



PMR2560 – Robótica

Motores Elétricos

Eduardo L. L. Cabral

elcabral@usp.br

Objetivos

- Motores elétricos:
 - Servo motores;
 - Tipos de motores;
 - Exemplo de dimensionamento;
 - Comparação entre os tipos de motores;
 - Exemplo.



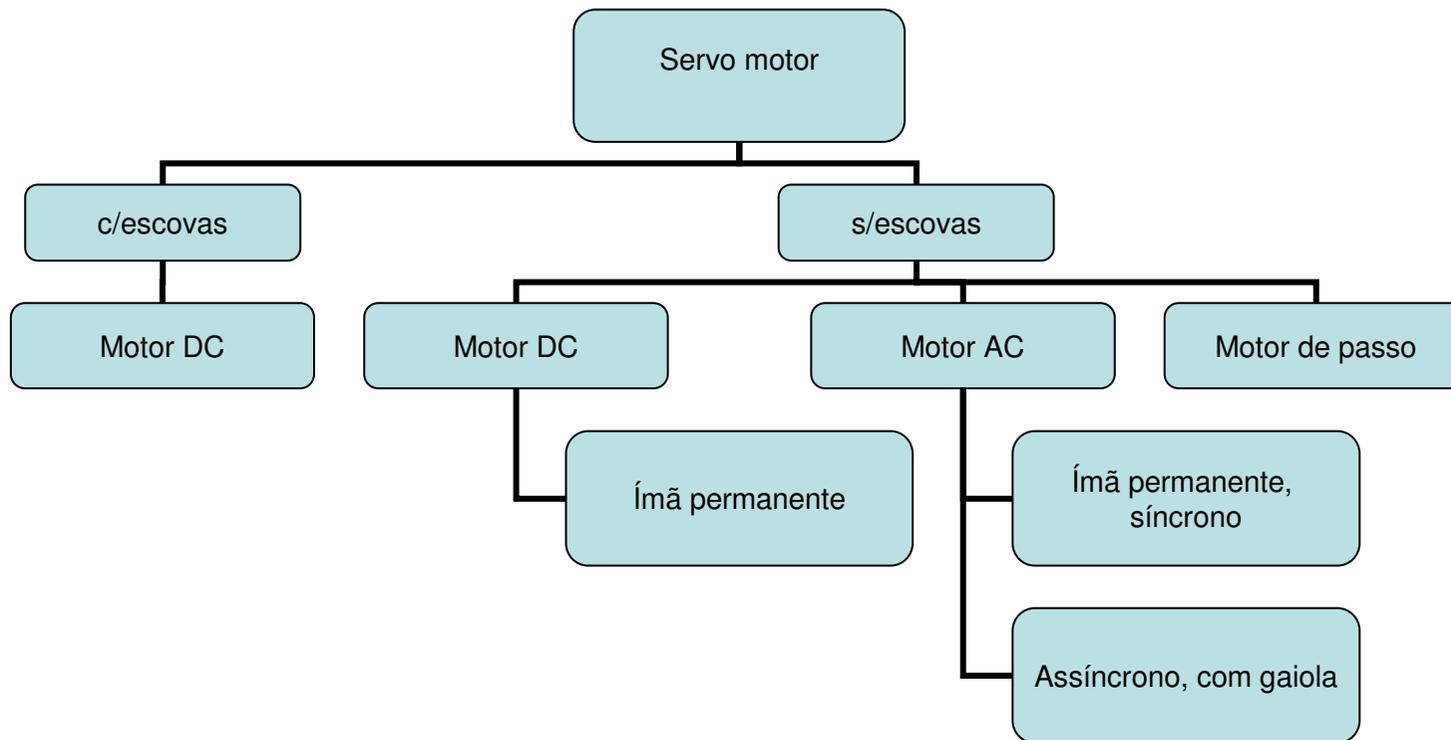
Servo motores

- Na robótica industrial \Rightarrow utilizam-se servo motores.
- Definição de servo motor:
 - São atuadores eletromagnéticos de alta qualidade que:
 - Apresentam resposta dinâmica rápida;
 - Em geral apresentam altas velocidades e acelerações;
 - Possuem relação tensão x velocidade linear;
 - Possuem relação torque x rotação linear;
 - Apresentam facilidade de serem controlados com precisão.
 - O termo “servo” vem do latim, “servus”, que significa, escravo.



Servo motores

Tipos de servo-motores



Tipos de motores

- Tipos de motores elétricos mais usados nos robôs industriais:
 - Motor de passo;
 - Motor de corrente contínua com escovas;
 - Motor de corrente contínua com imã permanente sem escovas;
 - Motor de corrente alternada com imã permanente sem escovas;
 - Motor “Direct-Drive” (corrente contínua sem escovas ou corrente alternada de imã permanente).



Motor de passo

- Muito atraente para uso em robôs que não exigem grandes esforços e muita qualidade de movimento.
- Vantagens:
 - Boa repetibilidade;
 - Fáceis de usar;
 - Interface simples e compatível com micro-processadores;
 - Acionado através de pulsos \Rightarrow cada pulso faz girar um determinado e fixo ângulo;
 - Pode operar em malha aberta com acuracidade de ± 1 passo \Rightarrow não exige sensor de posição;
 - Baixo custo.



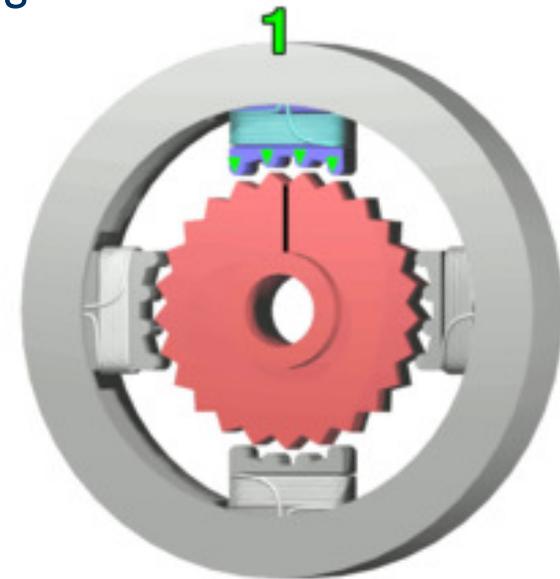
Motor de passo

- Desvantagens:
 - Baixo torque em movimento;
 - Alto peso \Rightarrow baixa relação torque/peso;
 - Alta inércia \Rightarrow baixa relação torque/inércia;
 - Baixa qualidade de movimento;
 - Baixas velocidades de rotação.
- Utilizado em aplicações que:
 - Não exigem grandes esforços;
 - Não exigem alta qualidade de movimento;
 - Exigem alta repetibilidade.



Motor de passo

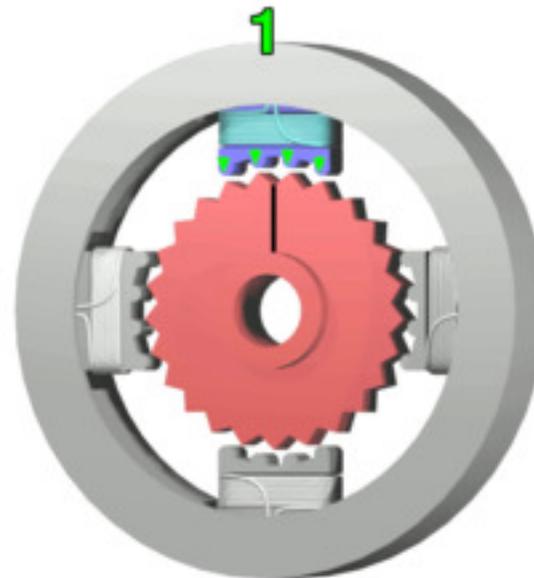
- Figura \Rightarrow motor de passo com 4 pólos magnéticos dispostos em torno de um rotor central com 25 dentes.
- Dentes do rotor tem espaçamento ligeiramente menor que dentes do estator \Rightarrow garante que os dois conjuntos de dentes nunca ficam totalmente alinhados evitando travamento do motor.
- Movimento é obtido quando uma corrente elétrica é aplicada sucessivamente, em pequenos intervalos de tempo, pelos pólos magnéticos.
- Quando os pares de dentes estão desalinhados o pulso eletromagnético causa o alinhamento e a consequente rotação.



Motor de passo

- Funcionamento:

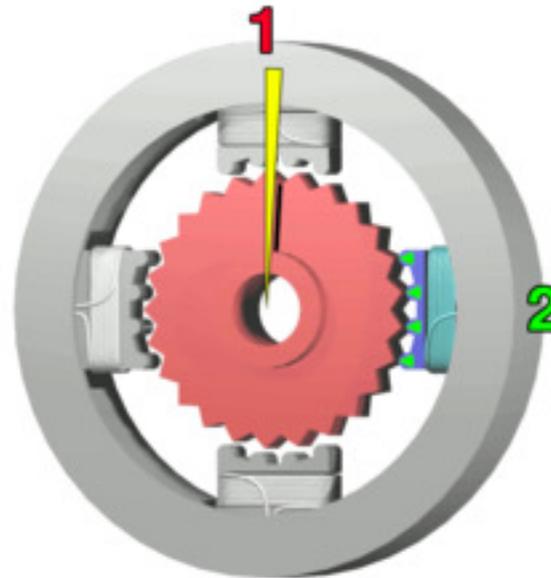
O eletroímã (1) é acionado atraindo os quatro dentes do rotor mais próximos desse pólo.



Motor de passo

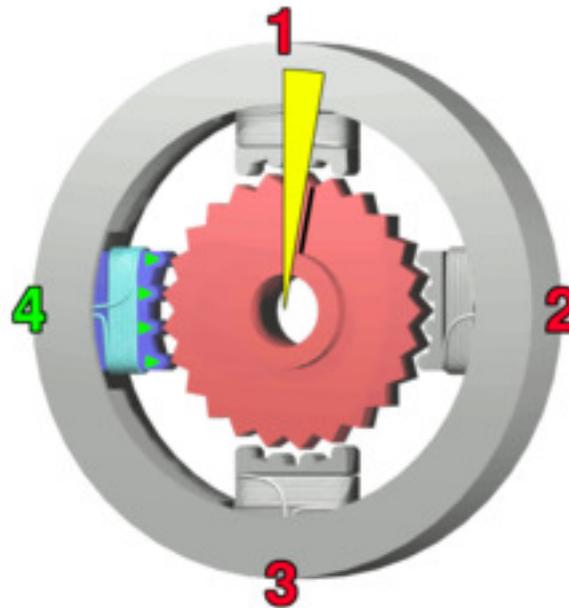
- Funcionamento:

O eletroímã (1) é desligado e o eletroímã (2) da direita é acionado, atraindo os dentes do rotor mais a direita \Rightarrow resultando no caso em um rotação de $3,6^\circ$.



Motor de passo

- Funcionamento:
O eletroímã (3) é desligado e o eletroímã da esquerda (4) é acionado, causando mais $3,6^\circ$ de rotação. Quando o eletroímã superior for acionado novamente, o rotor terá girado de um dente de posição \Rightarrow como existem 25 dentes, levará 100 passos para o rotor girar uma volta completa.



Motor de corrente contínua com escovas

- Muito atraentes para uso em robôs que não exigem alto desempenho.
- Vantagens:
 - Simples \Rightarrow tecnologia muito conhecida;
 - Inúmeros fabricantes e modelos \Rightarrow muitos modelos de moto-reductor (reductor já acoplado ao motor);
 - Existem motores com praticamente qualquer torque-velocidade-potência;
 - Podem ter altas velocidades de rotação;
 - Baixíssimo custo;
 - Fácil de controlar com precisão.



Motor de corrente contínua com escovas

- Desvantagens:
 - Alta inércia \Rightarrow baixa relação torque/inércia;
 - Alto peso \Rightarrow baixa relação torque/peso;
 - Desgaste das escovas;
 - Exige controle com realimentação \Rightarrow acionador com controlador;
 - Exige sensor de velocidade/posição angular.
- Utilizado em aplicações que:
 - Não exigem altas velocidades e acelerações ;
 - Não exigem compacticidade (peso e volume);
 - Exigem alta repetibilidade.

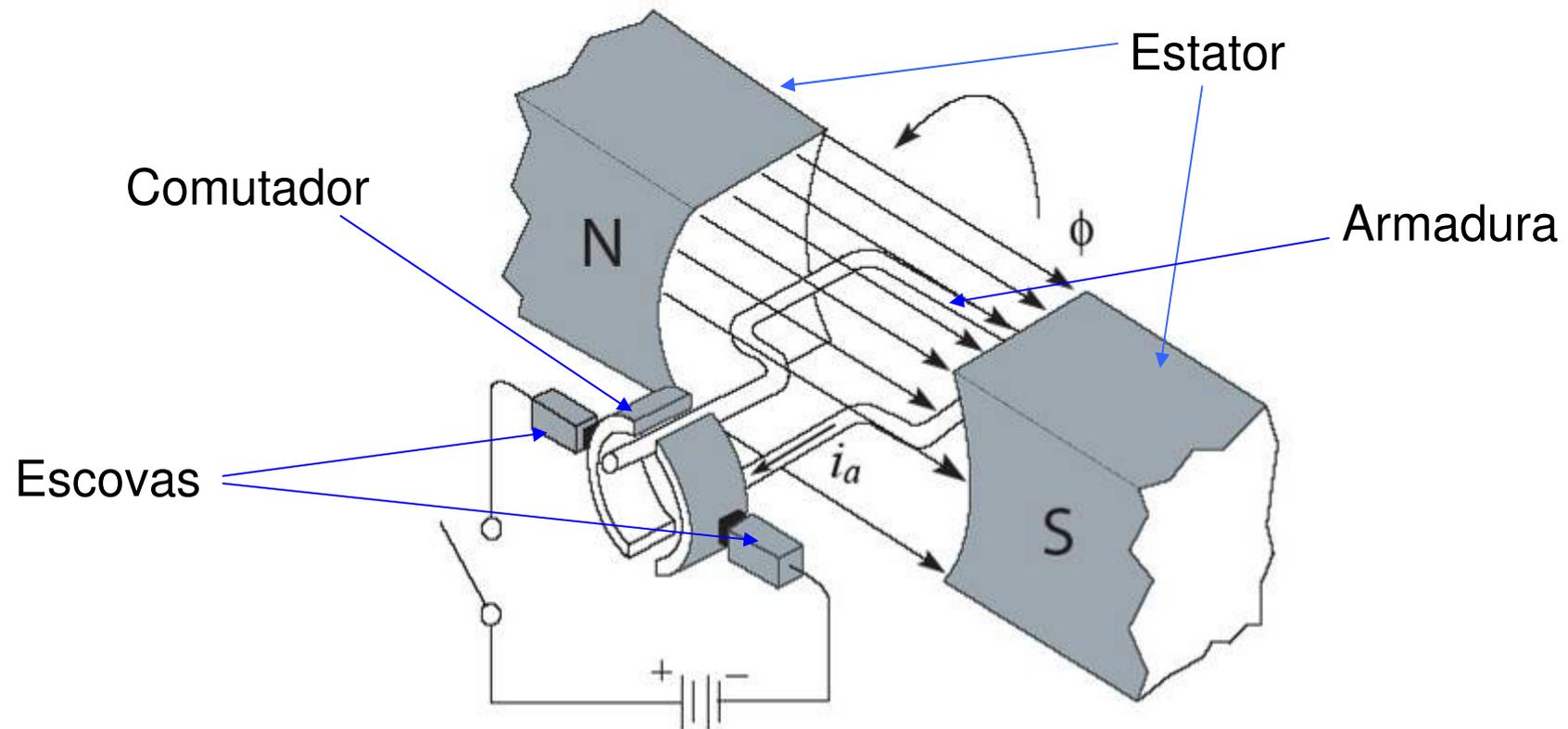


Motor de corrente contínua com escovas

- Principais componentes de um motor cc com escovas:
 - **Pólos magnéticos sul e norte** \Rightarrow em geral feitos de material ferroso magnético, formando tradicionalmente o estator do motor, pode ser um ímã permanente ou eletroímã;
 - **Rotor** \Rightarrow cilindro de material ferroso que gira dentro do estator, possui um grande número de enrolamentos feitos de fios condutores;
 - **Comutador** \Rightarrow gira com o rotor e consiste de contatos de cobre conectados nos terminais dos enrolamentos do rotor;
 - **Escovas** \Rightarrow são fixas na carcaça do motor e fazem contato com o comutador em rotação. Levam corrente contínua para os enrolamentos do rotor.



Motor de corrente contínua com escovas



Motor de corrente contínua com escovas

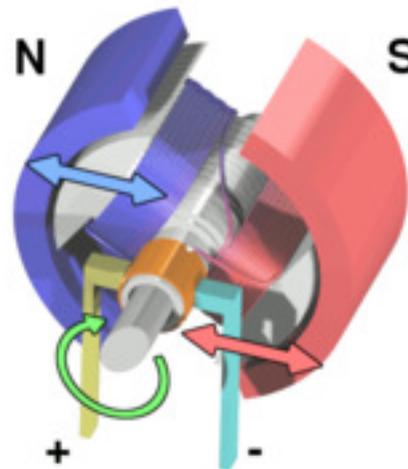
- Um motor cc de escovas possui um rotor rotativo com eletroímã e um estator com imã permanente ou um eletroímã.
- O comutador reverte a direção da corrente elétrica nos enrolamentos do rotor algumas vezes durante uma volta do rotor, fazendo com que os pólos do eletroímã do rotor sejam atraídos e repelidos pelos pólos dos imãs do estator.
- Quando os pólos do rotor passam pelos pólos do estator, o comutador reverte a polaridade do eletroímã do rotor.
- Durante a mudança de polaridade a inércia do rotor mantém o rotor girando na mesma direção.



Motor de corrente contínua com escovas

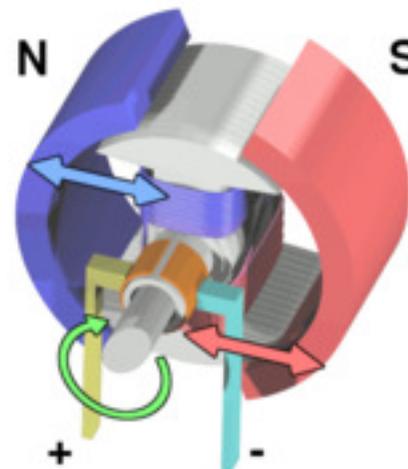
- Funcionamento:

Quando os enrolamentos do rotor são energizados, um campo magnético é gerado. O lado direito do rotor é repelido pelo ímã da armadura e gira para a direita, causando rotação.



Motor de corrente contínua com escovas

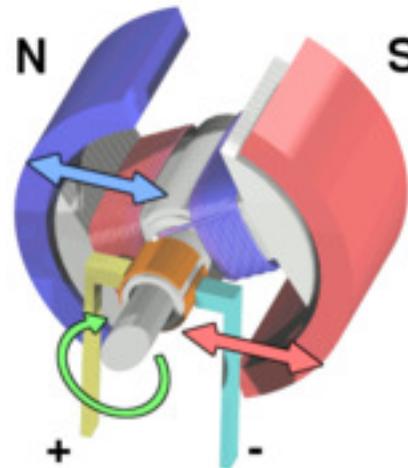
- Funcionamento:
O rotor continua a girar.



Motor de corrente contínua com escovas

- Funcionamento:

Quando o rotor fica na horizontal, o comutador reverte a direção da corrente que passa através do enrolamento do rotor, revertendo o campo magnético. O processo então se repete.



Motor de ímã permanente sem escovas

- Tipo de motor elétrico mais eficiente.
- Vantagens:
 - Baixo peso e pequeno volume;
 - Baixa inércia \Rightarrow alta relação torque/inércia;
 - Alto torque \Rightarrow alta relação torque/peso;
 - Inúmeros fabricantes e modelos \Rightarrow muitos modelos de motor-reductor (reductor já acoplado ao motor) \Rightarrow existem motores com praticamente qualquer torque-velocidade-potência;
 - Atingem altas velocidades e acelerações;
 - Controle pela comutação eletrônica das fases \Rightarrow eliminação das escovas \Rightarrow alta durabilidade;
 - Alta eficiência;



Motor de ímã permanente sem escovas

- Desvantagens:
 - Exige controle com realimentação \Rightarrow acionador com controlador;
 - Exige sensor de velocidade/posição angular;
 - Acionador com eletrônica sofisticada.
 - Motor e acionador tem alto custo.
- Utilizado em aplicações que:
 - Que exigem altas velocidades e acelerações (alto desempenho);
 - Que exigem compacticidade (peso e volume);
 - Exigem alto torque aliado a baixo peso e baixa inércia;
 - Exigem alta repetibilidade.

➤ **Motor mais utilizado nos robôs industriais.**



Motor de ímã permanente sem escovas

- Rotor:
 - Ímãs permanentes;
 - Uso de materiais não ferromagnéticos (resina, fibra de vidro);
 - Eliminação das bobinas do rotor para geração do campo magnético.
 - Uso de ímãs permanentes (terras raras – Nd–Fe–B ou Sm–Co) ao invés de bobinas para geração do campo \Rightarrow aumento do campo magnético:
 - Grande redução do momento de inércia e peso aliado a um alto campo magnético.
- Estator \Rightarrow Eletroímãs.
- Comutação eletrônica \Rightarrow permite eliminar as escovas.



Motor de imã permanente sem escovas

- Esquema físico:
 1. Núcleo do estator (aço ou ferro);
 2. Slots para o enrolamento;
 3. Núcleo do rotor;
 4. Imã permanente.

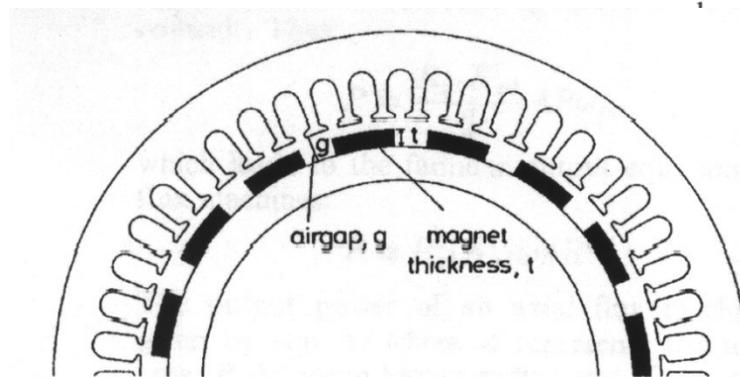
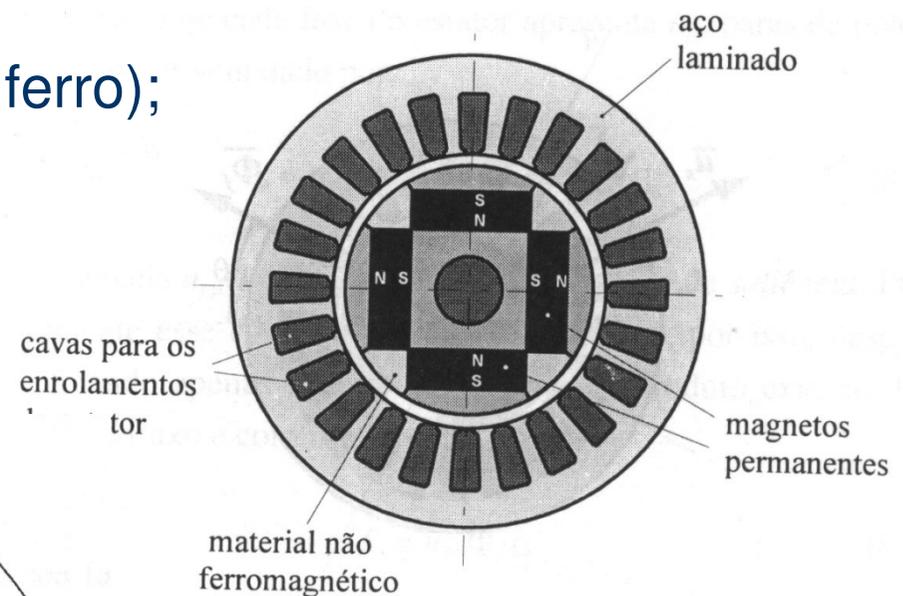
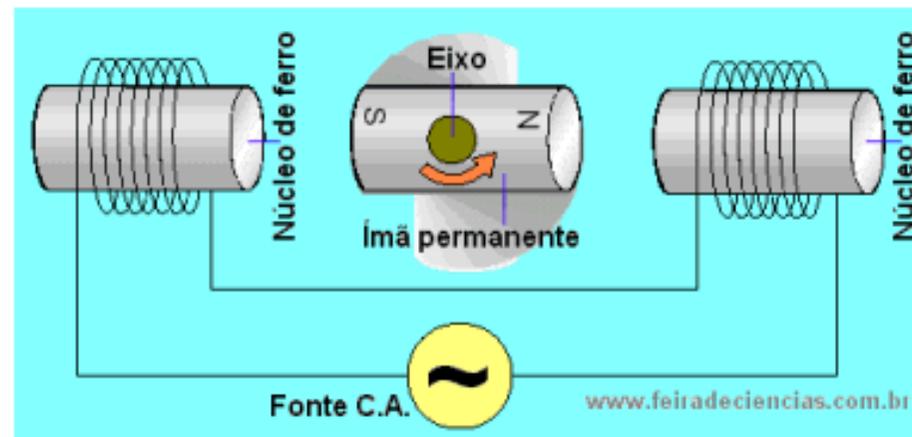


Fig.3 Surface magnet arrangement



Motor de ímã permanente sem escovas

- Funcionamento de um motor CA sem escovas:
O rotor (ímã permanente) gira entre dois eletroímãs estacionários. Como os eletroímãs são alimentados por corrente alternada, seus polos invertem suas polaridades conforme o sentido da corrente inverte.



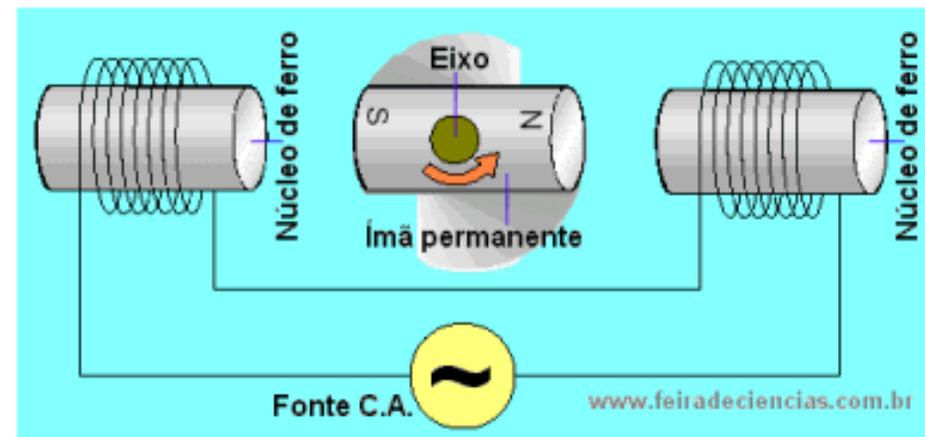
Motor de imã permanente sem escovas

- Funcionamento de um motor CA sem escovas:

Rotor gira enquanto seu polo norte é 'puxado' primeiramente para o eletroímã esquerdo e 'empurrado' pelo eletroímã direito.

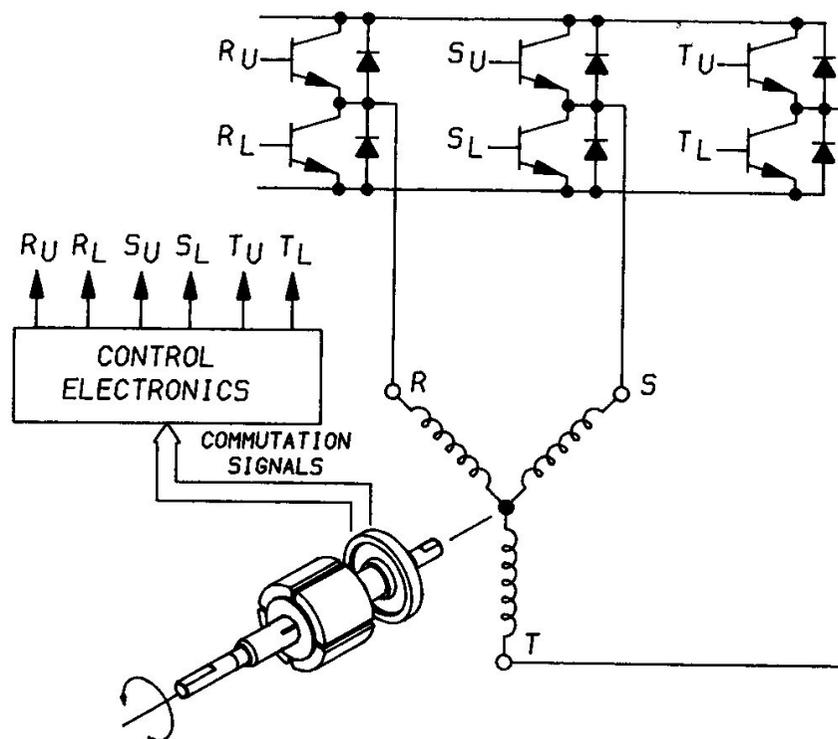
Cada vez que o polo norte do rotor está a ponto de alcançar o polo sul de um eletroímã a corrente inverte e esse polo sul transforma-se um polo norte.

Rotação é sincronizada com as reversões da CA \Rightarrow motor síncrono.



Motor de imã permanente sem escovas

- Funcionamento de um motor CC sem escovas:



Funcionamento idêntico ao motor CA sem escovas.

Corrente elétrica é aplicada a cada uma das fases do estator dependendo da posição do rotor \Rightarrow comutação da corrente elétrica.

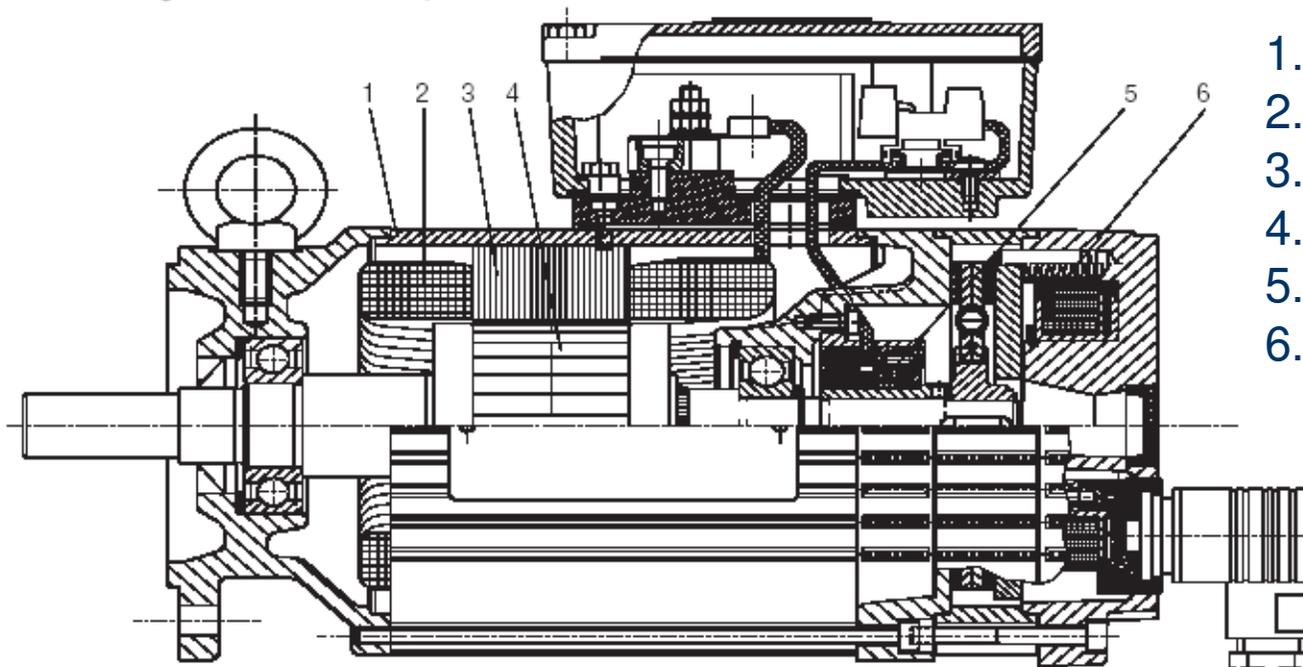
Sensores de posição no rotor para comutação das fases do estator na hora correta.



Motor de imã permanente sem escovas

Esquema físico: servo CA usado nos robôs industriais

2.1 Design and method of operation



1. Carcaça;
2. Enrolamento;
3. Núcleo do estator;
4. Rotor (c/ Imã);
5. Resolver;
6. Freios.

00037AXX



Motor “Direct-Drive”

- Motor de imã permanente sem escovas;
 - Grandes diâmetros \Rightarrow alto torque, alto peso e alta inércia;
 - Baixa velocidade e alto torque \Rightarrow permite acoplar o motor diretamente ao eixo da articulação eliminando necessidade de redução de velocidade;
 - Problema de baixa rigidez;
 - Altíssimo custo;
- Pouco utilizado em robôs industriais.



Tipos de motores

- Comparação motor com escovas x motor sem escovas:
 - Vantagens do sem escovas:
 - Fonte de energia conveniente (no caso do AC);
 - Sem comutação ou escovas;
 - Alto torque se for utilizado ímãs permanentes de alto fluxo magnético;
 - Baixa dissipação de potência;
 - Baixa inércia;
 - Alta confiabilidade e robustez.
 - Desvantagens do sem escovas:
 - Custo alto;
 - Baixo torque de partida;
 - Alto custo da eletrônica de controle.



Tipos de motores

Tabela comparativa

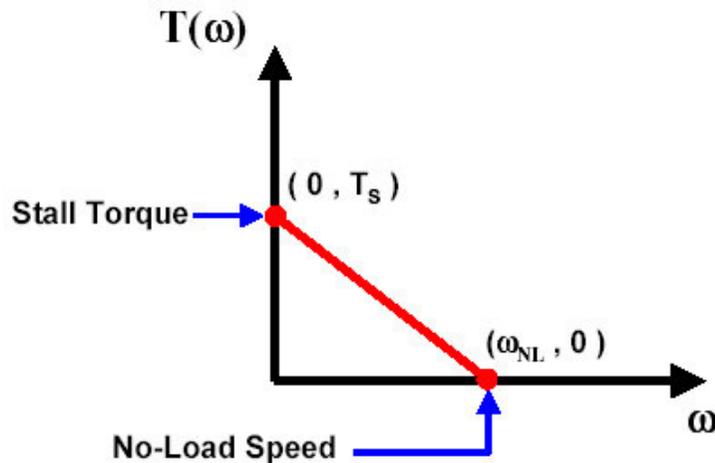
Characteristics	AC asynchronous motor (direct-on-line)	DC motor	Permanent-field synchronous motor
Power [kW]	7.5	8.3	7.5
Speed [1/min]	2900	3200	3000
Type / Size	DFV 132 M2	GFVN 160 M	DFY 112 ML
Enclosure	IP 54	IP 44	IP 65
Cooling	fan-cooled	fan-cooled	self-cooled via surface
Length [mm]	400	625	390
Total weight [kg]	66	105	38.6
Weight of rotor [kg]	17	29	8.2
J_{mot} [10^{-4} kgm ²]	280	496	87.4
Rated torque [Nm]	24.7	24.7	24
Maximum torque M_{max}	$2.6 \cdot M_N / 1.8 \cdot M_N^{1)}$	$1.6 \cdot M_N$	$3 \cdot M_N$
Max. angular acceleration α [$1/s^2$] ²⁾	1588	797	8238
Max. dynamic performance [%] ⁴⁾ (servo motor = 100%)	20	10	100
Acceleration time t_H ³⁾ [ms]	191	420	38



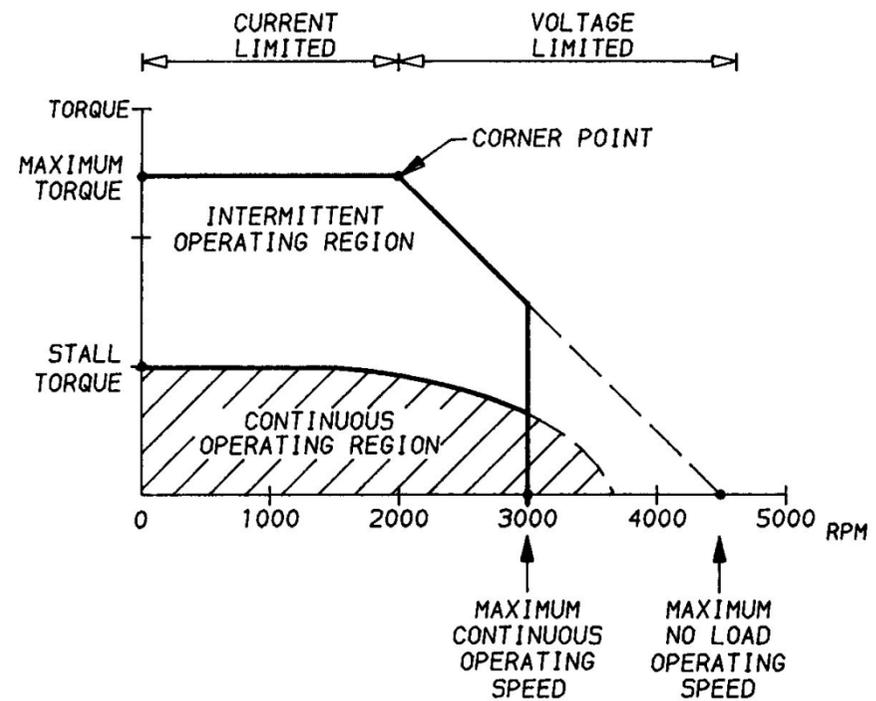
Operação de m motor elétrico

- Curva torque X rotação \Rightarrow servo motores:

Por essa curva a rotação máxima pode ser calculada dado um determinado torque.



Motor CC com escovas



Motor sem escovas



Seleção de um motor elétrico

- **Passo 1**: Determinação dos esforços envolvidos para a pior condição de operação do robô.
- **Passo 2**: Cálculo das rotações das articulações (motores).
- **Como os robôs são máquinas que trabalham sempre em regime não estacionário \Rightarrow é necessário simulação dinâmica para o cálculo dos esforços e das rotações nas articulações.**
- **Passo 3**: Seleção do motor e da relação de redução da transmissão \Rightarrow torque e rotação devem sempre ficar dentro da região de operação do motor.



Exemplos

- O ciclo de operação de uma articulação de translação de um robô é dado no gráfico a seguir. Admitindo-se que a transmissão entre o eixo do motor e o eixo da articulação se dê através de uma polia dentada de diâmetro 150 mm e a carga transportada seja de 60 kg. Pede-se:
 - a) As acelerações a que estará sujeita a articulação.
 - b) Os torques na articulação em velocidade constante, na aceleração e desaceleração.
 - c) A rotação requerida para o motor, sabendo-se que este está acoplado a um redutor com relação de redução $i = 100$.
 - d) Dado o catálogo de um fabricante de motor escolha o motor necessário.

Exemplos

Tabela de operação servo motor HT Series Frameless – Allied Motion



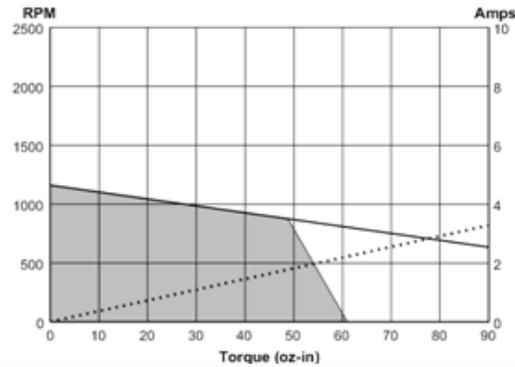
Model No.		HT02300	HT02301	HT02302	HT02303	HT02304	HT02305
Motor Constants							
Stall Torque (continuous)	oz-in	30	61	88	113	137	157
	Nm	0.215	0.413	0.620	0.798	0.966	1.105
Demag Torque (±25%)	oz-in	329	675	1035	1298	1561	1838
	Nm	2.32	4.76	7.31	9.16	11.0	12.9
Cont. Power Output	W	56	81	97	111	123	129
Motor Constant	oz-in/ \sqrt{W}	7.9	15.0	20.8	25.8	30.0	33.6
	Nm/W	0.056	0.106	0.147	0.182	0.212	0.238
Elect. Time Constant	ms	0.34	0.61	0.83	1.04	1.27	1.50
Mech. Time Constant	ms	5.3	2.8	2.2	1.9	1.7	1.6
Thermal Resistance	°C/W	3.7	3.3	3.1	2.8	2.6	2.5
Viscous Damping	oz-in/RPM	8.2E-4	1.6E-3	2.4E-3	3.0E-3	3.8E-3	4.5E-3
	Nm/RPM	5.8E-6	1.1E-5	1.7E-5	2.1E-5	2.6E-5	3.1E-5
Cogging Torque (max.)	oz-in	1.9	2.8	3.8	5.0	6.1	7.3
	Nm	0.014	0.020	0.027	0.036	0.043	0.052



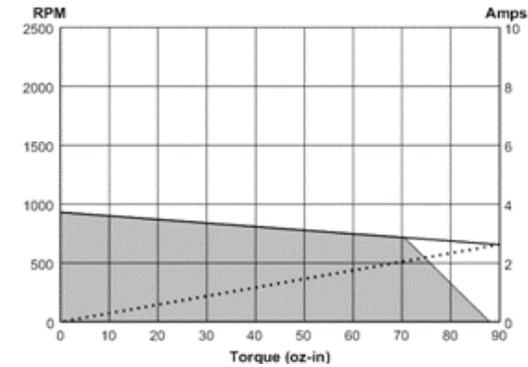
Exemplos

Curvas de operação servo motor HT Series Frameless – Allied Motion

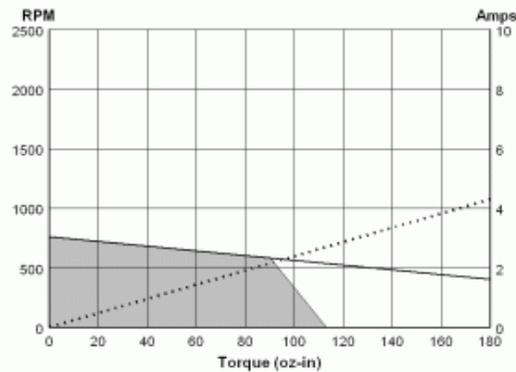
HT02301-A00



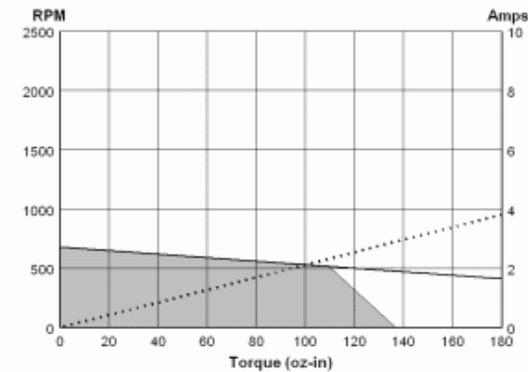
HT02302-A00



HT02303-A00

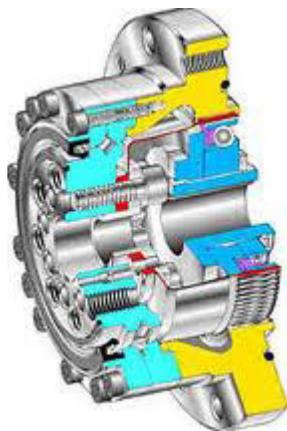


HT02304-A00



Exemplos

Tabela de operação servo motor CobraDrive – Harmonic Drive



Gear Size	Servo actuator				Output Bearing		
	Ratio	Shaft Diameter	Maximum Output Torque	Maximum Speed	Máximum Tilting Moment	Maximum Dynamic Axial Load	Maximum Dynamic Radial Load
		[mm]	[Nm]	[rpm]	[Nm]	[N]	[N]
8	30	6.2	1.8	200	15	200	1163
	50	6.2	3.3	120	15	200	1163
	100	6.2	4.8	60	15	200	1163
11	30	8.0	4.5	200	40	300	2857
	50	8.0	8.3	120	40	300	2857
	100	8.0	11	60	40	300	2857
14	30	13.5	9	200	75	500	5357
	50	13.5	18	120	75	500	5357
	100	13.5	28	60	75	500	5357

