	75	75	75	75
7 Max. efficiency	%	80	75	75	75	70	70	70	70	70
8 Weight	g	950	1250	1250	1250	1540	1540	1540	1540	1540
9 Average backlash no load	°	1.0	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
10 Mass inertia	gcm ²	109	100	105	89	104	105	102	88	89
11 Gearhead length L1	mm	72.5	88.3	88.3	88.3	104.2	104.2	104.2	104.2	104.2

Servomotor DC



Controle Posição de um servomotor DC



Servo Motor AC - AC Servo Motors

- Controlado por sinal de comando AC aplicado nas bobinas.
- Servo Motor AC sem escovas
 - Opera no mesmo princípio de um motor de indução monofásica.



Características

Posionamento

Alta eficiencia

Compacto

Máximo alto torque

Torque máximo constante

Faixa de velocidade < 10.000 rpm

Faixa de potência < 20 kW

Spindle

Operação suave
à baixas
velocidades

Operação em 4
quadrantes

Alta taxa/ torque contínuo

Potência máxima constante

Faixa de velocidade < 20.000 rpm

Faixa de potência < 100 kW



**High Speed Spindle
(Siemens)**



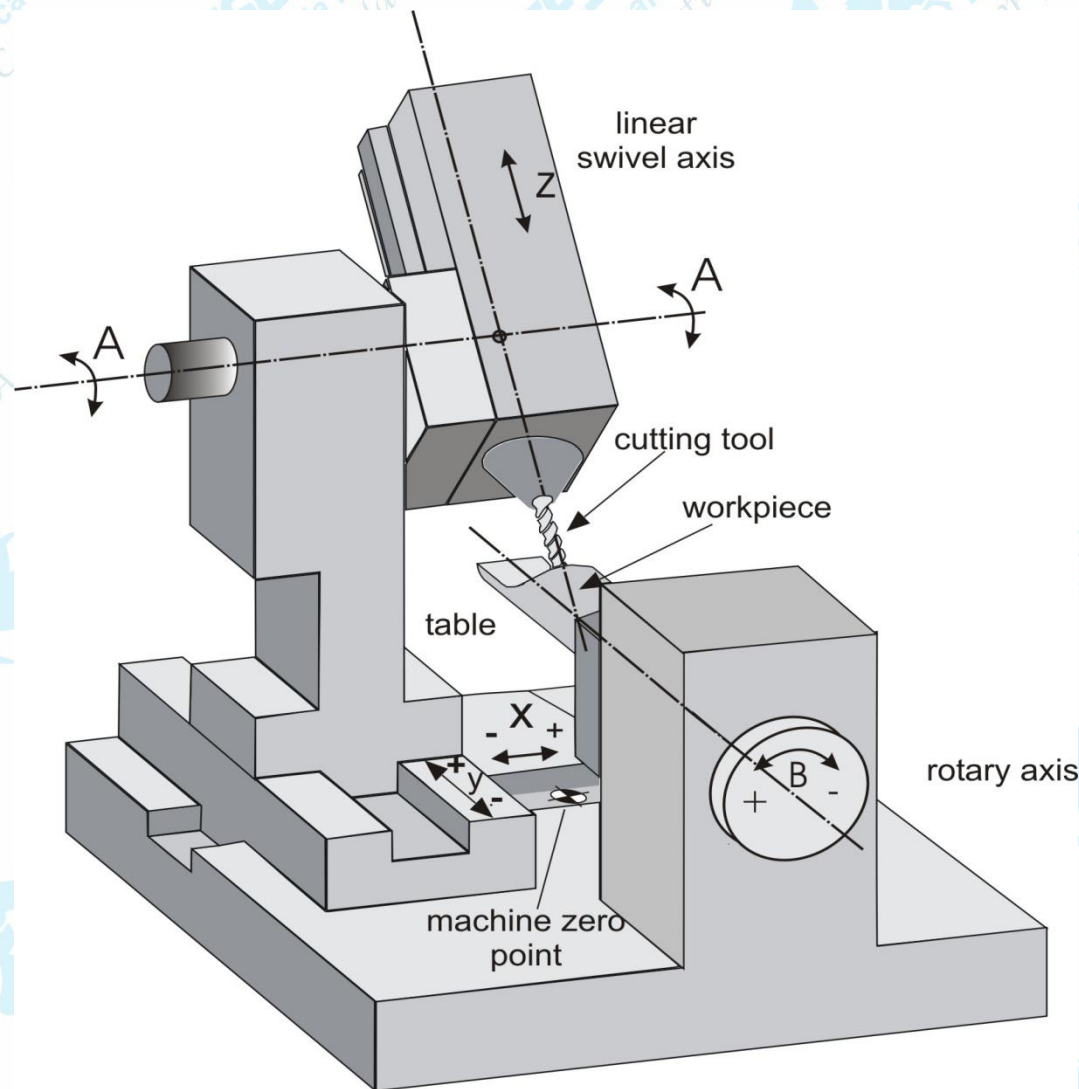
**DSD Servo
(Baumüller)**

**High Torque Motor
(Baumüller)**



**Spindle Motor
(Franz Kessler)**





Carcaça	HD (mm)	∅P (mm)	Flange (mm)				Ponta de Eixo (mm)					
			∅M	∅N	∅S	T	∅D	E	F	G	GD	H
40	110	80	95	50j6	6,5	2	14j6	29,5	5n9	11	5	M5x1x12
56	127	102	115	95j6	9	3	19j6	40	6n9	15,5	6	M6x1x16
71	166	142	165	130j6	11	3,5	24j6	50	8n9	20	7	M8x1,25x19

*Dimensão "L" vide tabela nas páginas 11 e 12.

SWA 56 2.5 30 F

Opções:

- (Branco) - sem acessórios
- F - freio
- E - encoder incremental
- U - particularidade elétrica (bobinagem)
- M - particularidade mecânica (flange, eixo)

(rotação) 20 = 2000 rpm
30 = 3000 rpm
60 = 6000 rpm

(torque) 1.6, 2.5, 2.6, 3.6, 3.8, 4.0, 5.5, 6.1, 6.5, 7.0, 8.0, 9.3, 13, 15, 19, 22, 25 Nm

(carcaça) 40, 56 e 71

Servomotor corrente alternada

Especificações Técnicas													
Rotação	Código	Modelo do Servomotor	Torque Rotor Bloq. M_o (N.m)	Corrente I_o (A) (RMS)	Potência Nominal (kW)	Massa (kg)	Inércia $\times 10^{-3}$ (kg.m ²)	Comprimento "L" (mm)	Servoconversor recomendado			Cabos de ligação entre o SWA e SCA-0	
									SCA050004	SCA050008	SCA050024	Cabo de Potência	Cabo de Resolver (realimentação)
2000 rpm	1900.7006	SWA 56-2,5-20	2,5	2,5	0,36	4,6	0,22	250	X			CP-...-4x0.75	
	1900.7030	SWA 56-3,8-20	3,8	3,8	0,70	5,6	0,31	270	X				
	1900.7057	SWA 56-6,1-20	6,1	5,2	1,10	7,5	0,50	310		X		CP-...-4x1.5	
	1900.7073	SWA 56-8,0-20	8,0	6,5	1,32	9,3	0,68	350		X			
	1900.7090	SWA 71-9,3-20	9,3	8,0	1,60	12,0	1,63	270,5		X		CP-...-4x4.0	
	1900.7111	SWA 71-13-20	13	11,8	2,30	15,0	2,35	300,5			X		
	1900.7138	SWA 71-15-20	15	13,0	2,50	17,0	3,06	330,5			X		

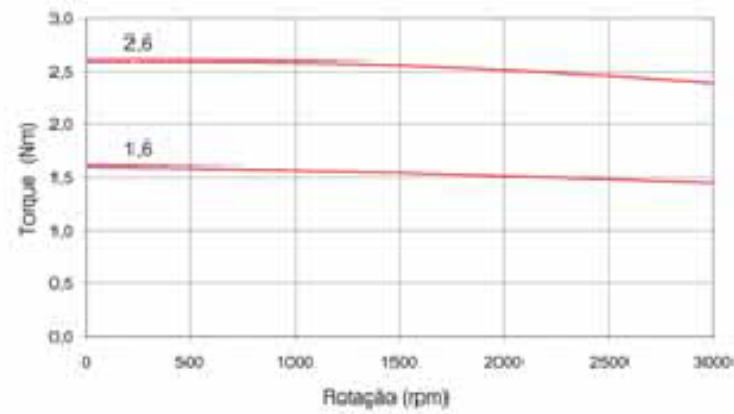
3000 rpm	1900.7540	SWA 40-1,6-30	1,6	2,0	0,45	2,8	0,084	216,7	X			
	1900.7558	SWA 40-2,6-30	2,6	3,2	0,70	3,5	0,12	236,7	X			CP-...-4x0.75
	1900.7014	SWA 56-2,5-30	2,5	3,8	0,66	4,6	0,22	250	X			
	1900.7049	SWA 56-4,0-30	4,0	5,7	0,88	5,6	0,31	270		X		
	1900.7065	SWA 56-6,1-30	6,1	8,5	1,30	7,5	0,50	310		X		CP-...-4x1.5
	1900.7081	SWA 56-7,0-30	7,0	9,0	1,50	9,3	0,68	350			X	
	1900.7103	SWA 71-9,3-30	9,3	12,0	2,05	12,0	1,63	270,5			X	
	1900.7120	SWA 71-13-30	13	18,0	2,85	15,0	2,35	300,5			X	CP-...-4x4.0
	1900.7146	SWA 71-15-30	15	20,0	3,30	17,0	3,06	330,5			X	

CR

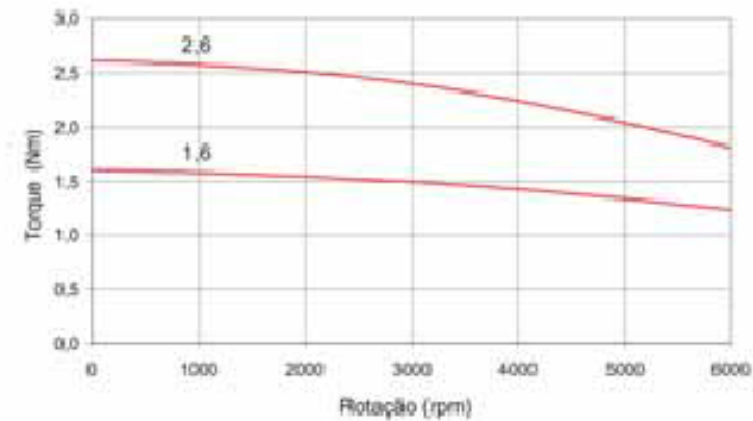
CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS SERVOMOTORES SWA

SWA 40

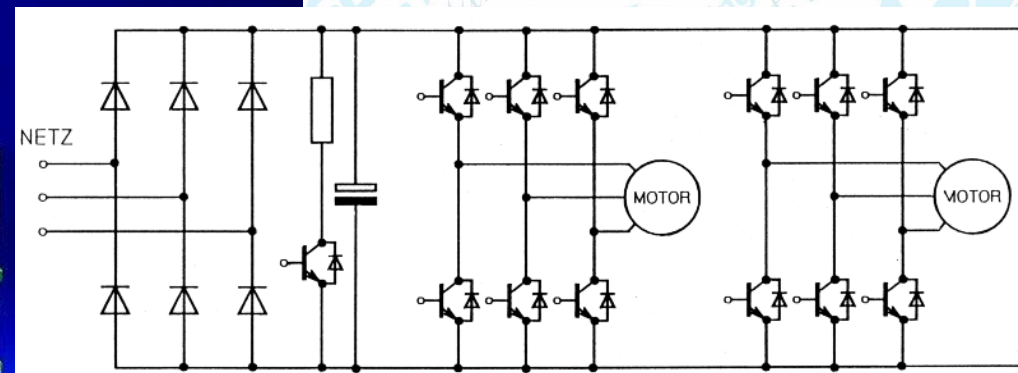
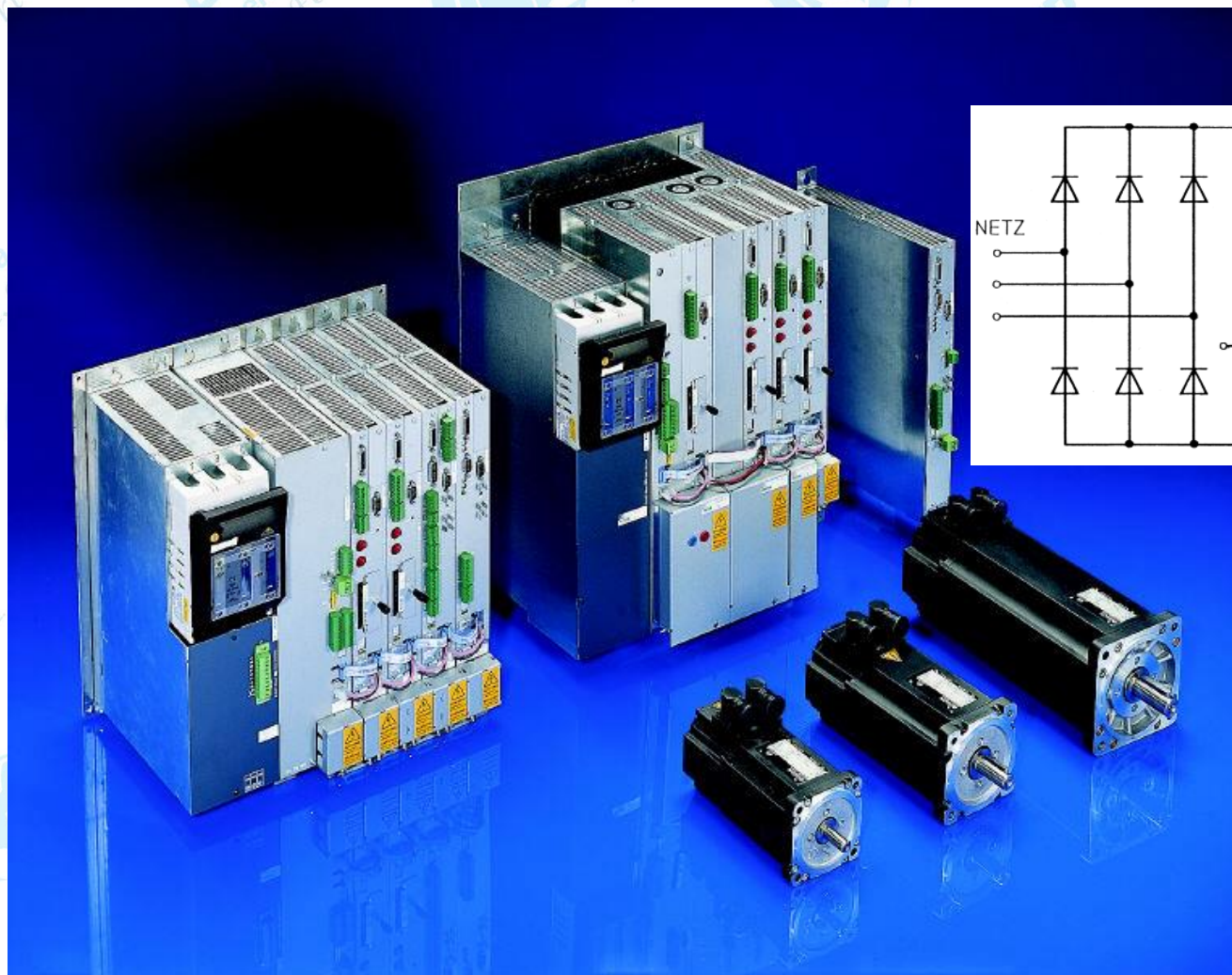
SERVOMOTORES SWA 40-...-30



SERVOMOTORES SWA 40-...-60



Inversores (drivers) de Servo



Encoders



Vantagens

- baixo custo
- alta precisão

Desvantagens

- efeito elástico e back lash

fonte : ERN-Geber, Heidenhain

Cálculo da Carga

Requisitos: frequência, curso, carga e coeficiente de atrito.

Sistema: configuração dos componentes.

Cinemática: perfil de velocidade,
velocidade máxima da carga,
rotação máxima do motor,
aceleração da carga,
aceleração do motor.

Dinâmica: massa, inércia,
força, torque.

Crítérios: rotação,
razão de inércia,
torque máximo,
torque RMS.

Torque

Assumindo 100% de rendimento:

M=motor; l=carga

$$P = T_m \omega_m = T_l \omega_l$$

$$\frac{\omega_m}{\omega_l} = \frac{T_l}{T_m}$$

Considerando rendimento:

$$T_m = \frac{T_l}{\eta N_{GB}}$$

N=relação de transmissão

Pela Inércia Refletida:

$$T_m = J_{load} \alpha_m$$

$$\alpha = \frac{\omega}{tempo}$$

Inércia

$$J_{\text{total}} = J_m + J_{\text{on motor shaft}} + J_{\text{ref}}$$

Razão da Inércia

$$J_R = \frac{J_{\text{on motor shaft}} + J_{\text{ref}}}{J_m}$$

$J_R = 1 \rightarrow$ Ótima razão de inércia

$J_R = 1-2$ – Máquinas que requerem alta rapidez com frequentes partidas e paradas.

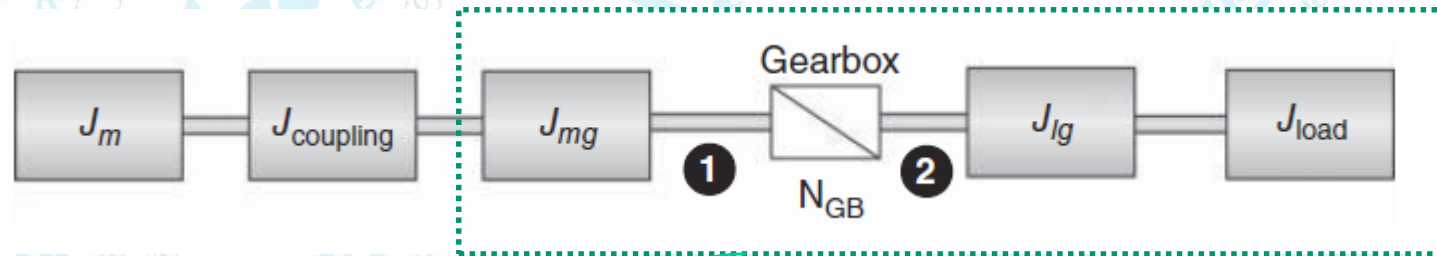
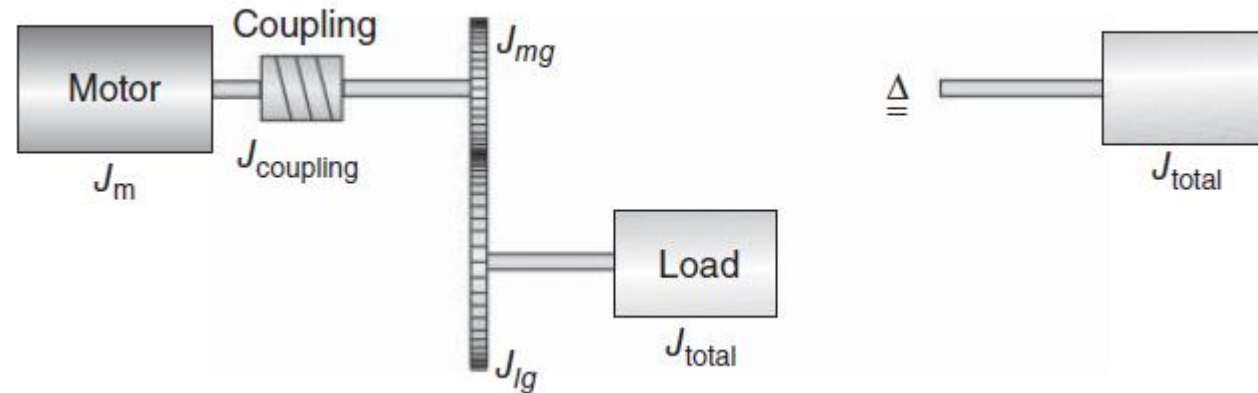
$J_R \leq 5$ – prática comum

Servo motores $\rightarrow J_R = 6$ é possível com razoável desempenho.

Quando o alto desempenho e velocidade não for solicitado $J_R 10-100$ são encontrados.

Wilfried Voss. A comprehensible guide to servo motor sizing. Copperhill Technologies Corporation. 2007.

Hakan Gurocak. Industrial Motion Control: Motor Selection, Drives, Controller Tuning, Applications.



$$J_{load \rightarrow M} = \frac{J_{load}}{\eta N_{GB}^2}$$

N=relação de transmissão

EXAMPLE 3.2.1

The system in Figure 3.6 uses a PN023 gearbox [5] by Apex Dynamics, Inc. It has 5:1 gear ratio, 0.15 kg-cm^2 inertia reflected to the input side and 97% efficiency. The motor is a Quantum QB02301 NEMA size 23 servomotor [2] by Allied Motion Technologies, Inc. It has $1.5 \times 10^{-5} \text{ kg-m}^2$ rotor inertia. If the load inertia is $10 \times 10^{-4} \text{ kg-m}^2$, find the inertia ratio.

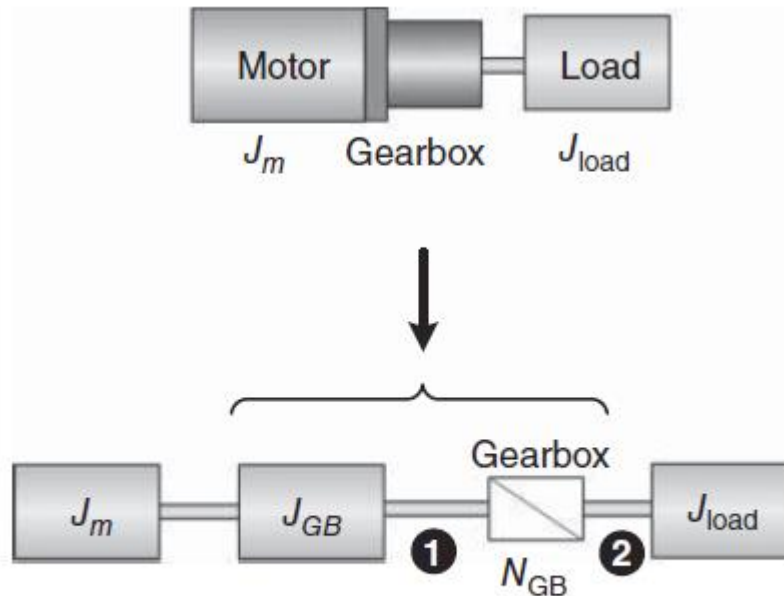


Figure 3.6 Inertia reflection through a gearbox

$$\begin{aligned} J_{\text{load} \rightarrow \text{M}} &= \frac{J_{\text{load}}}{\eta N_{\text{GB}}^2} \\ &= \frac{10 \times 10^{-4}}{0.97 \cdot 5^2} \\ &= 4.124 \times 10^{-5} \text{ kg-m}^2 \\ J_R &= \frac{J_{\text{on motor shaft}} + J_{\text{load} \rightarrow \text{M}} + J_{\text{GB} \rightarrow \text{M}}}{J_m} \\ &= \frac{4.124 \times 10^{-5} + 0.15 \times 10^{-4}}{1.5 \times 10^{-5}} \\ &= 3.75 \end{aligned}$$

where $J_{\text{on motor shaft}} = 0$ since there is no other inertia on the motor shaft (ignoring the shafts).

Referências

- ✓ SEW-EURODRIVE - *Seleção de acionamentos - Métodos de cálculo e exemplos*. V1, ed.09 (2005) 157p.
- ✓ WEG, *Especificação de motores elétricos*, Cód: 50032749, rev13 (2014) 67p.
- ✓ Bosch Catálogo – *Motores Elétricos* 2004/2005
- ✓ Hakan Gurocak. *Industrial Motion Control: Motor Selection, Drives, Controller Tuning, Applications*.
- ✓ Wilfried Voss. *A comprehensible guide to servo motor sizing*. Ed. Copperhill Technologies Corporation. 2007.

Aula 08.2 - Prática

Sobre o exercício 6.3 determinar a potência de motor (total) para levantar o assento de clientes em consultório de dentista (300mm) utilizando parafuso de potência citado de 180 mm com velocidade a 6mm/s. Considerar a força F igual a $P \cdot (1,667)$.

Rolamentos:

04 rígidos de esferas (b), 180°

01 bucha de Poliamida ϕ 10mm, (c), curso: 180°

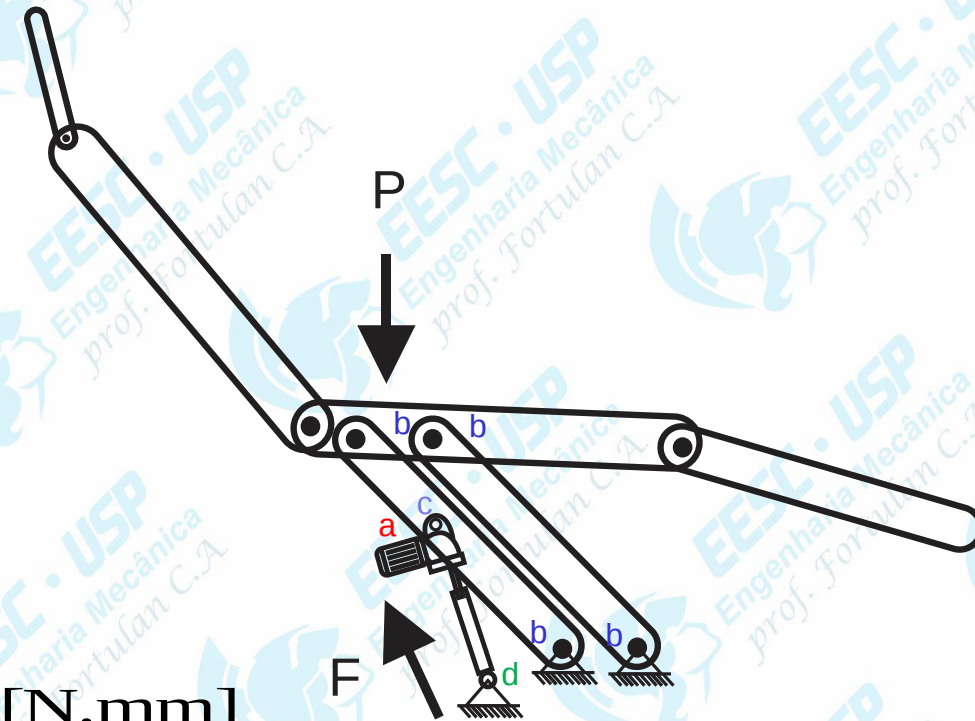
01 bucha de ABS ϕ 16mm, (d), curso: 180°

Coeficiente de atrito da bucha de Nylon com o eixo em aço (μ) = 0,1;

Coeficiente de atrito da bucha de Poliamida com o eixo em aço (μ) = 0,8;

Coeficiente rígidos de esferas: 0,0015; (carga P)

$$M_a = \mu \cdot P \cdot \frac{d}{2} \quad [\text{N.mm}]$$



Verifique se o motor com redução Bosch F006WM0310 atende aos requisitos de projeto, com cálculos baseados em Torque. Considere no máximo 20% de superdimensionamento e corrente de entrada de 4,5 A. Verifique a eficiência do sistema motor.

Observe que a etiqueta do re-manufaturador que utiliza o motor Bosch acima descrito diz que potência 110W, corrente 4,5 A, voltagem 24V e condições de operação S2, faça comentários.



Motor Bosch F006.WMO.310

Os motores DC da Bosch são adequados para diferentes aplicações, com uma ampla gama de potência em um design compacto. Os motores de corrente contínua foram utilizados por muitos anos na indústria automotiva e podem ser usados também para diferentes aplicações industriais.

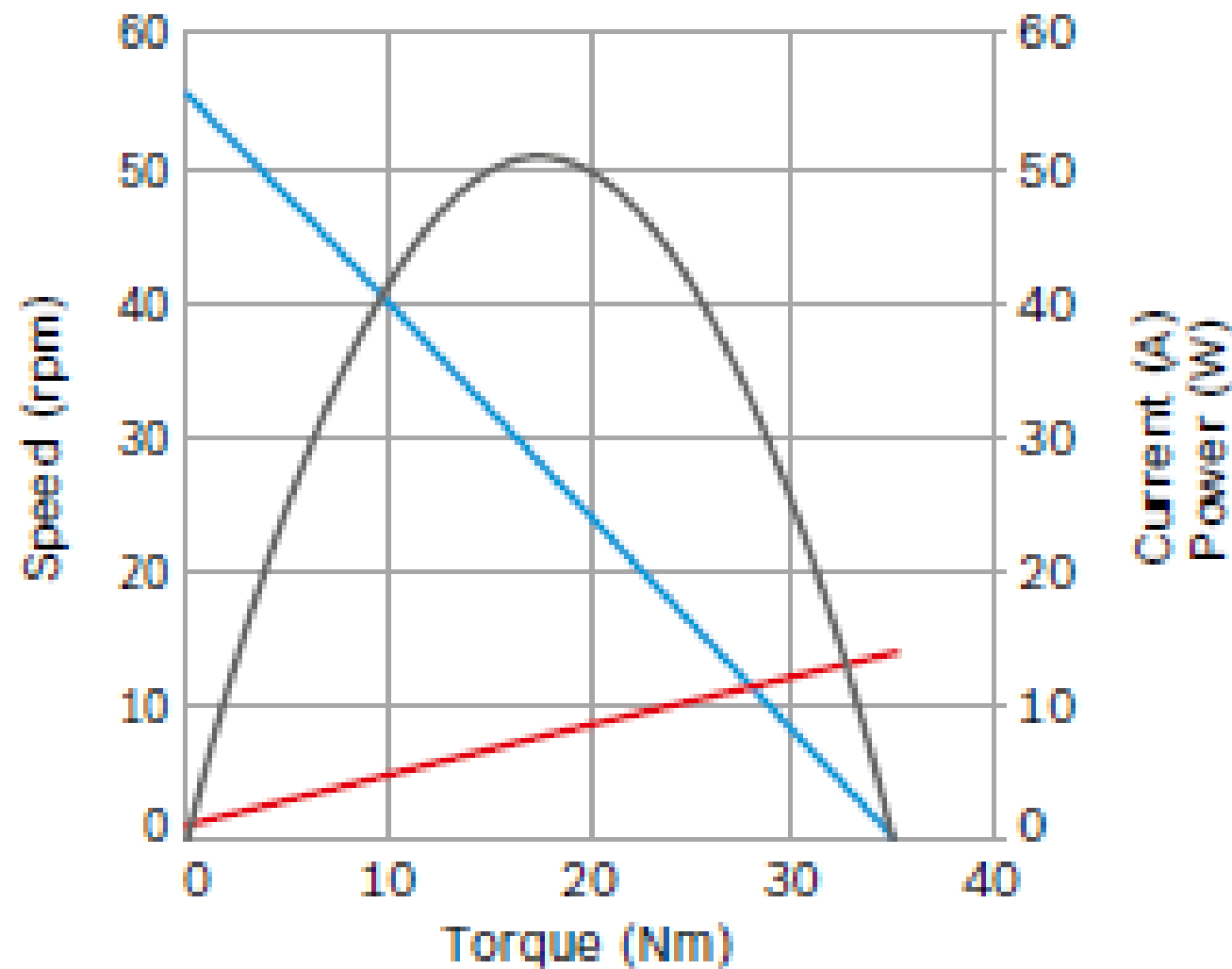
O motor F006.WMO.310 são igualmente flexíveis nas áreas de: assistência médica e odontológicas, bem-estar, engenharia de instalações, móveis, alimentos e bebidas.



	Part number	P _n (Nominal power)	I _n (Nominal current)	n _n (Nominal speed)	M _n (Nominal torque)	M _a (Stall torque)	Gear ratio	Direction of rotation	Signal	Side**	Dimensional drawing (D)	Wiring diagram (W)	Drive end (S)	Connector (C)	Performance curve (P)
		W	A	rpm	Nm	Nm			Hall						
12 V	F 006 B20 145*	6.7 ; 10.5	3.5 ; 5.5	32 ; 50	2	23 ; 20	63:1	CCW	No	L	D1	W1	S1	C1	P3
	F 006 B20 048*	6.9 ; 10.7	2 ; 3	33 ; 51	2	30 ; 23	63:1	CCW	No	L	D1	W2	S1	C2	P1
	F 006 B20 064*	6.9 ; 10.7	2 ; 3	33 ; 51	2	30 ; 23	63:1	CCW	No	L	D1	W2	S1	–	P1
	F 006 B20 146*	6.9 ; 10.7	2 ; 3	33 ; 51	2	30 ; 23	63:1	CCW	No	L	D1	W1	S1	C1	P5
	F 006 B20 106	9.8	3.5	47	2	32.5	79:1	CCW/CW	No	L	D2	W3	S3	C3	P2
	F 006 B20 360	16	2.4	51	3	35	63:1	CCW/CW	Yes	R	D3	W5	S2	C4	P4
	F 006 WMO 310	16	2.4	51	3	35	63:1	CCW/CW	No	R	D3	W4	S2	–	P4

* Motors with two speeds / ** gear housing left: L, gear housing right: R

P4



Aula Prática 07

Aula 08 - Prática

- ✓ Dimensionar os esforços, torque/potência e selecionar o motor para o projeto específico de cada aluno.

Etapas do dimensionamento de motores

Objetivos da movimentação;

- ✓ Definição do sistema;
- ✓ Seleção dos componentes mecânicos;
- ✓ Seleção do motor;
- ✓ Cálculo da carga.

Sistema: configuração dos componentes.

Cinemática: perfil de velocidade,
velocidade máxima da carga,
rotação máxima do motor,
aceleração da carga,
aceleração do motor.

Dinâmica: massa, inércia,
força, torque.

Crítérios: rotação,
razão de inércia,
torque

Exemplos

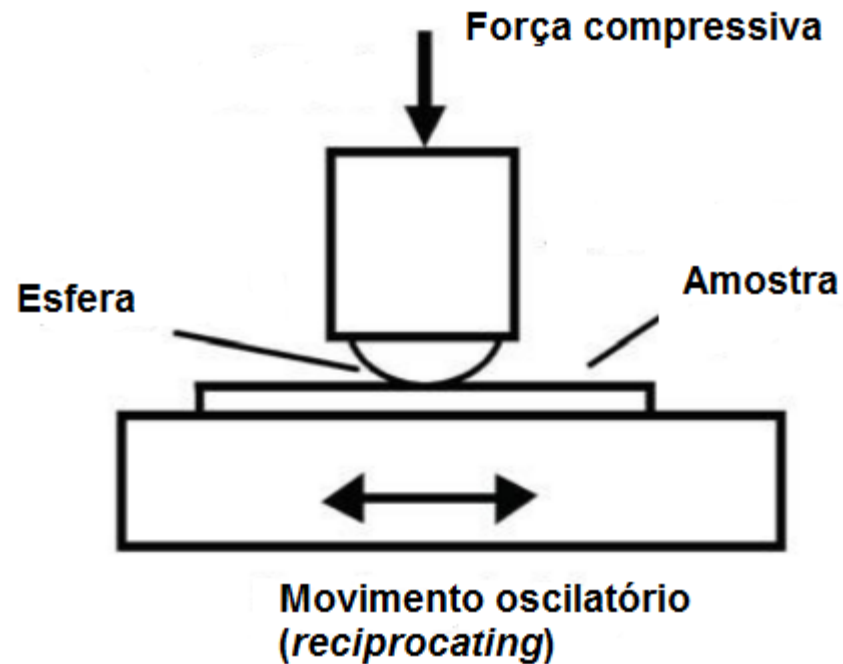
Exemplo 1 – Seleção de ServoMotor DC

Autores:

Eng. Marcos Paulo Gonçalves Pedroso

Prof. Carlos Alberto Fortulan

Dimensionamento de servo motor para máquina *reciprocating*



Frequência máxima : 2 Hz

Deslocamento máximo: $\Delta s = 50 \text{ mm}$

Carga máxima: $F_c = 50 \text{ N}$

Coeficiente de atrito máximo: $\mu = 4$

Requisitos: frequência, curso, carga e coeficiente de atrito.

Sistema: configuração dos componentes.

Cinemática: perfil de velocidade,
velocidade máxima da carga,
rotação máxima do motor,
aceleração da carga,
aceleração do motor.

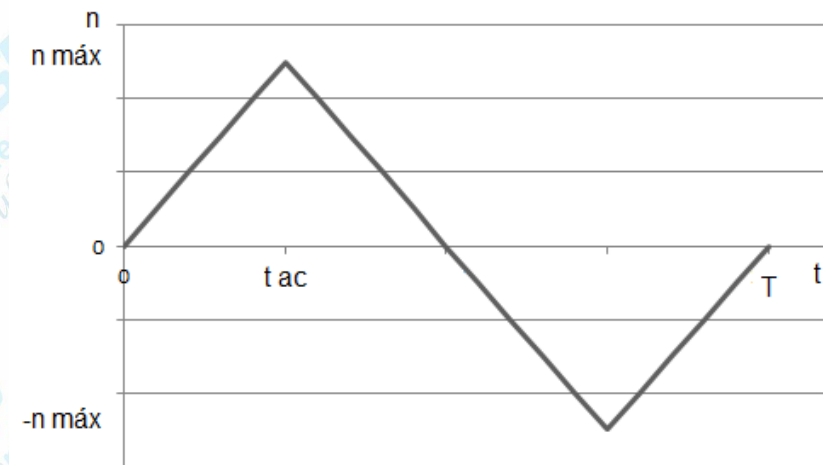
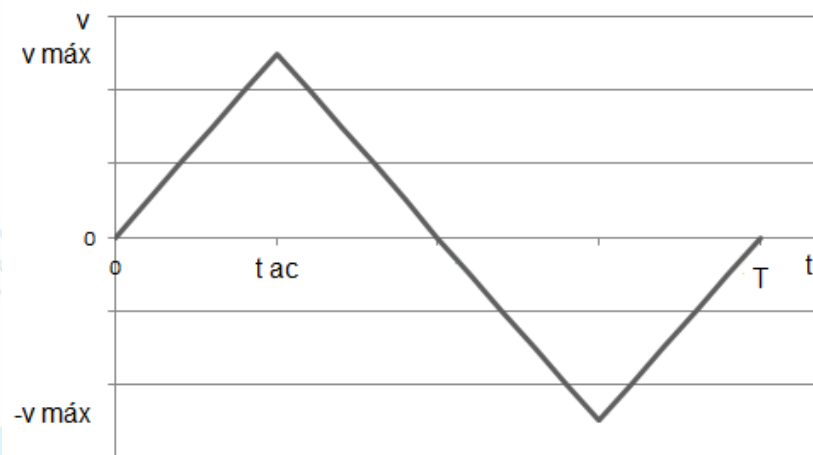
Dinâmica: massa, inércia,
força, torque.

Crítérios: rotação,
razão de inércia,
torque máximo,
torque RMS.



Sistema

Perfil de movimento da carga → Perfil de movimento do motor mecânico

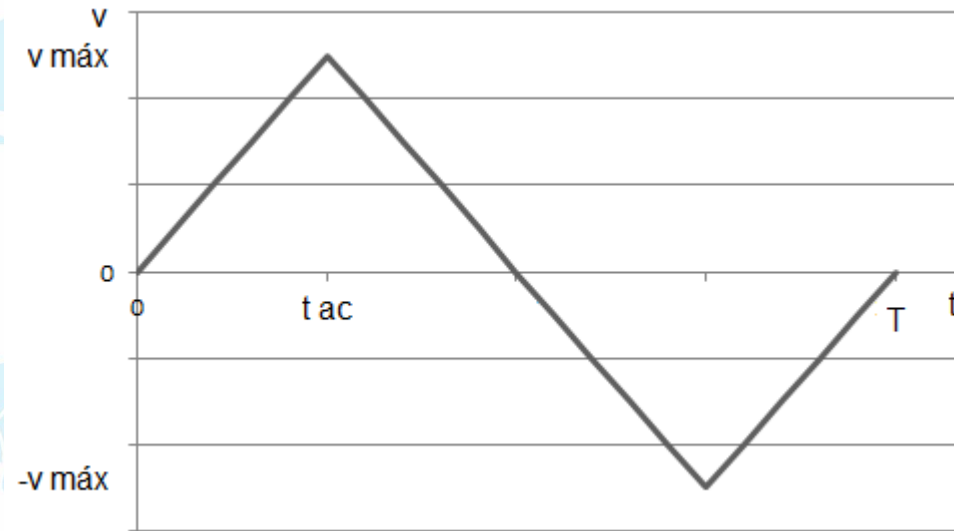


Cinemática: determinação do perfil de movimento da carga

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{2} = 0,5s$$

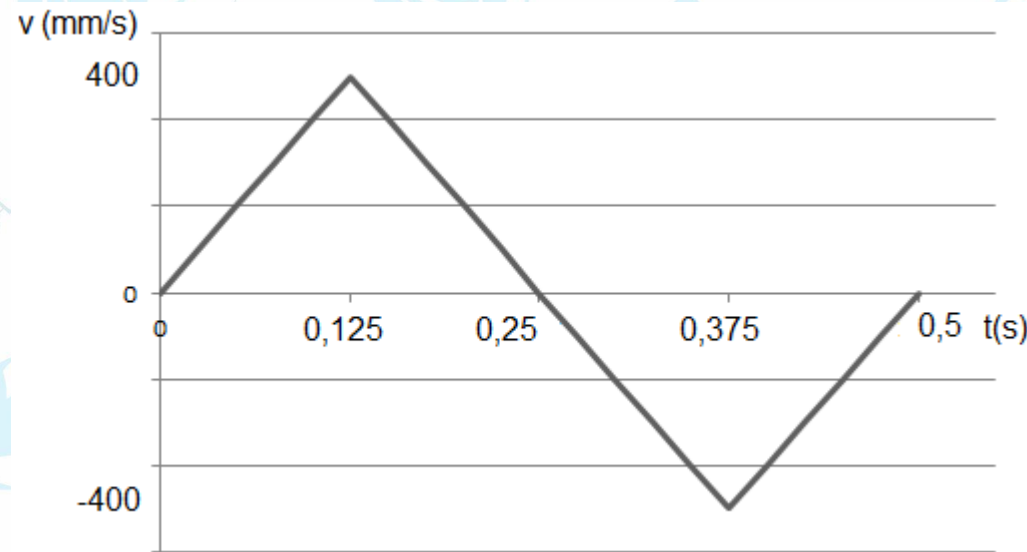
$$tac = tdes = \frac{T}{4} = \frac{0,5}{4} = 0,125s$$

$$\Delta s = \frac{b.h}{2} = \frac{\Delta t.v_{m\acute{a}x}}{2} \rightarrow v_{m\acute{a}x} = \frac{2.\Delta s}{2tac} = \frac{2.50}{2.0,125} = 400\text{ mm/s}$$



Perfil de movimento da carga

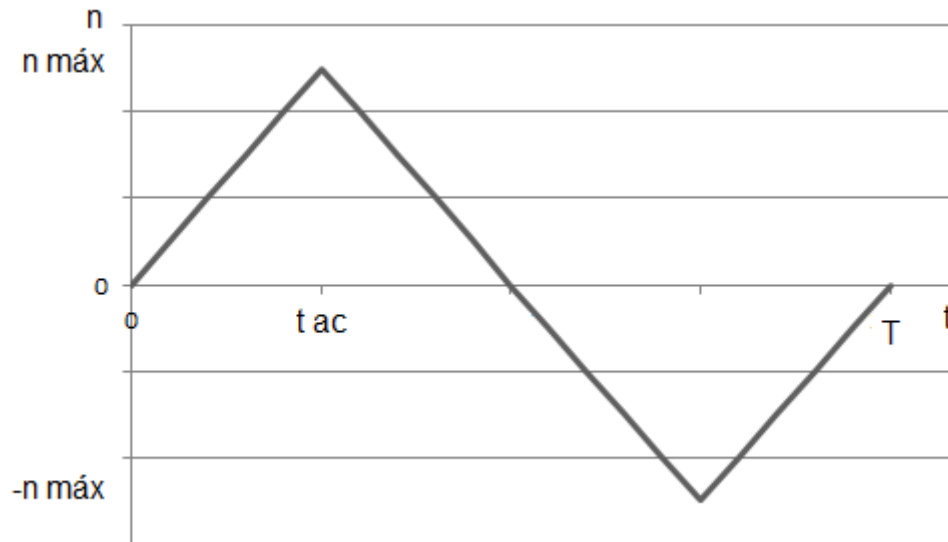
Cinemática: determinação do perfil de movimento da carga



Perfil de movimento da carga determinado

$$a = \frac{v_{\text{máx}}}{t_{ac}} = \frac{0,4}{0,125} = 3,2 \text{ m} / \text{s}^2$$

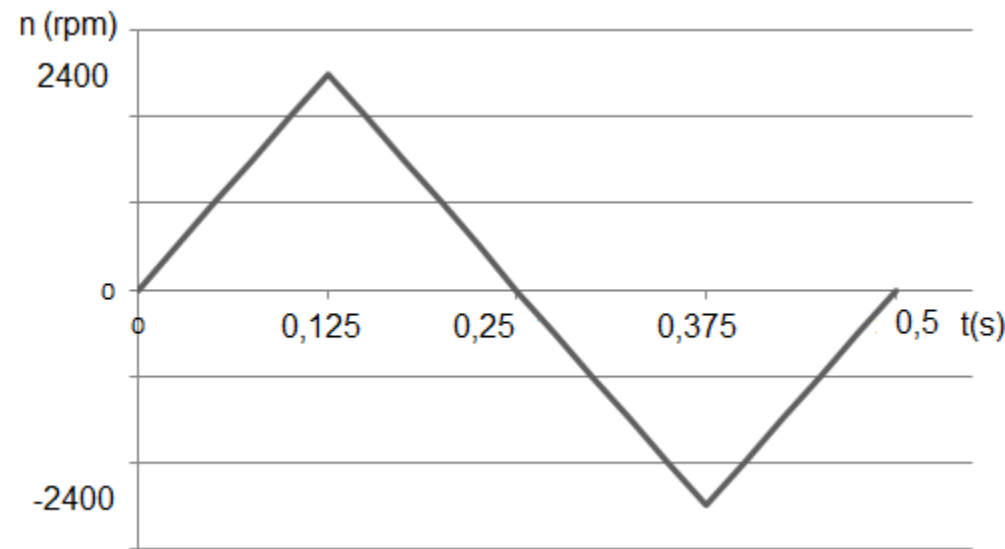
Cinemática: determinação do perfil de movimento do motor



Perfil de movimento do motor

$$v_{\text{máx}} = \frac{p \cdot n_{f,\text{máx}}}{60} \rightarrow n_{f,\text{máx}} = \frac{60 \cdot v_{\text{máx}}}{p} = \frac{60 \cdot 400}{10} = 2400 \text{rpm}$$

Cinemática: determinação do perfil de movimento do motor

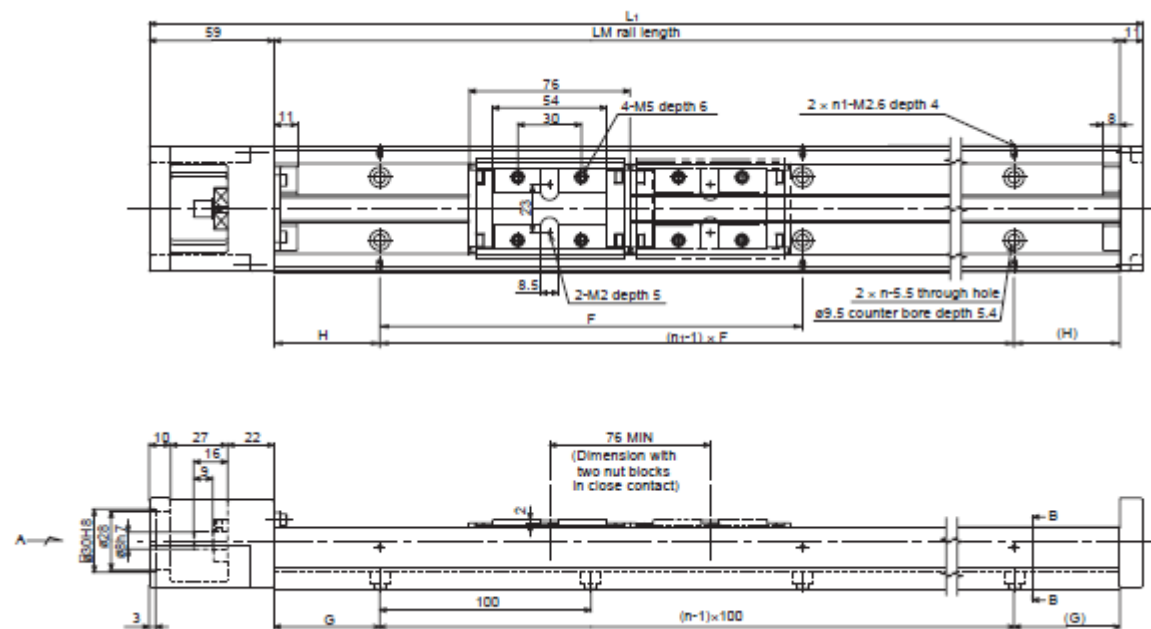


Perfil de movimento do motor determinado

$$\alpha_m = \frac{\pi \cdot n_{m,máx}}{30 \cdot t_{ac}} = \frac{\pi \cdot 2400}{30 \cdot 0,125} = 2010,6 \text{ rad} / \text{s}^2$$

Dinâmica: determinação da massa e da inércia do sistema

$$M = 2 \text{ kg}$$



LM Rail Length (mm)	Overall Length L ₁ (mm)	Available Stroke Range (mm)		H (mm)	G (mm)	F (mm)	n	n ₁	Overall main unit mass (kg)	
		Type A	Type B						Type A	Type B
150	220	55	—	25	25	100	2	2	1.7	—
200	270	105	—	50	50	100	2	2	2.1	—
300	370	205	129	50	50	200	3	2	2.8	3.1
400	470	305	229	100	50	200	4	2	3.5	3.8
500	570	405	329	50	50	200	5	3	4.2	4.5
600	670	505	429	100	50	200	6	3	5.0	5.3
700	770	605	529	50	50	200	7	4	5.7	6.0

Dinâmica: determinação da massa e da inércia do sistema

$$J_c = J_a + J_f + J_m$$

$$J_a = \frac{\rho \cdot \pi \cdot l \cdot d^4}{32} \rightarrow J_a = 9 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_f = \frac{\rho \cdot \pi \cdot l \cdot d^4}{32} \rightarrow J_f = 5 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_m = M \cdot \left(\frac{p}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

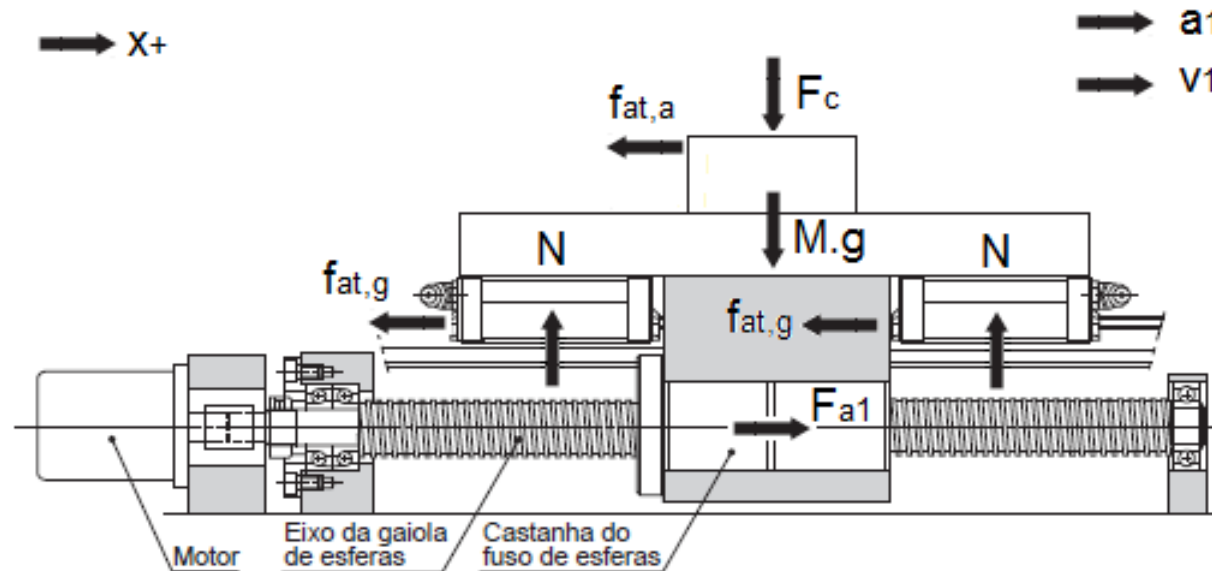
Dinâmica: determinação da massa e da inércia do sistema

$$J_{c \rightarrow m} = J_c = 9.10^{-6} + 4,9.10^{-6} + 5,1.10^{-6} = 1,9.10^{-5} \text{ kg.m}^2$$

Dinâmica: determinação da força axial no fuso de esferas

Movimento progressivo acelerado:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = M \cdot a_x \rightarrow f_{a1} - f_{at,a} - f_{at,g} = M \cdot a_1 \\ \sum F_y = 0 \rightarrow N - M \cdot g - F_c = 0 \\ f_{at,a} = \mu_a \cdot F_c \quad \longrightarrow X+ \\ f_{at,g} = f + \mu_g \cdot N \end{array} \right.$$



Dinâmica: determinação da força axial no fuso de esferas

Movimento progressivo acelerado:

$$F_{a1} = \mu_a \cdot F_c + [f + \mu_g \cdot (M \cdot g + F_c)] + Ma_1 \rightarrow F_{a1} = 211,5 N$$

Movimento progressivo retardado:

$$F_{a2} = \mu_a \cdot F_c + [f + \mu_g \cdot (M \cdot g + F_c)] - Ma_2 \rightarrow F_{a2} = 198,7 N$$

Movimento regressivo acelerado:

$$F_{a3} = -\mu_a \cdot F_c - [f + \mu_g \cdot (M \cdot g + F_c)] - Ma_3 \rightarrow F_{a3} = -211,5 N$$

Movimento regressivo retardado:

$$F_{a4} = -\mu_a \cdot F_c - [f + \mu_g \cdot (M \cdot g + F_c)] + Ma_4 \rightarrow F_{a4} = -198,7 N$$

Dinâmica: determinação do torque de atrito

Movimento progressivo acelerado:

$$T_1 = \frac{F_{a1}}{\eta \cdot i} \cdot \frac{p}{2 \cdot \pi} = \frac{211,5}{0,85 \cdot 1} \cdot \frac{10 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 0,3739 \text{ N.m}$$

Movimento progressivo retardado:

$$T_2 = \frac{F_{a2}}{\eta \cdot i} \cdot \frac{p}{2 \cdot \pi} = \frac{198,7}{0,9 \cdot 1} \cdot \frac{10 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} = 0,3513 \text{ N.m}$$

Dinâmica: determinação do torque de atrito

Movimento regressivo acelerado:

$$T_3 = \frac{F_{a3}}{\eta \cdot i} \cdot \frac{p}{2\pi} = \frac{-211,5}{0,9 \cdot 1} \cdot \frac{10 \cdot 10^{-3}}{2\pi} = -0,3739 \text{ N.m}$$

Movimento regressivo retardado:

$$T_4 = \frac{F_{a4}}{\eta \cdot i} \cdot \frac{p}{2\pi} = \frac{-198,7}{0,9 \cdot 1} \cdot \frac{10 \cdot 10^{-3}}{2\pi} = -0,3513 \text{ N.m}$$

Dinâmica: determinação da razão de inércia e do torque de aceleração

Razão de inércia:

$$r = \frac{J_{c \rightarrow m}}{J_r} \leq 10 \rightarrow J_r \geq \frac{J_{c \rightarrow m}}{10} \therefore J_r \geq 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^2$$

Seleciona-se então o servo motor ECMA C2041, com:

$$J_r = 3,7 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^2$$

Torque de aceleração:

$$\begin{aligned} T_{ac} &= (J_r + J_{c \rightarrow m}) \cdot \alpha = (3,7 \cdot 10^{-6} + 1,9 \cdot 10^{-5}) \cdot 2010,6 \\ &= 0,0455 \text{ N.m} \end{aligned}$$

Dinâmica: determinação dos torques totais para cada trecho do movimento

Movimento progressivo acelerado:

$$T_{1t} = T_1 + T_{ac} = 0,3739 + 0,0455 = 0,4194 N.m$$

Movimento progressivo retardado:

$$T_{2t} = T_2 - T_{ac} = 0,3513 - 0,0455 = 0,3058 N.m$$

Movimento regressivo acelerado:

$$T_{3t} = T_3 - T_{ac} = -0,3739 - 0,0455 = -0,4194 N.m$$

Movimento regressivo retardado:

$$T_{4t} = T_4 + T_{ac} = -0,3513 + 0,0455 = -0,3058 N.m$$

Dinâmica: determinação do torque máximo e do torque RMS

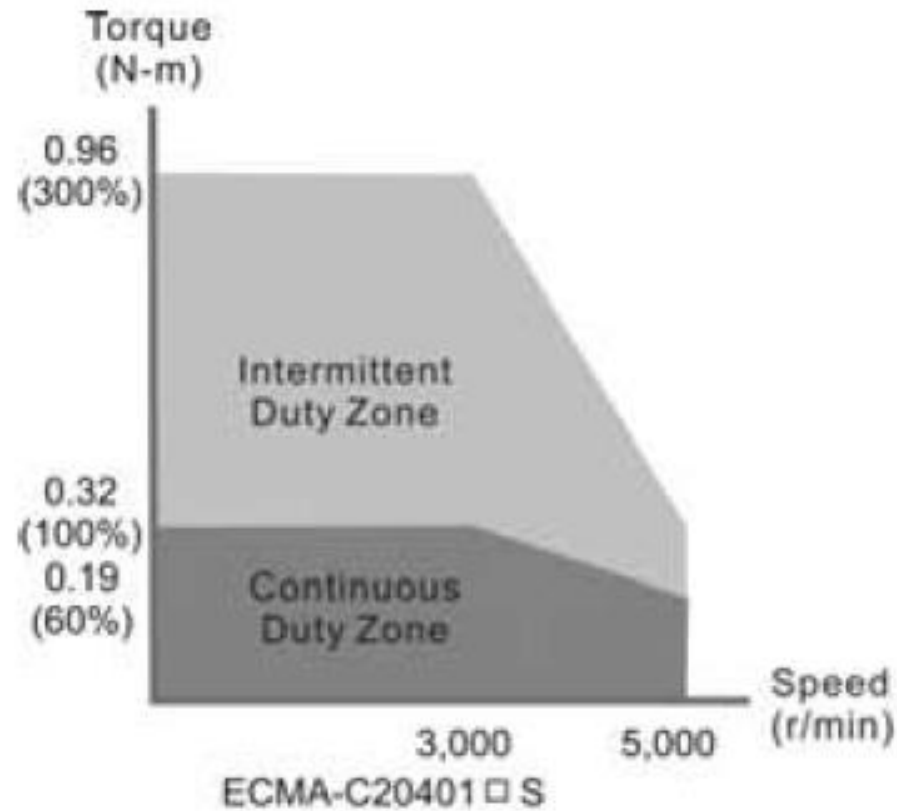
Torque máximo:

$$T_{\text{máx}} = 0,4194 \text{ N.m}$$

Torque RMS:

$$T_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\Delta t_1 \cdot T_1^2 + \Delta t_2 \cdot T_2^2 + \Delta t_3 \cdot T_3^2 + \Delta t_4 \cdot T_4^2}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4}} =$$
$$\sqrt{\frac{0,125 \cdot (0,4194^2) + 0,125 \cdot (0,3058^2) + 0,125 \cdot (-0,4194^2) + 0,125 \cdot (-0,3058^2)}{0,125 + 0,125 + 0,125 + 0,125}} =$$
$$0,3670 \text{ N.m}$$

Curva torque x rotação para servo motor ECMA C2041:



Crítérios para dimensionamento de servo motores:

Rotação:

$$n_{\text{máx},m} \leq n_{\text{máx},nom} \rightarrow 2400 \leq 3000 \text{rpm} \quad \text{OK}$$

Torque máximo:

$$T_{\text{máx},m} \leq T_{\text{máx},nom} \rightarrow 0,4194 \leq 0,96 \text{N.m} \quad \text{OK}$$

Razão de inércia:

$$r = \frac{J_{c \rightarrow m}}{J_r} \leq 10 \rightarrow r = \frac{1,9 \cdot 10^{-5}}{3,7 \cdot 10^{-6}} = 5,1 \quad \text{OK}$$

Torque RMS:

$$T_{\text{RMS}} \leq T_{\text{RMS},nom} \rightarrow 0,3670 \geq 0,32 \text{N.m} \quad \text{X}$$

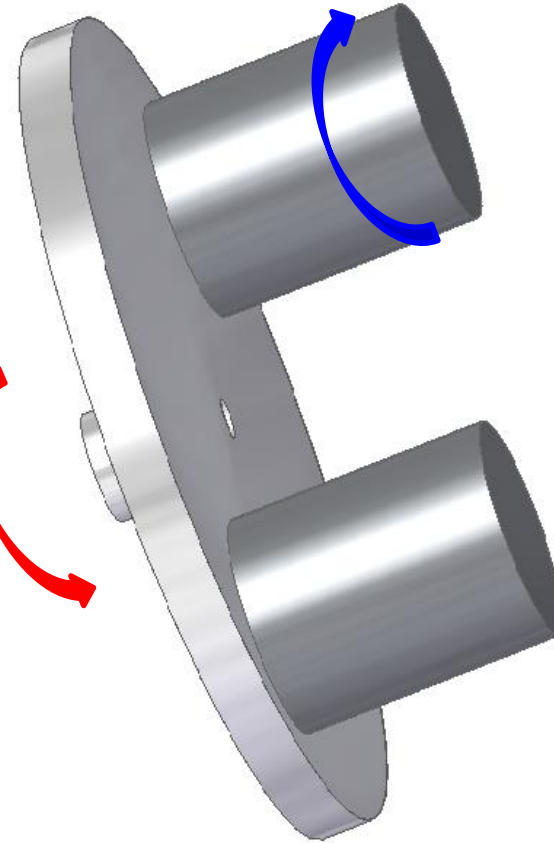
Exemplo 2 – Seleção de Motores Assíncronos

Autores:

Prof. Carlos Alberto Fortulan

Eng. Ítalo Leite de Camargo

Critério: Toque → Considere um moinho onde o esboço da carga é representado pela figura 1



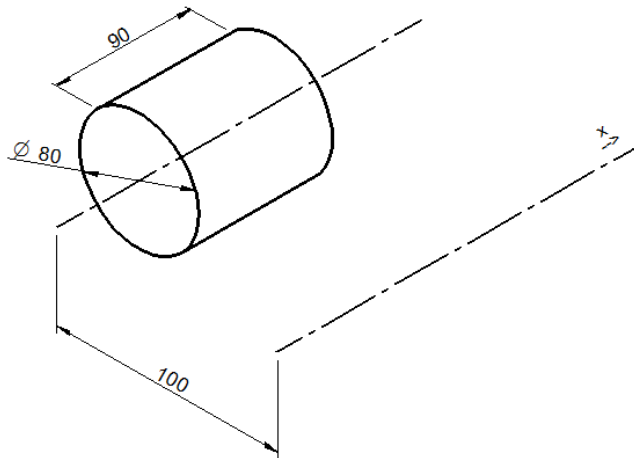
O modelo de carga do equipamento como esquematizado na figura 2, a base tem 300mm de diâmetro e 20mm de espessura.

O jarro com o material foi considerado como uma carga 4 kg disposta a 100 mm do centro de rotação do eixo principal

Momento de Inércia

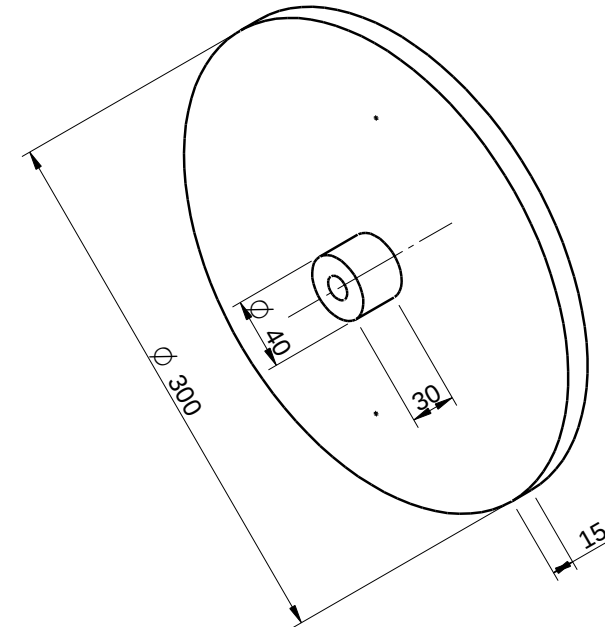
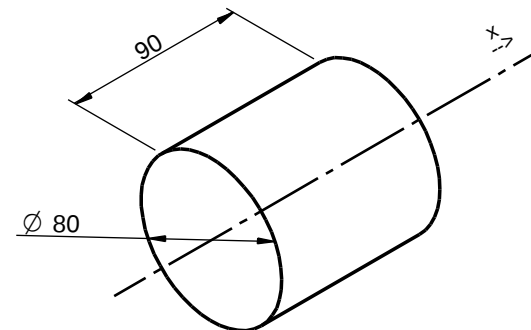
Base: $I_{xx}=0,032 \text{ kg.m}^2$
(Alumínio: 6061-T6)

Massa ~ 3,912 kg



Jarro: ~2kg
No conjunto
 $I_{xx}=0,022 \text{ kg.m}^2$

Jarro: ~2kg
Próprio eixo
 $I_{xx}=0,002 \text{ kg.m}^2$



Conjugado da Carga

Como situação mais crítica foi escolhido a rotação do jarro em 1000rpm e do motor em 3000rpm
Então para pré dimensionamento selecionou tempo de aceleração em 10 s.

$$T = I.\alpha \text{ [N.m]} \quad I = m.r^2 \quad [\text{kg.m}^2] \quad \alpha = \frac{\omega}{\text{tempo}}$$

$$T = m.\alpha.R^2$$

T : Torque, N.m;

m : Massa, kg;

α : Aceleração angular, rad/s^2 ;

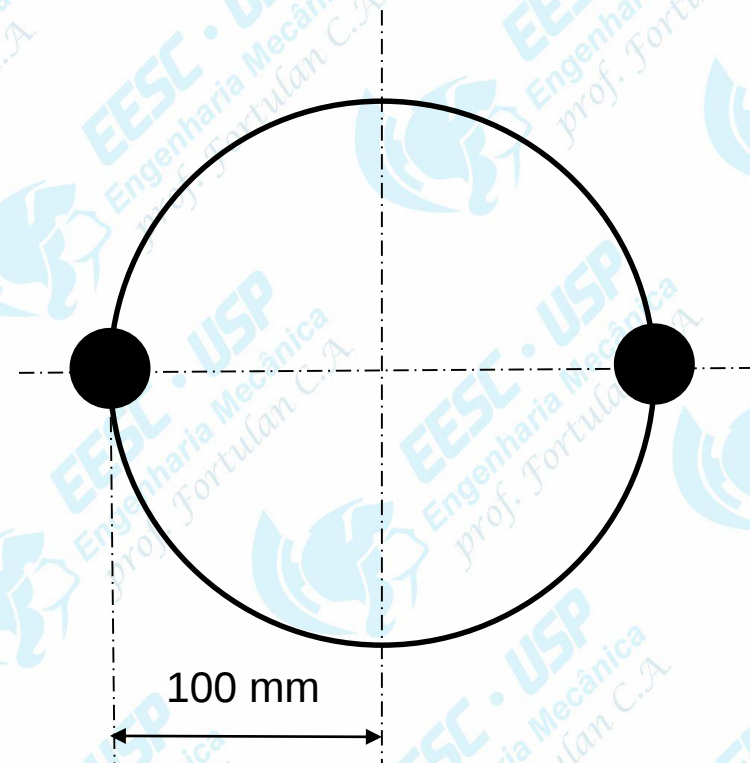
R : Raio, m.

$$\omega = \frac{\text{ângulo descrito}}{\text{tempo}} = 2\pi.f = 2\pi.n$$

$$\alpha_{\text{conjunto}} = \frac{2\pi.n}{\text{tempo}} = \frac{2\pi.3000}{10.60} = 31,4 \text{ rad/s}^2$$

$$\alpha_{\text{jarro}} = \frac{2\pi.n}{\text{tempo}} = \frac{2\pi.1000}{10.60} = 10,5 \text{ rad/s}^2$$

$$T_{\text{total}} = T_{\text{motor}} + \{T_{\text{base}} + T_{\text{jarro1}} + T_{\text{jarro2}}\}_{\text{conjunto}} + \{T_{\text{jarro1}}\}_{\text{próprio eixo}}$$



$$T_{total} = \{T_{base} + T_{jarro1} + T_{jarro2}\}_{conjunto} + \{T_{jarro1}\}_{próprio\ eixo}$$

$$T_{base} = I_{base} \cdot \alpha_{conjunto} = 0,032.31,4 = 1,0 \quad N.m$$

$$T_{jarro_conjunto} = I_{jarro_conjunto} \cdot \alpha_{conjunto} = 0,022.31,4 = 0,7 \quad N.m$$

$$T_{jarro_próprio_eixo} = I_{jarro_próprio_eixo} \cdot \alpha_{jarro} = 0,002.20,9 = 0,04 \quad N.m$$

$$T_{total} = \{1,0 + 0,7 + 0,7\}_{conjunto} + \{0,04\}_{próprio\ eixo} = 2,44 N.m$$

Dimensionamento de motor Assíncrono

Conjugado=Torque

Potência Nominal

$$P_{total} = P_{motor} + P_{conjunto} + 2 \cdot \frac{P_{jarro_proprio_eixo}}{\eta}$$

η = eficiência da transmissão

P_n = potência nominal em watts

n = rotação nominal do motor em rps

C_n = conjugado nominal da carga em N.m

$$P_n = 2\pi \cdot n \cdot C_n$$

$$P_{conjunto} = 2\pi \cdot \frac{3000}{60} \cdot 2,4 = 754W$$

$$P_{jarro_proprio_eixo} = 2\pi \cdot \frac{1000}{60} \cdot 0,4 = 42W$$

$$P_n = P_{motor} + 754 + \frac{42}{0,95 \cdot 0,95} = P_{motor} + 800W = P_{motor} + 1CV$$

Pré Seleção do Motor

W22 IR3 Premium

Características

- Carcaça: **71**
- Potência: **1 HP**
- Frequência: **60 Hz**
- Polos: **2**
- Rotação nominal: **3425**
- Escorregamento: **4,86 %**
- Tensão nominal: **220/380 V**
- Corrente nominal: **2,82/1,63 A**
- Corrente de partida: **19,7/11,4 A**
- Ip / In: **7,0**
- Corrente a vazio: **1,55/0,897 A**
- Conjugado nominal: **2,09 Nm**
- Conjugado de partida: **340 %**
- Conjugado máximo: **360 %**
- Categoria: ---
- Classe de isolamento: **F**
- Elevação de Temperatura: **80 K**
- Tempo de Rotor Bloqueado: **17 s (quente)**
- Fator de serviço: **1,25**
- Regime de serviço: **S1**
- Temperatura Ambiente: **-20°C – +40°C**
- Altitude: **1000 m**
- Proteção: **IP55**
- Massa aproximada: **9 kg**
- Momento de inércia: **0,00051 kgm²**
- Nível de ruído: **60 dB(A)**

Adicionando o motor

$$T_{\text{motor}} = I_{\text{motor}} \cdot \alpha_{\text{conjunto}} = 0,0005131,4 = 0,016 \quad \text{N.m}$$

$$P_{\text{motor}} = 2\pi \cdot \frac{3000}{60} \cdot 0,016 = 5\text{W}$$

$$P_n = P_{\text{motor}} + 800\text{W} = 5 + 800 = 805\text{W}$$

Conjugado Resistente parabólico:

Nesse caso o conjugado de carga se comporta como uma parábola em função da velocidade:

$$C_r = C_0 + k * w^2$$

Note que nos slides anteriores, já foram calculados o conjugado médio $C_{medio} = 2.440 + 0.016 = 2.456$ (Ttotal+Tmotor).

$$C_{rmed} = \frac{\int_{w_1}^{w_2} C_r dw}{w_2 - w_1}$$

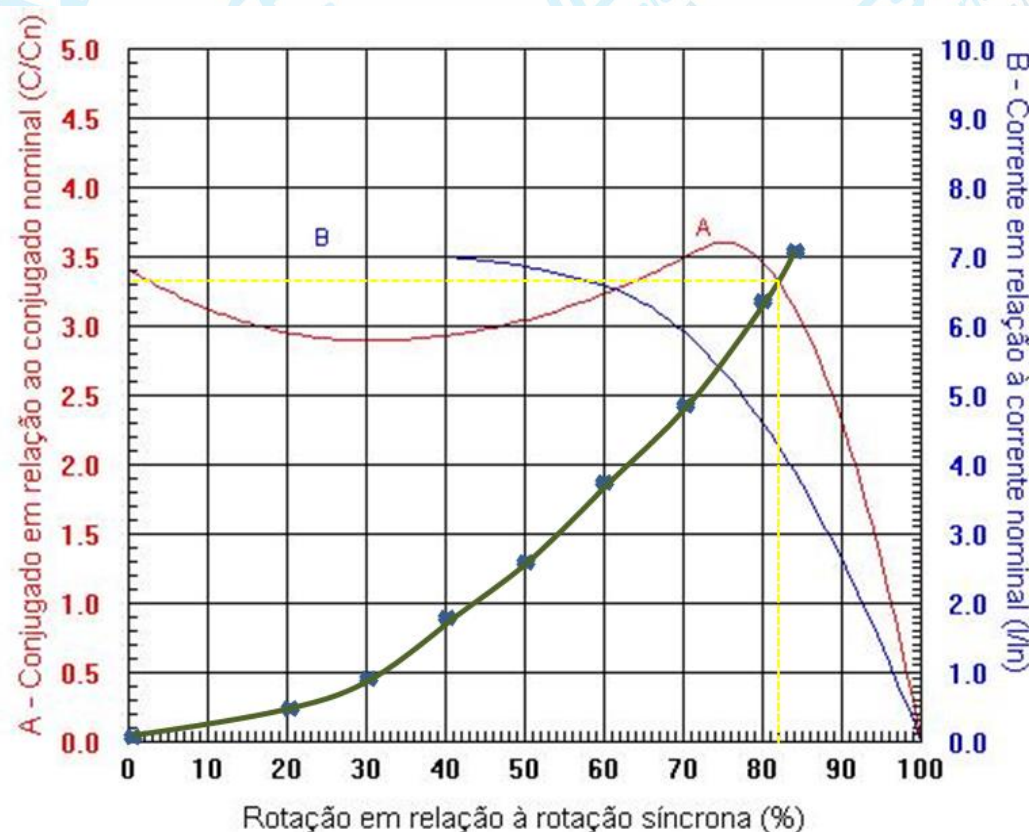
Considerando o conjugado C_0 desprezível e o intervalo considerado entre $w_1 = 0$ até $w_2 = 3000$ rpm

$$C_{rmed} = \frac{\int_0^{w_2} k * w^2 dw}{w_2 - 0} = \frac{k * w_2^2}{3} = 2,456$$

Desta forma, substituindo w_2 , podemos encontrar o K e temos a equação do Conjugado Resistente

Conjugado do Motor x Conjugado de Resistência (Carga):

Conjugado de Resistência (em verde) comparativamente ao Conjugado do Motor fornecido pelo fabricante (em Vermelho).



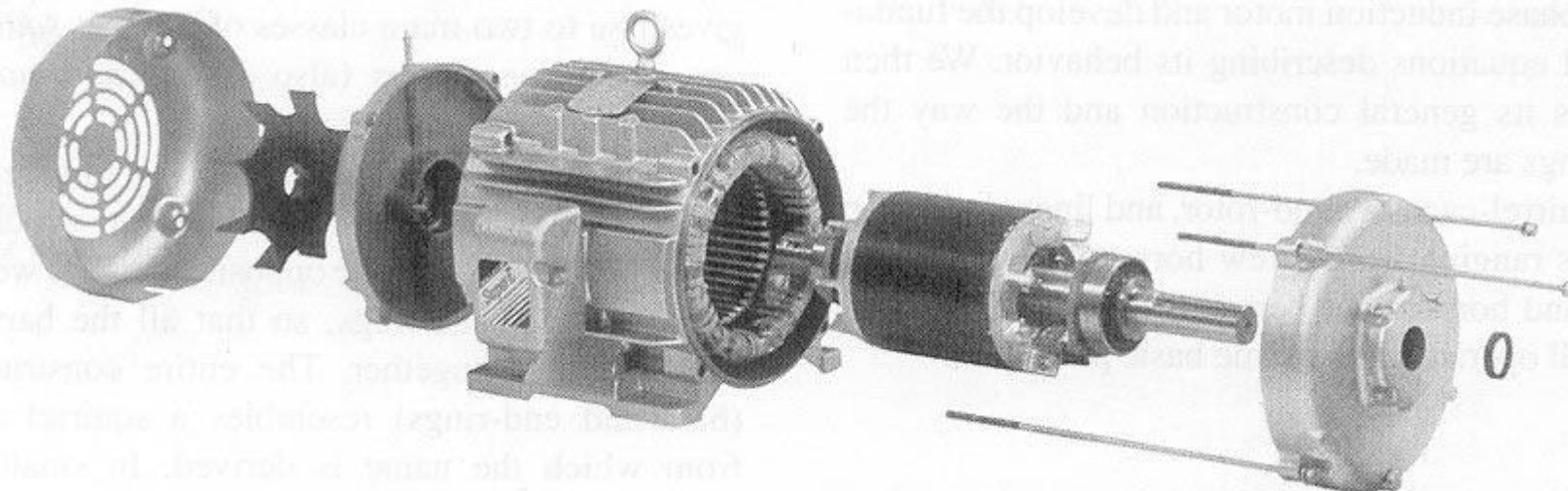
O ponto de funcionamento (linhas tracejadas amarelas) será de aproximadamente 82% da velocidade síncrona do motor (2950 rpm)

Apêndices

Motor de Corrente Alternada - Assíncronos

Constituintes principais:

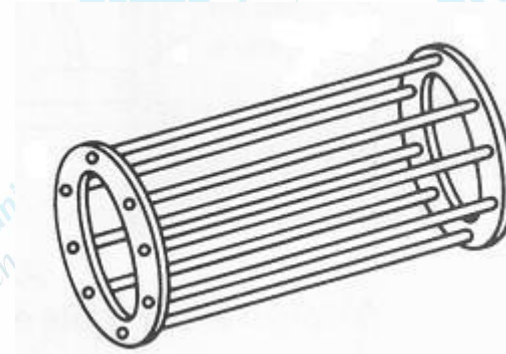
- **Estator** - que consiste em uma estrutura de aço que suporta um núcleo de lâminas empilhadas que tem ranhuras na circunferência interna para enrolamento do estator.
- **Rotor** - também composta de lâminas perfuradas, com ranhuras para o enrolamento do rotor.



Existem dois tipos de enrolamentos do rotor:

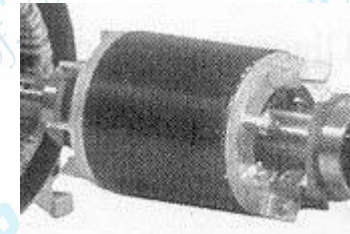
- Gaiola - que produz uma indução na gaiola de esquilo (mais comum)
- Convencionais (ferida) enrolamentos das três fases feitos com fio isolado, que produzem uma indução no rotor também enrolado (características especiais)

Rotor gaiola de esquilo é constituído por barras de cobre, um pouco maior que o rotor. É o bobinado do motor.



As extremidades são soldadas aos anéis de extremidade de cobre, de modo que todas as barras são curto-circuitadas.

Em pequenos motores, as barras e os anéis finais são em alumínio moldado sob pressão para formar um bloco integral.



C_o : Conjugado básico - é o conjugado calculado em função da potência e velocidade síncrona.

$$C_o \text{ (Kgfm)} = \frac{716 \cdot P \text{ (cv)}}{n_s \text{ (rpm)}} = \frac{974 \cdot P \text{ (kW)}}{n_s \text{ (rpm)}}$$

$$C_o \text{ (Nm)} = \frac{7024 \cdot P \text{ (cv)}}{n_s \text{ (rpm)}} = \frac{9555 \cdot P \text{ (kW)}}{n_s \text{ (rpm)}}$$

C_n : Conjugado nominal ou de plena carga - é o conjugado desenvolvido pelo motor à potência nominal, sob tensão e frequência nominais.

C_p : Conjugado com rotor bloqueado ou conjugado de partida ou conjugado de arranque - é o conjugado mínimo desenvolvido pelo motor bloqueado, para todas as posições angulares do rotor, sob tensão e frequência nominais.

$$C_p \text{ (\%)} = \frac{C_p \text{ (Nm)}}{C_n \text{ (Nm)}} \cdot 100$$

C_{min}: Conjugado mínimo - é o menor conjugado desenvolvido pelo motor ao acelerar desde a velocidade zero até a velocidade correspondente ao conjugado máximo. Na prática, este valor não deve ser muito baixo, isto é, a curva não deve apresentar uma depressão acentuada na aceleração, para que a partida não seja muito demorada, sobreaquecendo o motor, especialmente nos casos de alta inércia ou partida com tensão reduzida.

C_{máx}: Conjugado máximo - é o maior conjugado desenvolvido pelo motor, sob tensão e frequência nominal, sem queda brusca de velocidade. Na prática, o conjugado máximo deve ser o mais alto possível, por duas razões principais:

- 1) O motor deve ser capaz de vencer, sem grandes dificuldades, eventuais picos de carga como pode acontecer em certas aplicações, como em britadores, calandras, misturadores e outras.
- 2) O motor não deve arriar, isto é, perder bruscamente a velocidade, quando ocorrem quedas de tensão, momentaneamente, excessivas.

Conjugado Resistente de Carga:

O conjugado resistente da carga é o conjugado requerido pela carga para movimentá-la em função da velocidade, neste conjugado está incluído o conjugado útil que a carga utiliza como também o conjugado das perdas, que é diferente para cada carga, devido às perdas por atrito da carga.

Esse conjugado pode ser considerado como o mais complexo, pois cada tipo de situação desempenha um conjugado diferente, por exemplo, um misturador conjugado desenvolve um conjugado parabólico em relação à velocidade do motor. O conjugado resistente ainda pode ser constante, linear, hiperbólico ou indefinido.

Na prática, é suficiente que se calcule graficamente o conjugado médio, isto é, a diferença entre a média do conjugado do motor e a média do conjugado da carga. Essa média pode ser obtida, graficamente, bastando que se observe que a soma das áreas A_1 e A_2 seja igual a área A_3 e que a área B_1 seja igual a área B_2 (ver figura 4.5).

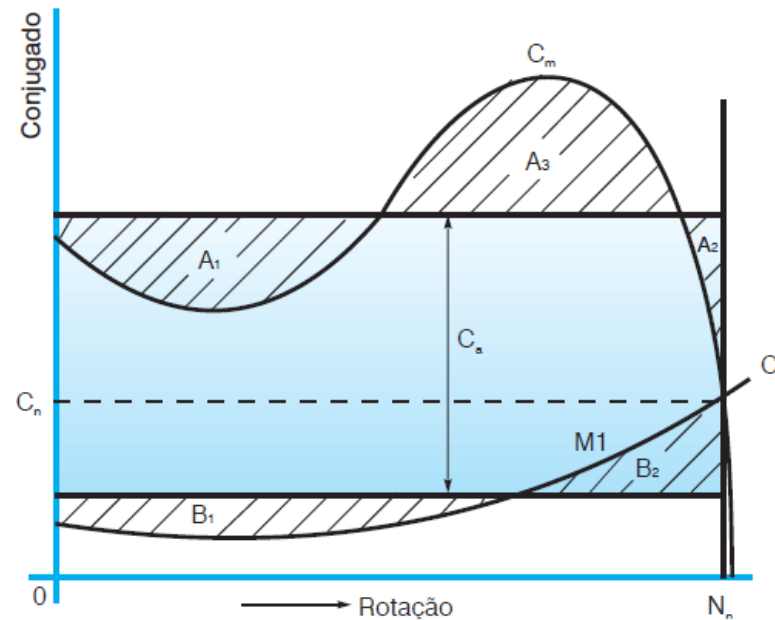


Figura 4.5 - Determinação gráfica do conjugado médio de aceleração

- C_n = Conjugado nominal
- C_m = Conjugado do motor
- C_r = Conjugado da carga
- C_a = Conjugado médio de aceleração
- N_n = Rotação nominal

Escorregamento (s) é a diferença entre a velocidade do motor (n) e a velocidade síncrona (n_s). Se o motor gira a uma velocidade diferente da velocidade síncrona, ou seja, diferente da velocidade do campo girante, o enrolamento do rotor “corta” as linhas de força magnética do campo e, pelas leis do eletromagnetismo, circularão nele correntes induzidas. Quanto maior a carga, maior terá que ser o torque necessário para acioná-la.

$$s \text{ (rpm)} = n_s - n ; \quad s = \frac{n_s - n}{n_s} ; \quad s \text{ (%) } = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100$$

Para um dado escorregamento a velocidade do motor será;

$$n = n_s \cdot \left(1 - \frac{s \text{ (%)}}{100}\right)$$

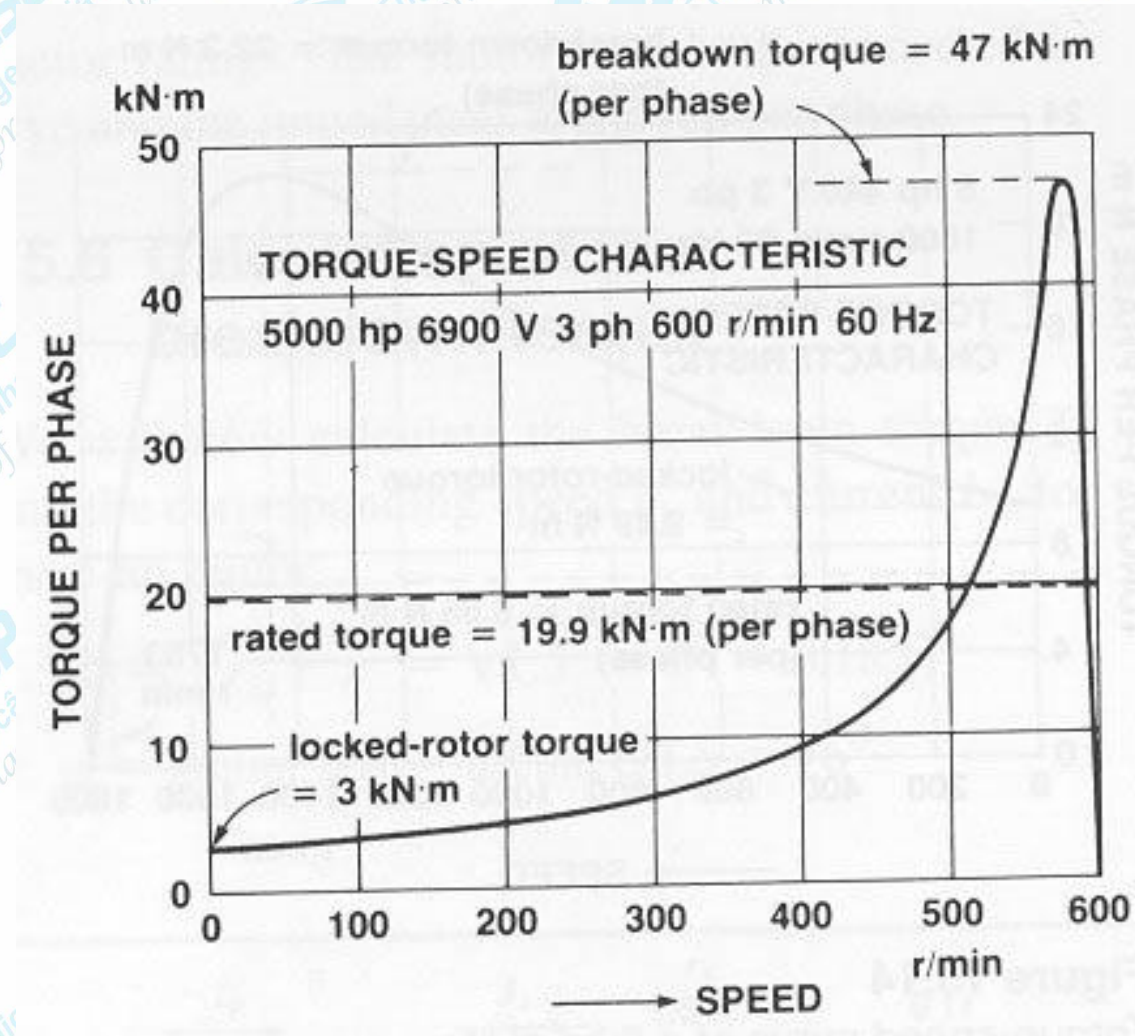
Tempo de Aceleração – tempo desenvolvido desde o instante em que o equipamento é acionado até ser atingida a rotação nominal).

O ideal é que o tempo de aceleração seja menor que o tempo de rotor bloqueado

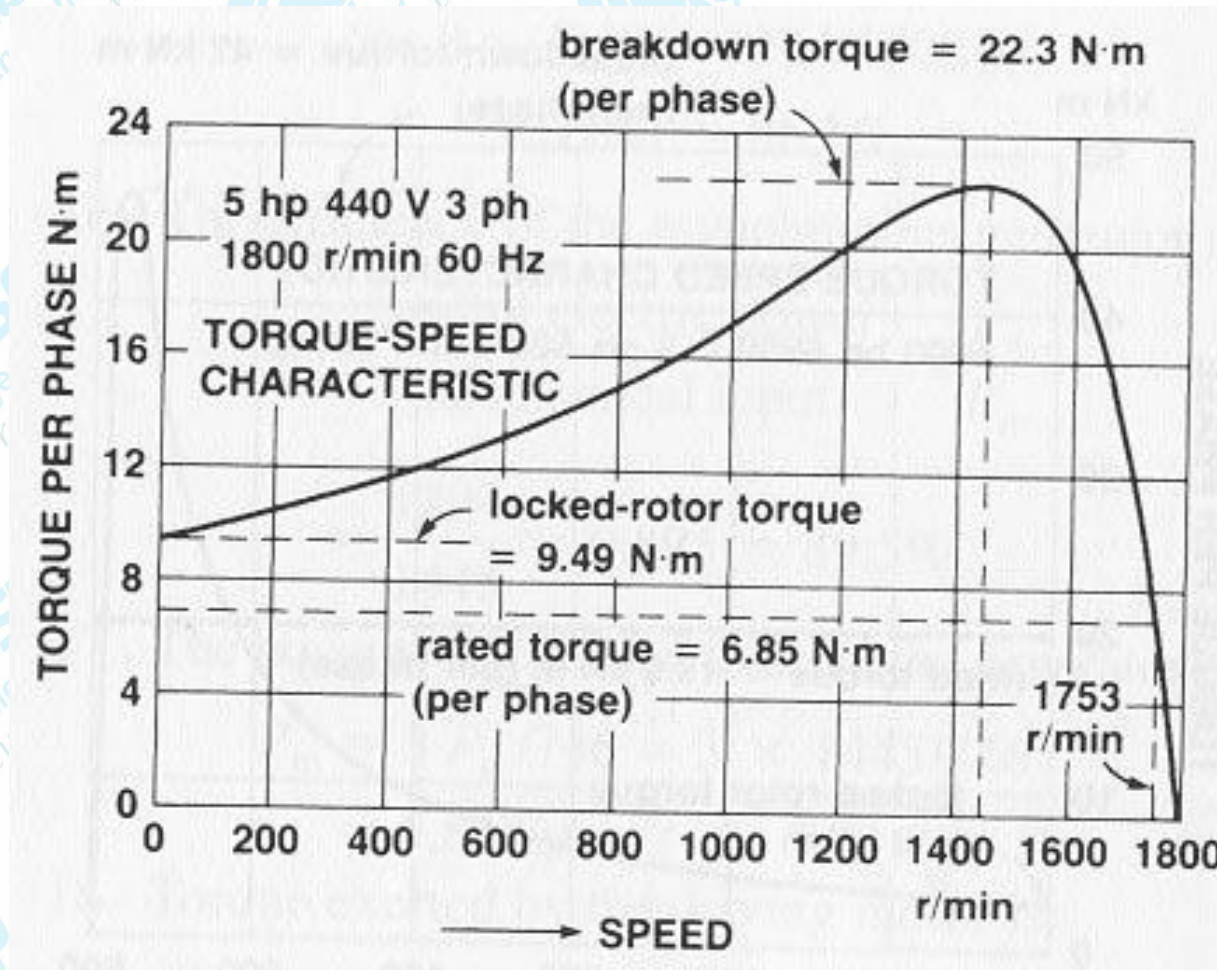
$$t_a = \frac{2 \pi \cdot rps \cdot J_t}{C_a} = \frac{2 \pi \cdot rps \cdot (J_m + J_{ce})}{(C_{mmed} - C_{rmed})}$$

- | | |
|------------|---|
| t_a | - tempo de aceleração em segundos |
| J_t | - momento de inércia total em kgm^2 |
| rps | - rotação nominal em rotações por segundo |
| C_{mmed} | - conjugado médio de aceleração do motor em N.m. |
| C_{rmed} | - conjugado médio resistente de carga referido a eixo em N.m. |
| J_m | - momento de inércia do motor |
| J_{ce} | - momento de inércia da carga referido ao eixo |
| C_a | - conjugado médio de aceleração |

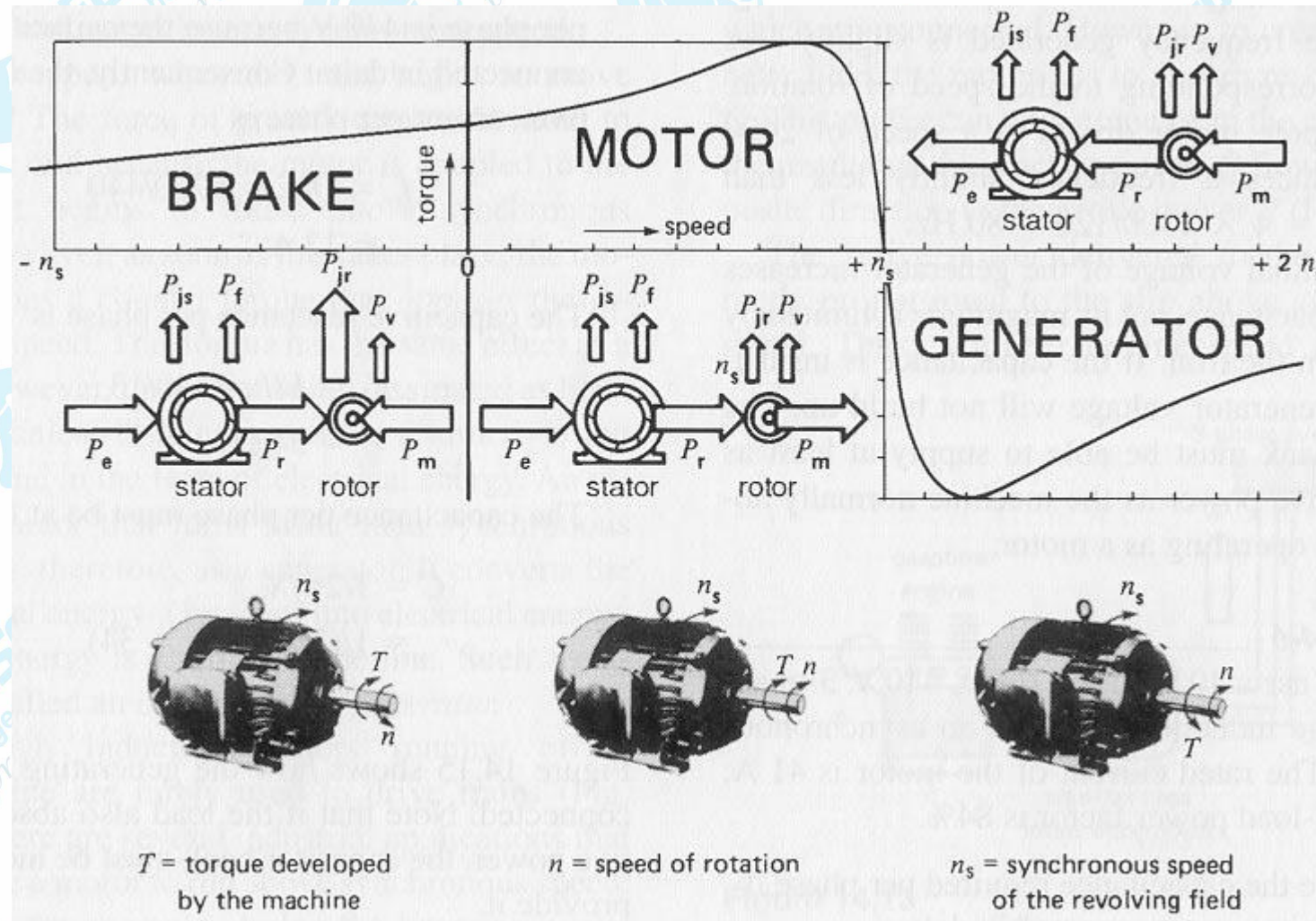
Curva Torque/Velocidade



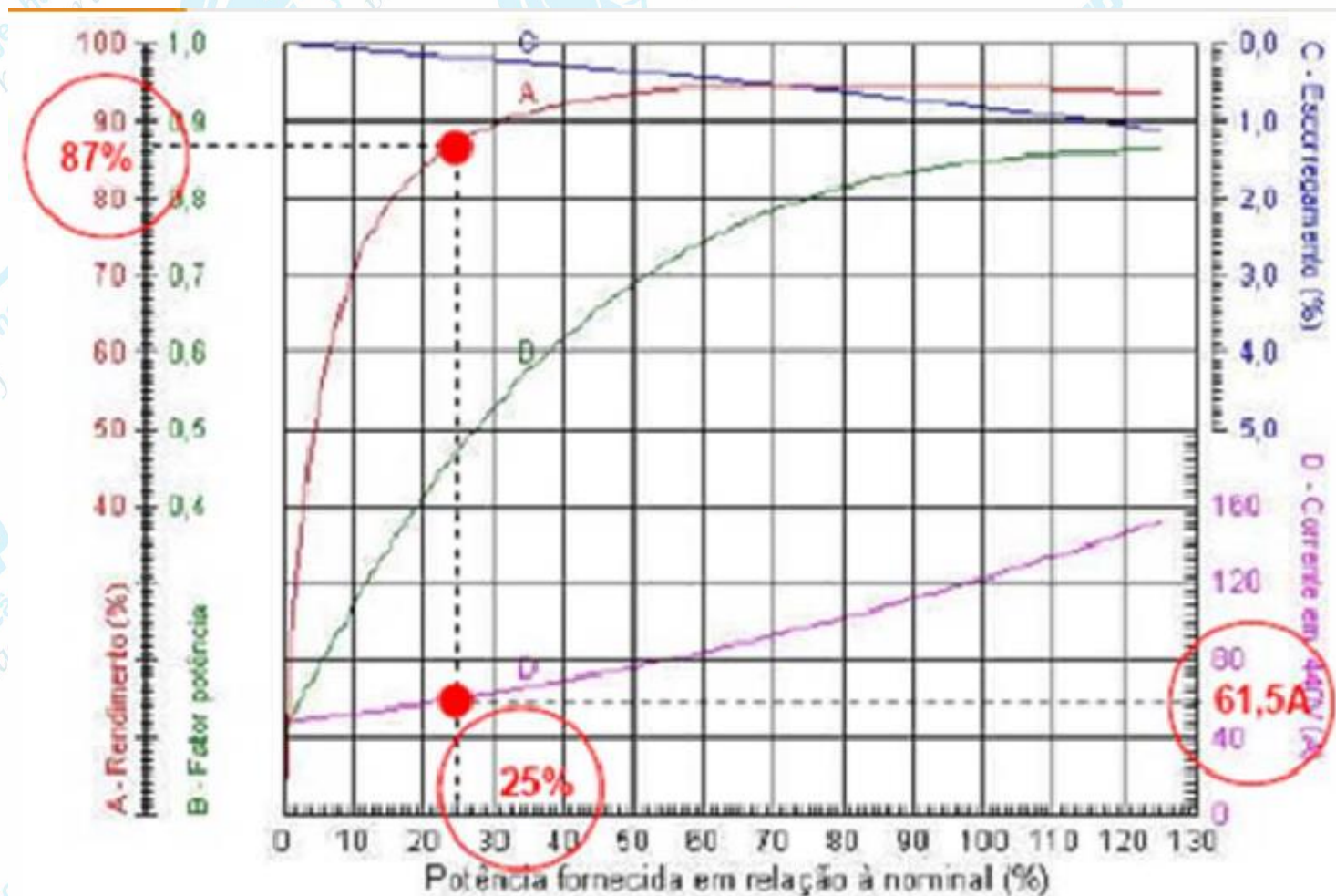
Curva Torque/Velocidade



Aplicações em função da Curva de Torque-Velocidade



Observe pela curva característica de um motor 100cv 4 pólos que operando com metade da corrente nominal o potencial de carga é aproximadamente 25%



Motor de corrente contínua

Tipos:

- ✓ Com escova;
- ✓ Sem escovas;
- ✓ Motor de passo.



DC motor



DC Brushless motor



Stepper motor

Servo motor

Com escovas

Constituintes:

- Armadura ou rotor;
- Comutador
- Escovas
- Eixo
- ímã gerador de campo
- fonte de alimentação DC
- podem ser regulados por um resistor variável simples (potenciômetro ou reostato)

Onde encontrar?

www.faulhaber.com

www.maxon.com

www.bosch.com.br

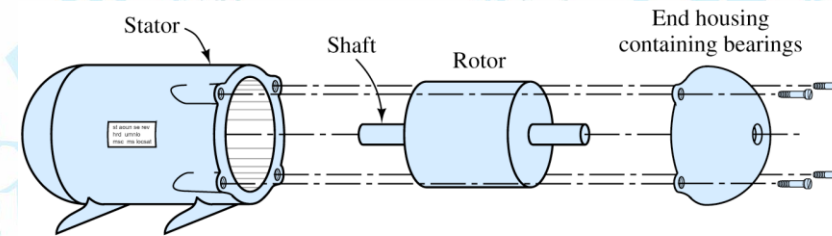


Figure 16.1 An electrical motor consists of a cylindrical rotor that spins inside a stator.

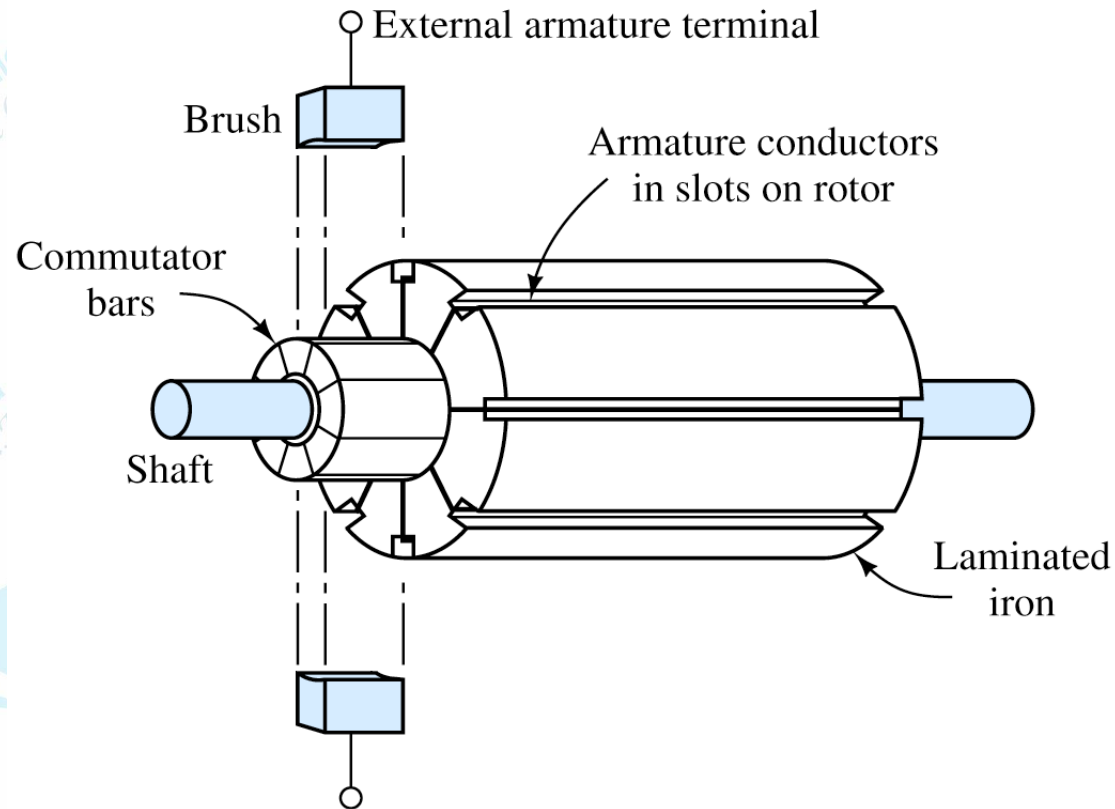
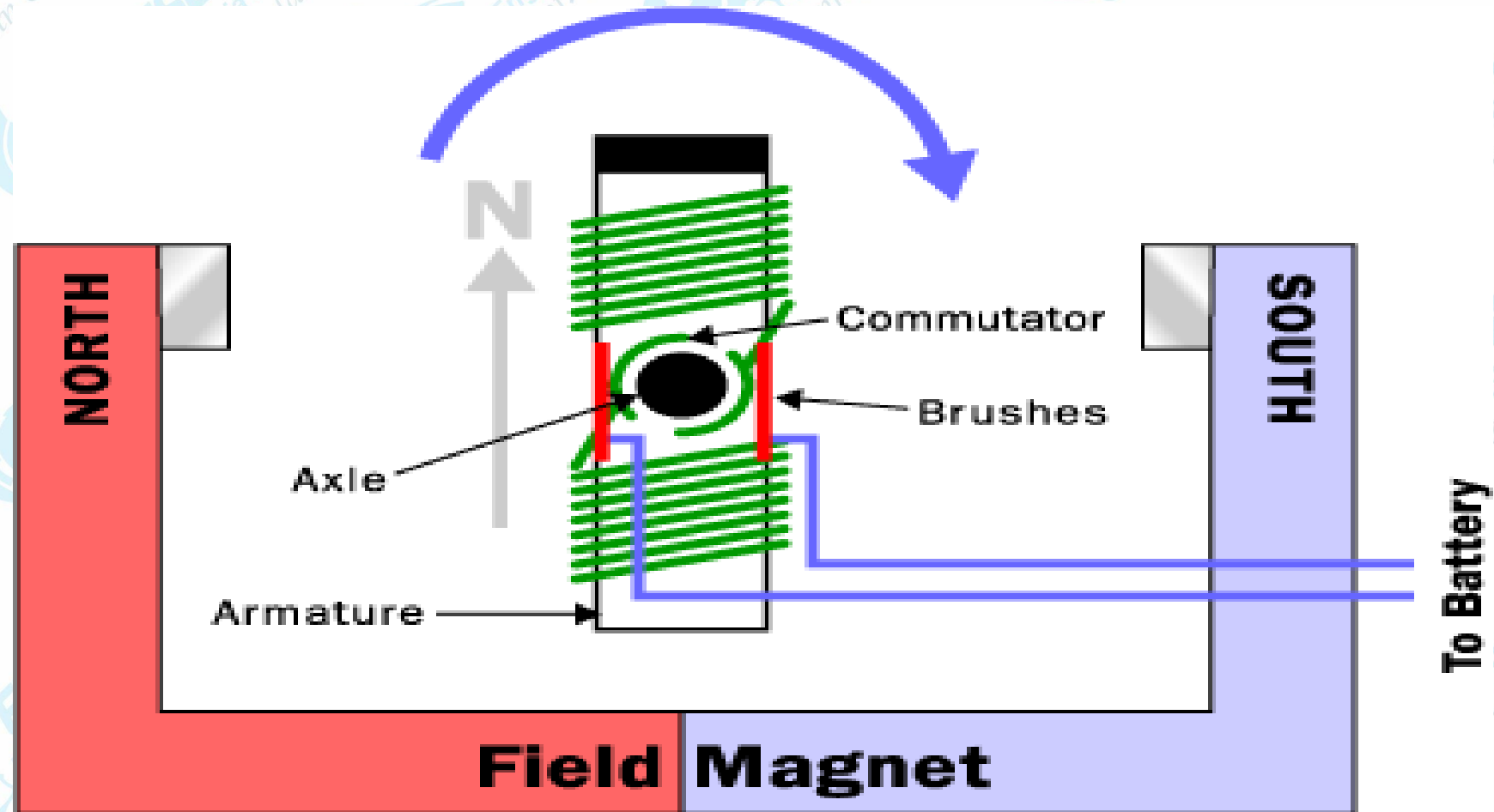


Figure 16.9 Rotor assembly of a dc machine.



©2001 HowStuffWorks

Motor DC de 2 pólos

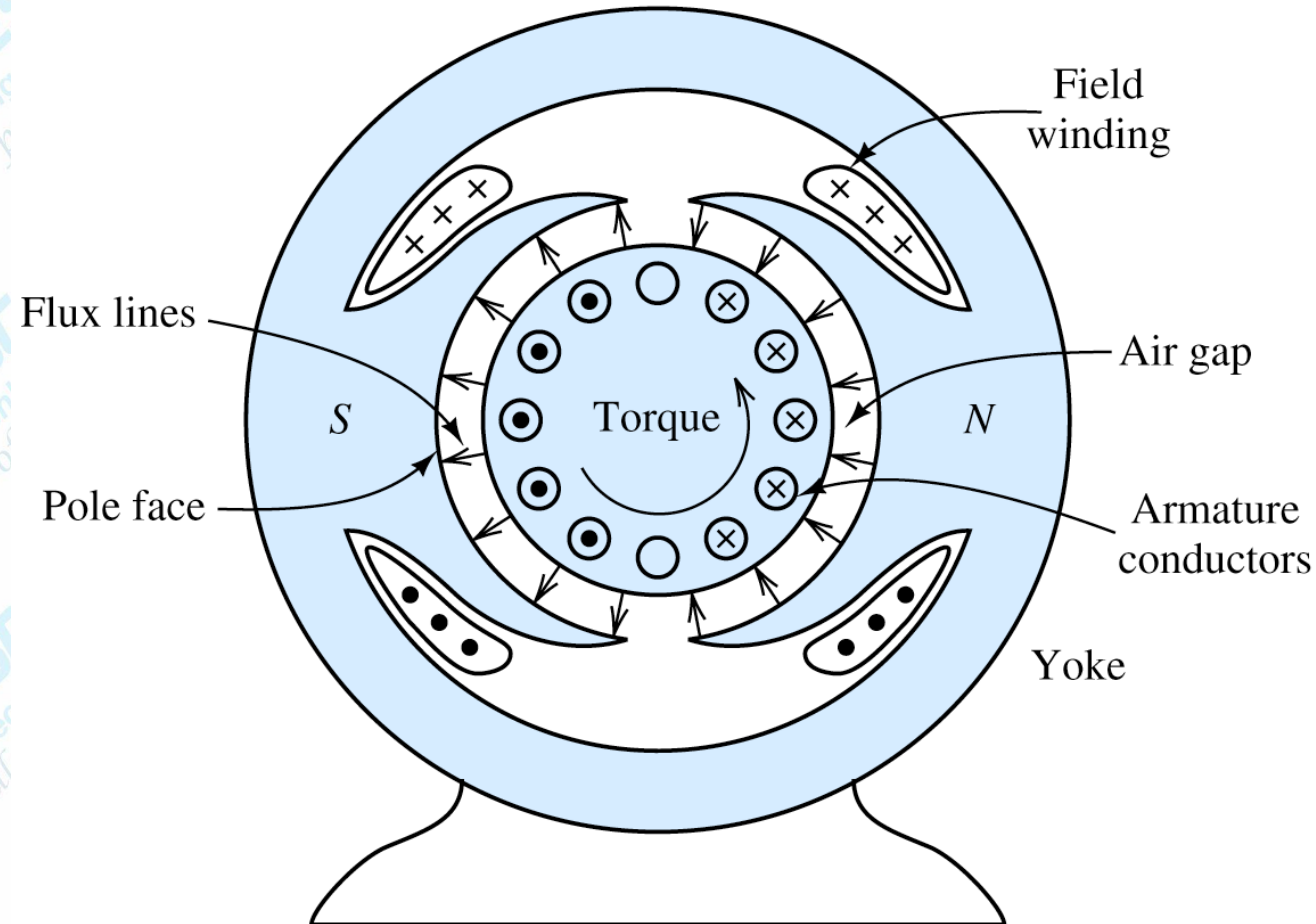


Figure 16.10 Cross section of a two-pole dc machine.

Motor DC de 4 pólos

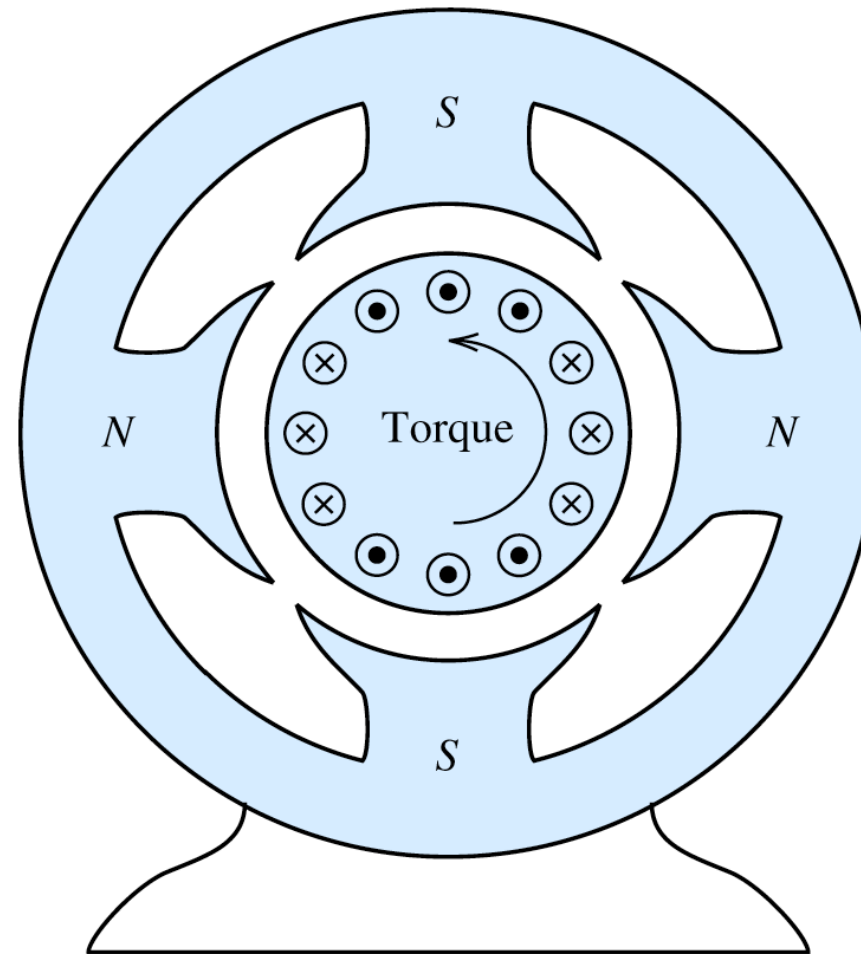


Figure 16.11 Cross section of a four-pole dc machine.

Potência de Entrada

$$P_1 = U \cdot I$$

P_1 = Potência de entrada em W
 U = Voltagem em V
 I = Corrente em A

Potência de Saída

$$P_2 = 2 \frac{\pi}{60} \cdot M \cdot n$$

P_2 potência de saída em W
 M Torque em $N \cdot m$
 n velocidade em min^{-1}

Eficiência

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Torque M_N

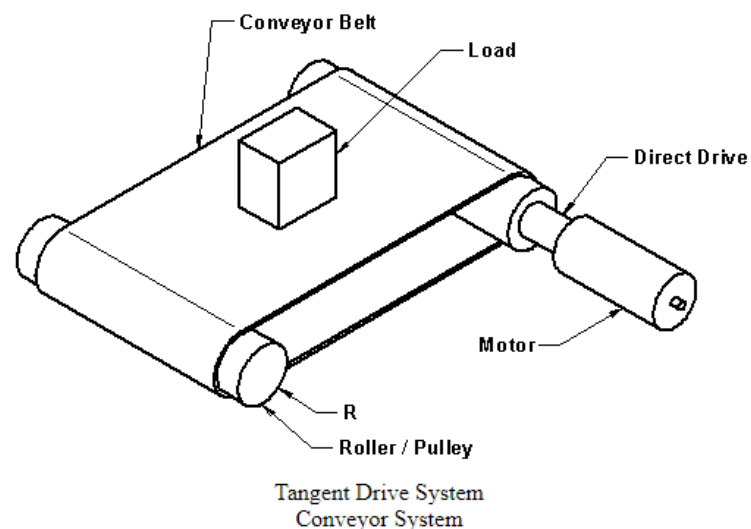
$$M_N = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{P_{2N}}{n}$$

Sentido de rotação

Em relação ao sentido de rotação, as especificações aplicam-se quando se olha para o eixo do motor. Em casos onde existam dois eixos, o eixo oposto ao coletor é o que determina

Tangent Drive Motor Mass Moment of Inertia Equation

Use these equations to determine the Inertia of a tangent drive system. Tangent drive may be the following: Timing belt and pulley, Chain and sprocket, rack and pinion, etc...



Where:

S_m = Motor Speed, rpm

V_1 = Load Speed, rpm

R = Radius, in

F_1 = Load Force, lb

T_f = Friction Torque, in-lb

F_f = Friction Force, lb

T_1 = Torque of Load, lb-in

J_1 = Load Inertia, lb-in.-sec²

W_{lb} = Weight of load plus belt, lb

g = Gravitational constant, 386 in./sec²

J_{p1} = Pulley Inertia, lb-in.-sec²

J_{p2} = Pulley Mass Moment of inertia, lb-in.-sec²

J_m = Motor Mass Moment of inertia, lb-in.-sec²

J_t = Total Mass Moment of Inertia, lb-in.-sec²

Equation:

Motor Speed:

$$S_m = \frac{V_1}{2\pi R}$$

Load Torque:

$$T_l = F_l R$$

Friction Torque:

$$T_f = F_f R$$

Load Inertia:

$$J_l = \frac{W_{lb} R^2}{g}$$

Total Inertia

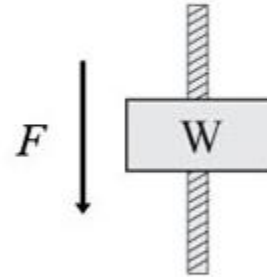
$$J_t = \frac{W_{lb} R^2}{g} + J_{p1} + J_{p2} + J_m$$

Forces

There are three types of forces; vertical, horizontal and **incline**. A force varies depending how it acts.

Vertical Force Calculation

$$F = W = mg$$



F : Force of moving direction
 m : Total mass of the table and load
 g : Gravitational acceleration

Horizontal Force Calculation

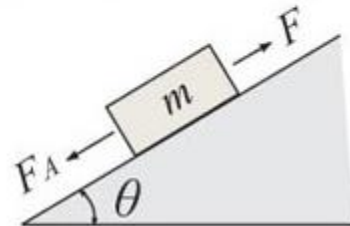
$$F = \mu \times W$$



F : Force of moving direction
 μ : Friction coefficient of sliding surface (0.05)

Incline Force Calculation

$$F = F_A + mg (\sin \alpha + \mu \cos \alpha)$$

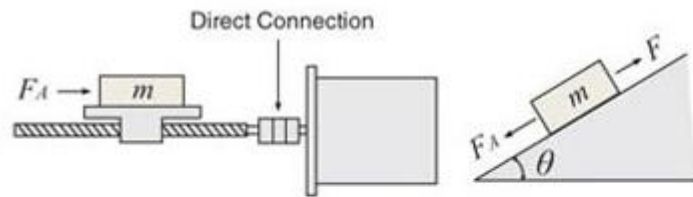


F : Force of moving direction
 F_A : External force
 m : Total mass of the table and load
 g : Gravitational acceleration

Load Torque Calculation - Ball Screw Drive

$$T_L = \left(\frac{FP_B}{2\pi\eta} + \frac{\mu_0 F_0 P_B}{2\pi} \right) \times \frac{1}{i}$$

$$F = F_A + mg (\sin \theta + \mu \cos \theta)$$



F : Force of moving direction

F_0 : Preload ($\approx 1/3 F$)

μ_0 : Internal friction coefficient of preload nut (0.1~0.3)

η : Efficiency (0.85~0.95)

P_B : Ball screw lead

F_A : External force

m : Total mass of the table and load

μ : Friction coefficient of sliding surface (0.05)

θ : Tilt angle [deg]

g : Gravitational acceleration

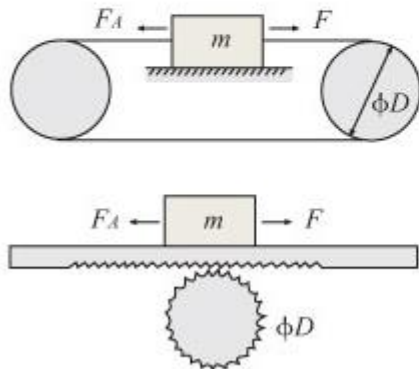
i : Gear ratio

(This is the gear ratio of the mechanism and not the gear ratio of the Oriental Motor's gearhead you are selecting.)

Load Torque Calculation - Wire or Belt Drive, Rack and Pinion Drive

$$T_L = \frac{F}{2\pi\eta} \times \frac{\pi D}{i} = \frac{FD}{2\eta i}$$

$$F = F_A + mg (\sin \theta + \mu \cos \theta)$$



F : Force of moving direction

μ_0 : Internal friction coefficient of preload nut (0.1~0.3)

η : Efficiency (0.85~0.95)

i : Gear ratio (This is the gear ratio of the mechanism and not the gear ratio of the Oriental Motor's gearhead you are selecting.)

P_B : Ball screw lead

F_A : External force

m : Total mass of the table and load

μ : Friction coefficient of sliding surface (0.05)

θ : Tilt angle [deg]

D : Final pulley diameter

g : Gravitational acceleration

<https://www.orientalmotor.com/technology/motor-sizing-calculations.html>

Acceleration Torque

As mentioned previously, acceleration torque is made up of inertia and acceleration rate. If we know those two values, we can calculate the acceleration torque.

$$T_a = J \times A$$

T_a : Acceleration Torque

J : Moment of Inertia

A : Acceleration Rate

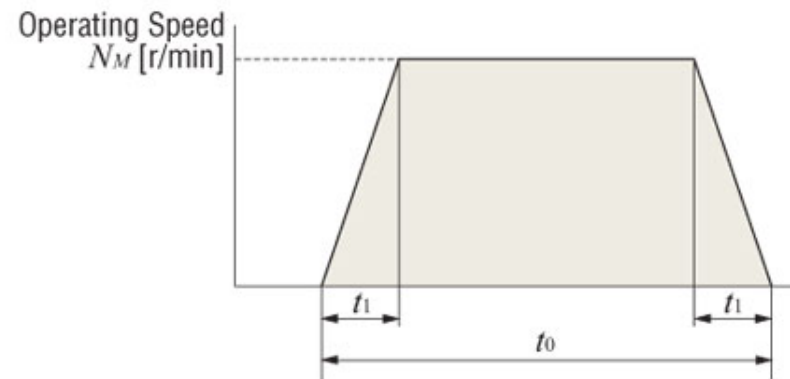
Calculate the Acceleration Torque (T_a)

If the motor speed is varied, the acceleration torque or deceleration torque must always be set.

The basic formula is the same for all motors. However, use the formulas below when calculating the acceleration torque for stepper or servo motors on the basis of pulse speed.

Common Formula for All Motors

$$T_a = \frac{(J_0 \times i^2 + J_L)}{9.55} \times \frac{N_M}{t_1}$$



Using Brushless Motors

J_0 : Rotor inertia

J_L : Total load inertia

N_M : Operating speed [r/min]

t_1 : Acceleration (deceleration) time [s]

i : Gear ratio