

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

FABIANO PIMENTEL DE CASTRO

SERVO MOTORES: visão geral, controle e aplicação

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2016

FABIANO PIMENTEL DE CASTRO

SERVO MOTORES: visão geral, controle e aplicação

Monografia de Especialização, apresentado ao Curso de Especialização em Automação Industrial, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Valmir de Oliveira

CURITIBA

2016

Dedico esse trabalho a Deus, maneira essa de
agradecimento pelo dom da vida, por Ele concedido.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e pela capacidade de realizar esse trabalho.

Aos meus pais, pela oportunidade e incentivo para a conclusão dessa especialização.

À minha companheira Calina, por tudo que sempre faz para me manter animado e dedicado a crescer.

Ao professor Dr. Valmir Oliveira, por ter aceitado a minha proposta e pelo empenho em me ajudar na realização deste trabalho.

À UTFPR pela criação dessa especialização, e oportunidade de crescimento intelectual que me proporcionou.

Aos meus sobrinhos, que mesmo sem saber, me incentivam e motivam com seus sorrisos sinceros e carinhos incondicionais.

E por fim, pelos colegas de profissão, que mesmo em momentos de discussões calorosas, me ajudaram a compreender e desenvolver esse trabalho.

RESUMO

DE CASTRO, Fabiano P. **Servo motores: Visão geral, controle e aplicação.** 2016. 37 p. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016

A alta escala de produção forçou as indústrias a buscar máquinas e equipamentos de alta qualidade e alta produtividade. Nessa busca estão sempre presentes os servomotores, sejam para atuar diretamente em linhas de produção, máquinas de usinagem CNC (Comando Numérico Computadorizado), robôs industriais e outros tipos de máquinas. Esta monografia contempla um estudo sobre as características de construção, funcionamento e aplicação de servo motores, para tanto, foi realizada uma revisão bibliográfica, nesta estão presentes os conceitos de motores de corrente contínua (com e sem escovas) corrente alternada (assíncronos e síncronos), encoders (incremental e absoluto) e servo drives. Foi analisado o conceito de servo acionamentos e como cada tipo de motor pode ser introduzido a ele. Um exemplo de aplicação em uma máquina CNC foi apresentado, para auxiliar o entendimento desses equipamentos.

Palavras chave: Servo motores Servo *drives*. *Motion control*.

ABSTRACT

DE CASTRO, Fabiano P. **Servo motors: overview, control and application.** 2016. 37 p. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

The large-scale production has forced the industry to look for machinery and high equipment quality and high productivity. In this quest are always present servomotors, are to act directly on production lines, CNC milling machines (Computerized Numerical Control), industrial robots and other machines. This monograph includes a study of the features of construction, operation and servo application engines, therefore, a literature review was conducted, in this are present the concepts of DC motors (with and without brushes), alternating current (asynchronous and synchronous), encoders (incremental and absolute) and servo drives. The concept of servo drives and how each type of motor can be introduced to it was analyzed. An application example in a CNC machine was introduced to assist the understanding of this equipment.

Keywords: Servo motors. Servo drives. Motion control.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Construção de um motor CC..... | 14 |
| Figura 2 - Exemplo de comutador..... | 15 |
| Figura 3 - Rotor com montagem de ímas na superfície..... | 18 |
| Figura 4 - Rotor com ímãs inseridos na superfície. | 18 |
| Figura 5 - Motor com ímãs montados internamente. | 19 |
| Figura 6 - Exemplo de Encoder Incremental..... | 20 |
| Figura 7 - Faixas de Encoder Absoluto..... | 21 |
| Figura 8 – Etapa de potência de um servo conversor. | 22 |
| Figura 9 - Estrutura de um servo conversor..... | 22 |
| Figura 10 - Exemplo de ligação de um servo conversor..... | 23 |
| Figura 11 - Diagrama de blocos..... | 25 |
| Figura 12 - Circuito Acionador de um Motor CC sem escovas. | 28 |
| Figura 13 - Exemplo de uma máquina CNC. | 30 |
| Figura 14 - Painel de comando..... | 30 |
| Figura 15 - Disposição dos eixos de uma máquina CNC. | 31 |
| Figura 16 - Sistema mecânico de um eixo..... | 32 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

CNC – Controle Numérico Computadorizado

PMSM – Motor Síncrono de Ímã Permanente (*Permanent Magnet Synchronous Motor*)

CPU – Unidade Processamento Central (*Central Processing Unit*)

PWM – Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Wave Modulation*)

IGBT

IHM – Interface Homem Máquina

CLP – Controlador Lógico Programável

TCP/IP – Protocolo de Controle de Transmissão/Protocolo Internet (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*)

AC – Corrente Alternada (*Alternate Current*)

CC – Corrente Contínua

RPM – Revoluções por minuto

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | PROBLEMA | 11 |
| 1.2 | JUSTIFICATIVA | 12 |
| 1.3 | OBJETIVOS | 12 |
| 1.3.1 | Objetivo Geral | 12 |
| 1.3.2 | Objetivos Específicos | 12 |
| 1.4 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 13 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 14 |
| 2.1 | Motores de Corrente Contínua | 14 |
| 2.1.1 | Motores CC com escova | 15 |
| 2.1.2 | Motores CC sem escova | 16 |
| 2.2 | Motores de Indução Trifásico | 16 |
| 2.2.1 | Motor Síncrono Rotor Bobinado | 17 |
| 2.2.2 | Motores Síncronos de Imãs Permanentes | 17 |
| 2.3 | Encoder | 19 |
| 2.3.1 | Encoder Incremental | 19 |
| 2.3.2 | Encoder Absoluto | 20 |
| 2.4 | Servo <i>drive</i> | 21 |
| 3 | DESENVOLVIMENTO DO TEMA | 25 |
| 3.1 | SERVO MOTORES | 25 |
| 3.1.1 | Servo motor de Indução | 25 |
| 3.1.2 | Motor Síncrono de Imã Permanente | 26 |
| 3.1.3 | Motores CC com escovas | 27 |
| 3.1.4 | Motores DC sem escovas | 27 |
| 3.2 | Integrando o Encoder ao motor | 28 |
| 3.3 | Exemplo de aplicação | 29 |
| 3.3.1 | Máquina CNC (Comando Numérico Computadorizado) | 29 |
| 4 | APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 33 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 35 |
| 6 | REFERÊNCIAS | 37 |

1 INTRODUÇÃO

A escala de produção induz diariamente a fabricação de máquinas cada vez mais autônomas, com alta precisão e desempenho. Qualquer que seja o ramo da indústria, exige-se que os equipamentos possuam uma alta produtividade, com excelência em qualidade. Com a miniaturização das coisas, a produção em série deixou cada vez mais de ser manual, para que fossem produzidos itens de qualidade, determinando cada vez mais precisão e confiabilidade das máquinas.

Máquinas com controle numérico computadorizado (CNC), robôs industriais e outros são usados para promover a automação, o que permitem alta produtividade e também ampliam a qualidade dos produtos. Esses equipamentos se tornaram tecnicamente melhores com a aplicação dos servo motores. (DOTE, 1990)

Por conseguir trabalhar com agilidade, qualidade e precisão, o emprego de servo motores foi difundido, e se tem aplicação em máquinas de usinagem, robôs, máquinas de inserção de componentes (Pick&Place), e demais outras onde a elevada precisão esteja presente. (ANDERSSON, 2000)

O complexo industrial automobilístico é grande utilizador dos robôs para a fabricação das peças e montagem dos automóveis. Tais indústrias são das principais usuárias de servo motores.

O termo servo motor basicamente significa que um sistema de realimentação é usado para o controle de velocidade. (GROOVER, 2008). Entender o funcionamento de um servo motor, seu acionamento, suas características, ajudam aos profissionais da área de manutenção, processo, e até mesmo aos operadores, a maximização da produtividade da máquina, além de ampliar a sua vida útil e compreender os limites do equipamento. Para isso, é necessário o estudo a fundo das características físicas desses motores, tal como o seu acionamento e comunicação com os demais dispositivos das máquinas.

1.1 PROBLEMA

Não é incomum encontrar profissionais das áreas técnicas que não compreendam o funcionamento de servo motores, tampouco, é difícil consultar acervos (físicos ou eletrônicos) com um conteúdo explicativo acerca deste tema.

Para se realizar uma intervenção em alguma máquina, os técnicos de manutenção se deparam com esses motores, e não compreendem a lógica de cabeamento, quais as possíveis causas para determinada falha, e como solucioná-la. Já a Engenharia de Processo, desconhece os limites dos servo motores, sobrecarregando estes, ou até mesmo, não utilizando toda a sua capacidade.

1.2 JUSTIFICATIVA

A literatura é suficiente ou até excessiva sobre os motores elétricos convencionais (CC, indução, síncrono), porém os servo motores são máquinas elétricas razoavelmente novas e é escassa a literatura sobre tais. Este trabalho será desenvolvido para contribuir na difusão do conhecimento sobre funcionamento, aplicação e manutenção de servo motores. Mesmo com a difusão dos servo motores percebe-se um grande número de dúvidas relacionadas ao seu funcionamento, ao seu controle e à tecnologia envolvida nesses equipamentos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Realizar estudo sobre servo motores para se criar um material explicativo com informações que contenham o funcionamento, acionamento e características físicas deste tipo de motor.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar estudo sobre o acionamento dos servo motores;
- Comparar a utilização dos servos com os demais;
- Visão geral sobre a parametrização;
- Visão geral sobre o acionamento (servo *drives*);
- Entender a comunicação entre o motor e o *drive*, e entre *drive* e Controlador;

- Gerar material de consulta para os profissionais da área.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está dividido em cinco capítulos, integrados e complementares.

O capítulo 1 contempla a introdução com a descrição do tema, objetivos, justificativa e premissas/problemas da pesquisa.

Uma revisão bibliográfica é feita no capítulo 2, composta por uma motores CC e CA, Servo motores, Encoders, Servo *drives* e redes motion control.

A conclusão e considerações finais compõe o capítulo 5, final desse documento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Motores de Corrente Contínua

Os motores de corrente contínua (CC) são máquinas elétricas que operam, como o próprio nome diz, com corrente contínua. Ao receber a tensão contínua nos enrolamentos do motor, é produzido a força magnetomotriz, responsável pela transformação de energia elétrica em energia mecânica. Sua principal aplicação está ligada ao controle de velocidade com criticidade de torque. (SIMONE, 2000; NASCIMENTO JUNIOR, 2006).

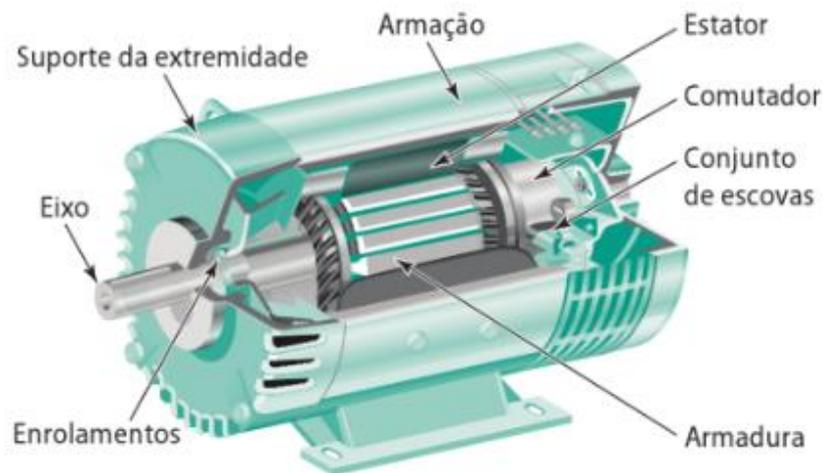


Figura 1 - Construção de um motor CC.
Fonte: Petruzella (2013).

A construção de um motor CC é composta de armadura, estator, comutador, conjunto de escovas, eixo e enrolamentos, conforme visto na Figura 1.

Os motores CC podem ser divididos, considerando sua construção, em motores de ímã permanente, motores *shunt*, motores série e motores compostos. (ALCIATORE & HISTAND, 2014).

O controle de velocidade dos motores CC é feito através da alteração da tensão aplicada ao mesmo.

2.1.1 Motores CC com escova

Motores CC com escova possui um rotor livre, chamado assim por ser construído com bobinas de fio montados nas ranhuras de um cilindro de material magnético, denominada armadura. A corrente gerada através da aplicação de tensão nas bobinas da armadura gera uma força eletromotriz nas suas laterais, em um ângulo de 90° com o campo, forçando a girar. O circuito comutador é responsável pela manutenção da rotação, através da inversão do sentido de corrente nas bobinas, realizado com o uso das escovas, que fazem contato com o anel comutador. (BOLTON, 2009).

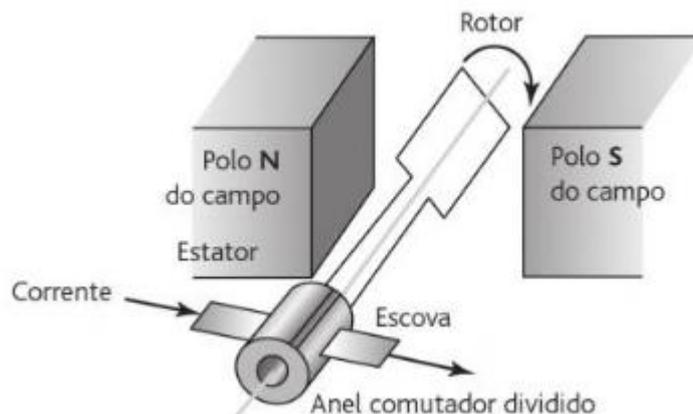


Figura 2 - Exemplo de comutador.
Fonte: Bolton (2009).

Na Figura 2, está apresentado a forma que é construído um dispositivo comutador, com a escova aplicando tensão ao rotor através do anel comutador dividido. Nesse caso, como o anel apresenta apenas duas divisões, para se inverter a corrente, o rotor deve gerar no mínimo 180° , por esse motivo, para se evitar que o motor permaneça inerte mesmo com a aplicação de tensão, esses anéis são produzidos de forma que cada escova alimente ao menos 2 bobinas. (BOLTON, 2009). Os polos N e S dos ímãs permanentes estabelecem um fluxo magnético contínuo na região onde se localiza o rotor.

2.1.2 Motores CC sem escova

Os motores CC sem escova apresentam o mesmo princípio de funcionamento dos com escovas, porém a comutação é feita eletronicamente utilizando transistores de potência. O rotor destes é constituído por ímãs permanentes, o que torna o campo magnético contínuo e independente da corrente, além de um volume reduzido.

Esses motores vêm cada vez mais sendo utilizados, por possuírem menos manutenção que os convencionais e ter maior rendimento comparados a estes. (PAZOS, 2002; DE MATOS, 2012)

2.2 Motores de Indução Trifásico

Motores de Indução trifásico são aqueles que atuam com a aplicação de três fases em seus enrolamentos. Divididos em duas categorias principais, assíncronos e síncronos. Os enrolamentos são construídos de forma individuais e independente de sua quantidade, são interligados entre si de forma a produzir três bobinas distintas, denominados: Fase A; Fase B; e Fase C. (NASCIMENTO JUNIOR, 2006; PETRUZELLA, 2013)

Motores assíncronos representam a maioria dos motores do mercado, este possui um rotor em curto-circuito, que consiste em uma pilha de lâminas finas com alta permeabilidade com espaços, estas seguras com aço ou ferro fundido que promovem um suporte mecânico. Os enrolamentos são envolvidos através dos espaços. A montagem do rotor se assemelha a uma gaiola feita de alumínio, e as pontas dos condutores conectadas por anéis de terminação, apelidado de gaiola de esquilo.

O motor gira quando o estator induz corrente no rotor, e a velocidade que ele gira, é a velocidade do motor, calculada pela frequência de entrada e o número de pólos do estator.

A diferença de velocidade de sincronismo e a velocidade rotórica, determinado de deslizamento ou escorregamento, é um aspecto importante dos motores assíncronos. (DE MATOS, 2012)

2.2.1 Motor Síncrono Rotor Bobinado

Motores síncronos possuem rotores bobinados ou constituídos de ímãs permanentes. A rotação é diretamente proporcional à frequência de alimentação e inversamente proporcional ao número de pólos magnéticos do motor, conhecida por velocidade de sincronismo. Esse tipo de motores não consegue arrancar diretamente com a frequência da rede, visto que não conseguem gerar rotação de maneira assíncrona. Os motores síncronos com rotor bobinado possuem um conjunto de escovas, a fim de possibilitar a alimentação nesse conjunto. (DE MATOS, 2012).

2.2.2 Motores Síncronos de Ímãs Permanentes

O motor síncrono de ímãs permanentes (PMSM) apresenta uma configuração quase em tudo semelhante à de um motor síncrono convencional (rotor bobinado), tendo como principal diferença a presença de ímãs no rotor. (DE MATOS, 2012)

O estator de um PMSM é constituído por ranhuras onde são embutidos os enrolamentos, podendo ser feitos de cobre ou alumínio. A presença de ranhuras afeta na forma da onda de indução magnética no entreferro, resultando em harmônicos que afetam a força eletromotriz induzida. Há também um problema conhecido como *Cogging Torque* que resulta na interação permanente da força magnetomotriz produzida pelo ímã com a permeabilidade do entreferro, o que manifesta a tendência de o rotor procurar posições estáveis, mesmo quando desligado, problema este que é bastante prejudicial em aplicações de precisão por introduzir pequenas variações de velocidade que geram vibrações no motor. (DE MATOS, 2012)

O rotor de um PMSM pode assumir várias configurações, estas definidas de acordo com a forma que os ímãs são alojados, são três maneiras possíveis:

- Montagem Superficial: Os ímãs são colados na superfície do rotor, normalmente apresenta um baixo momento de inércia e relutância magnética muito baixa, o que torna o controle da máquina simples. É um tipo

de configuração que não é adequada a aplicações de alta velocidade. É a topologia mais utilizada em servo motores.

- Montagem Inserida na Superfície: Os ímãs são inseridos na superfície do rotor. Usado para aplicações que requerem tração, onde a operação acima da velocidade nominal é frequente.
- Montagem no Interior: Configuração muito utilizada em aplicações que requerem velocidades elevadas. Possuem um custo elevado quando comparadas com as topologias de ímãs na superfície. (AYDIN, 2012; ANDERSON, 2000; DE MATOS, 2012)

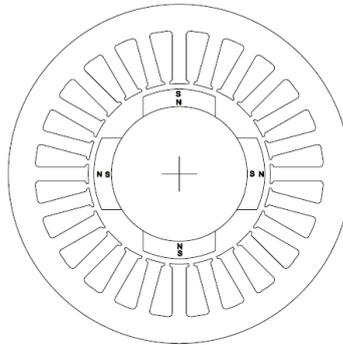


Figura 3 - Rotor com montagem de ímãs na superfície.
Fonte: Andersson (2000).

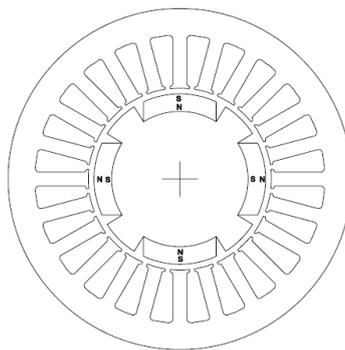


Figura 4 - Rotor com ímãs inseridos na superfície.
Fonte: Andersson (2000).

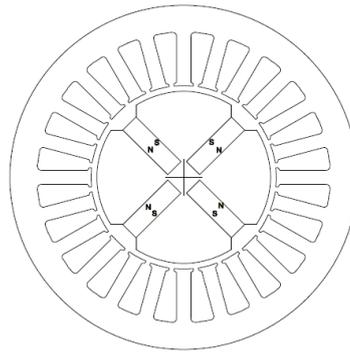


Figura 5 - Motor com ímãs montados internamente.
Fonte: Andersson (2000).

2.3 Encoder

É um dispositivo digital usado para medir posição e/ou velocidade, composto por disco de vidro ou plástico que giram entre uma fonte de luz (LED) e um par de fotodetectores, que conforme o disco roda, gera em sua saída uma série de pulsos, devido à codificação com setores alternados de transparência e opacidade. O número e a frequência dos pulsos são proporcionais a velocidade e posição do eixo conectado ao disco. Encoders podem ser usados em instrumentos lineares e rotativos. (ALCIATORES & HISTAND, 2014; GROOVER, 2008 ; ROSÁRIO, 2005).

Há dois tipos de encoders: Incremental e Absoluto, sua diferença se dá na forma que são construídos e a maneira de operação.

2.3.1 Encoder Incremental

O encoder incremental produz pulsos digitais e as posições rotacionais do eixo, medidas de forma relativa. Seus pulsos são gerados provenientes de dois sensores defasados de 90° colocados no disco óptico, o que permite o aumento da resolução e o controle de sentido de giro. Há também um terceiro sensor, utilizado para a obtenção do ponto de inicialização do sistema. A resolução desses sensores se dá pelo número de aberturas existentes no disco. (GROOVER, 2008; ROSÁRIO, 2005)

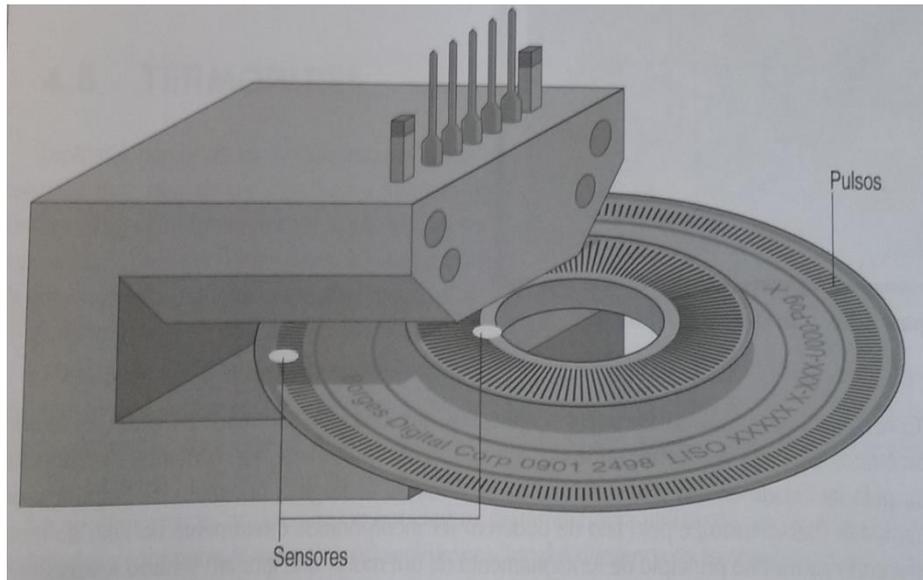


Figura 6 - Exemplo de Encoder Incremental.
Fonte: Rosario (2005).

Na utilização desse modelo de encoder, não se é conhecida a posição inicial a partir dos sinais gerados por ele, para esta função se utiliza de outros sensores, para transmitir ao controlador ponto de início do sistema, comumente conhecido como ponto zero. Sua utilização é mais aplicada a sistemas que necessitam apenas o controle de velocidade e/ou sentido de giro. (ROSÁRIO, 2005; GROOVER, 2008)

2.3.2 Encoder Absoluto

O encoder absoluto foi projetado para que cada posição de se disco transmita apenas uma palavra através da construção de várias faixas com os furos intercalados em cada uma delas, de forma que o sinal de saída seja um sinal binário (código *gray* ou binário natural). (ALICATORE & HISTAND, 2014; GROOVER, 2008).

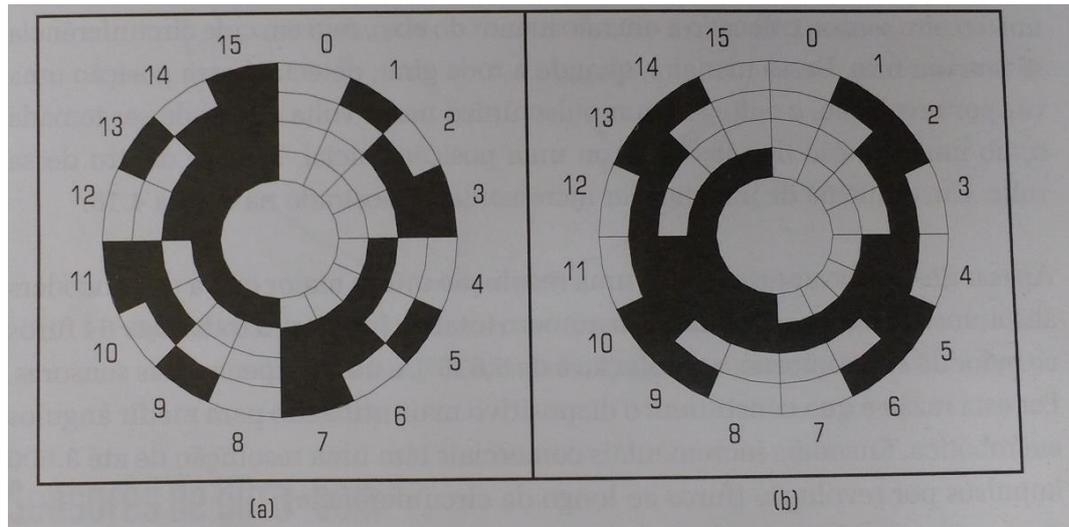


Figura 7 - Faixas de Encoder Absoluto.
Fonte: Pazos (2002).

Na Figura 7, há dois exemplos de discos de econdere absoluto, um com o código binário (a) e outro com o código gray (b). Quando comparados aos encoder incrementais, os absolutos são muito mais complexos e de custo mais elevado. (PAZOS,2002; ROSÁRIO, 2005).

2.4 Servo drive

Servo *drive* ou servo conversor tem função semelhante à do inversor de frequência que controla motores de indução trifásico, porém nesse caso controla os sinais de tensão, corrente e frequência que são enviados ao servo motor. É ele o responsável pelo controle de velocidade, torque e posição de servo motores, sua característica central é o alto desempenho e alta precisão de controle do movimento do atuador devido à operação em malha fechada, feita através da realimentação de posição dada pelo sensor acoplada ao eixo.

O microcontrolador (CPU – Unidade de processamento única) é responsável pelo processamento dos dados, e pelo cálculo que possibilita determinar a velocidade ou a distância percorrida. Nele são inseridos algoritmos de controle, que são executados em tempo real, encarregado de garantir velocidade e posição estejam de acordo com os desejados. O cálculo de valores de referência para PWM (Modulação por Largura de Pulso) para as tensões produzidas pelo

conversor é feito também na CPU, tal como a manipulação da comunicação entre o supervisor de controle e os comandos de processamento. (BISHOP, 2008; LEITE et. al., 2015)

O sinal de PWM é emitido para o circuito de potência, composto por transistores IGBT's, responsáveis pelo acionamento do servo motor, exemplo da estrutura básica de potência, está representado na Figura 8. Ainda da Figura 8, os diodos de D1 a D6 estão efetuando retificação trifásica em onda completa enquanto os IGBT's de V1 a V6 efetuam a inversão, gerando 3 fases controladas, aplicadas ao servo motor.

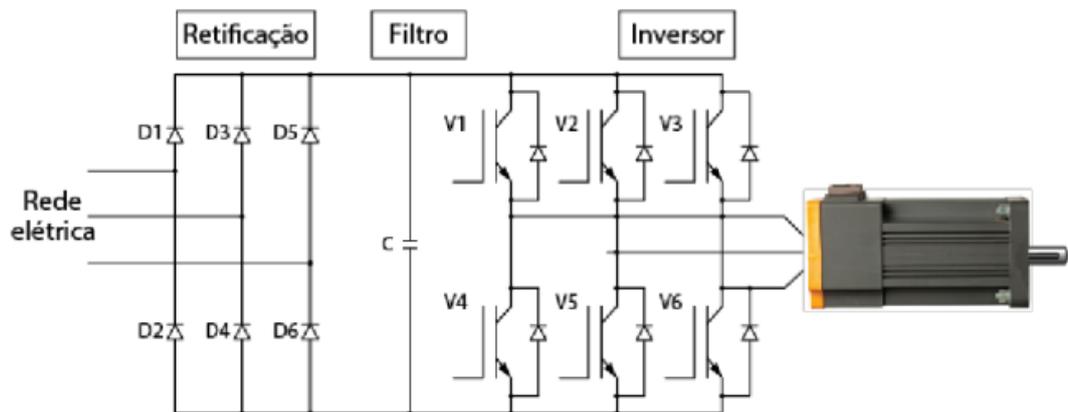


Figura 8 – Etapa de potência de um servo conversor.
Fonte: Leite et. al. (2015).

Como nos inversores de frequência, para efetuar ajustes, são inseridos parâmetros ao servo conversor através de um *software* ou Interface Homem-Máquina (IHM), esses parâmetros definem o comportamento de todo o sistema (LEITE et. al., 2015).

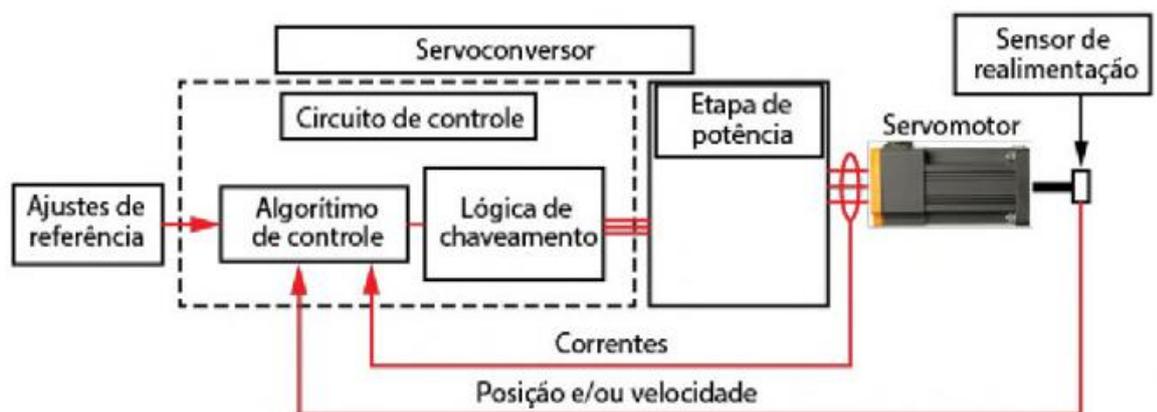


Figura 9 - Estrutura de um servo conversor.
Fonte: Leite et. al. (2015).

Na figura 9 está apresentada a estrutura de um servo conversor, nela estão inseridos o algoritmo de controle (CPU) e a lógica de chaveamento (circuito de potência). O sensor de Realimentação fornece informações de posição, velocidade e sentido de giro para o circuito de controle.

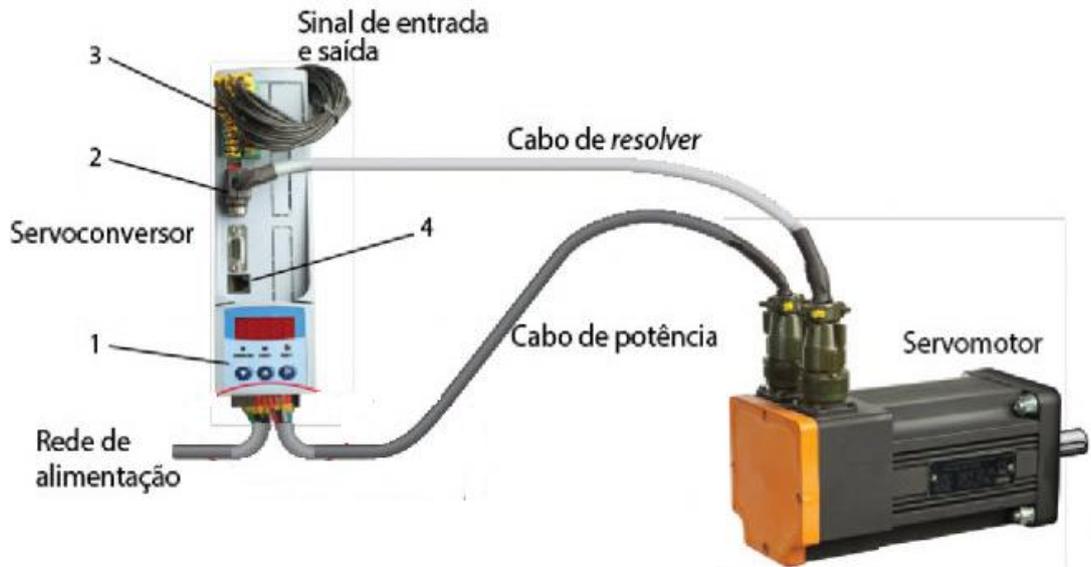


Figura 10 - Exemplo de ligação de um servo conversor.
Fonte: Leite et. al. (2015).

Um exemplo de ligação de um servo conversor é ilustrado na Figura 10, onde temos:

- 1) Interface Homem Máquina: Responsável pela comunicação visual (sinalização de erros, falhas, e se está energizado) e pelo acesso aos parâmetros dos servo conversor. Há servo conversores que não possuem teclas de acesso, onde só é possível a leitura das falhas apresentadas, e sua programação é realizada por meio de *softwares*.
- 2) Sensor de realimentação: Conector onde é ligado o sensor de realimentação para monitoramento de posição e/ou velocidade.
- 3) Borne de entradas e saídas: São específicos de acordo com o servo conversor, mas podem ser utilizados para receber comandos de ajuste de velocidade, posição, enviar sinais de alarme, informações de corrente de motor, e se está ligado o servo motor.
- 4) Conector para comunicação: Tem como objetivo efetuar a comunicação entre o servo conversor e um terminal de programação. Pode ser

utilizado para se controlar as ações do servo motor através de um CLP, como monitorar os valores dos parâmetros em tempo real. (LEITE et. al., 2015.)

3 DESENVOLVIMENTO DO TEMA

3.1 SERVO MOTORES

Servo motores são aqueles que o controle de velocidade e rotação são controlados através de realimentação de um sensor acoplado ao eixo e controlador específico. Estes são classificados como motores síncronos, porém possuem características especiais em relação aos demais do mesmo estilo. (NASCIMENTO JUNIOR, 2006; ALCIATORE & HISTAND, 2014)

3.1.1 Servo motor de Indução

Servo motor de indução com um rotor gaiola de esquilo tem inércia de torque muito pequena, alta confiabilidade e é muito barato. Todavia, possui um controle muito complicado, caro e com qualidade sensível às mudanças de parâmetros do motor. Não é um motor muito utilizado.

O drive de um servo motor de indução atua com dupla conversão (AC-DC/DC-AC), ou seja, alimentado com tensão AC, que é convertida em DC, e filtrada em um banco de capacitores. O módulo inversor é responsável pela nova conversão (DC-AC), que ocorre por meio da geração de sinais PWM a transistores IGBT's, calculado por meio do circuito de controle e a realimentação do sensor de posição. A Figura 11 ilustra o diagrama de blocos.

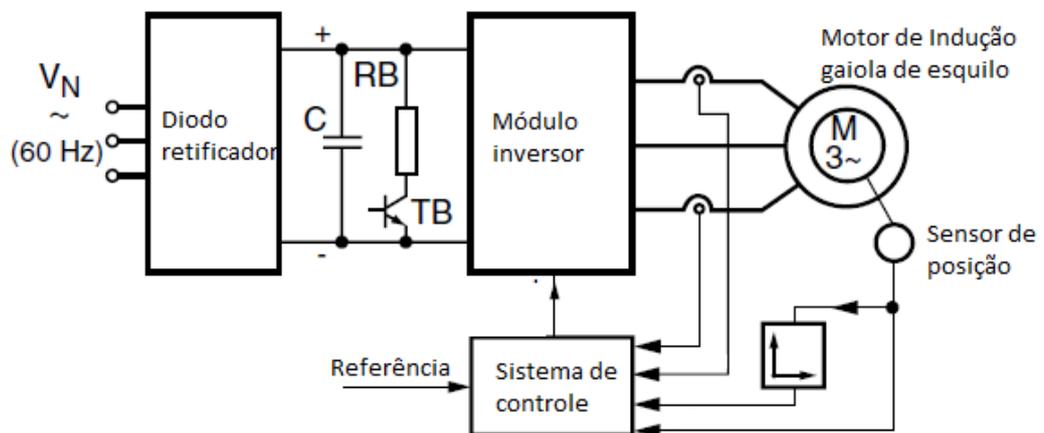


Figura 11 - Diagrama de blocos.
Fonte: Adaptado de Skvarenina (2001).

3.1.2 Motor Síncrono de Imã Permanente

O motor síncrono de ímã permanente (PMSM) é muito mais caro que os demais, porém o controle deste tipo de motor é muito mais simples que o usado pelo motor de indução, e comparados a ele, possui menor torque de inércia e requer menos manutenção. Resultado disso, o PMSM se tornou um dos mais populares tipos de servo. O circuito inversor é idêntico ao usado nem motores gaiola de esquilo.

Há duas classes de PMSM:

- Com fluxo de densidade de distribuição quadrado ao longo do rotor, o que produz um sinal de onda trapezoidal, chamados PMSM trapezoidais. Esses motores são motores CC sem escovas, porém, a alimentação é diferente da convencional, por isso o fluxo trapezoidal.
- Com fluxo de densidade de distribuição senoidal, e produz uma forma de onda senoidal, chamados PMSM senoidais. Motores CA com ímãs permanentes, entretanto, também precisam de dispositivos para o acionamento, e não podem ser ligados diretamente à rede.

Os ímãs utilizados nessa classe são de alto desempenho, para melhor rendimento do motor, e sua montagem, pode ser feita em três formas no rotor: superficial, inserido na superfície e no interior.

A montagem superficial tem aplicação em motores que não serão utilizados em alta velocidade, pois com o aquecimento, há a tendência da descolagem dos ímãs do rotor. Os motores nesse caso são mais indicados para aplicações de controle de movimento, e/ou velocidade baixas (3.000 RPM).

Motores com os ímãs inseridos na superfície são indicados para aplicações que requerem mais tração, por possuírem características de montagem melhores que os superficiais. Apesar de não ser projetados para trabalhar em altas velocidades, são mais resistentes a aplicações que esta chega acima da velocidade nominal.

Diferente das outras montagens, o controle de um motor com montagem no interior é mais complicado que as demais, porém atingem velocidades muito elevadas. Também pode ser empregado com alto uso de torque, mas seu custo é elevado o que o leva ser encontrado em extremas necessidades.

3.1.3 Motores CC com escovas

Motores CC com escovas, quando servo acionados, são aplicados em sistemas de controle de velocidade, e alta velocidade de controle de posição. Suas vantagens são o baixo custo, velocidade moderada e bom torque final, além da simplicidade dos drives. Em contrapartida possuem necessidade de manutenção, e as escovas geram faíscas, não sendo aplicados em áreas.

Como são motores de funcionamento simples, são encontrados normalmente em máquinas que não requerem uma grande precisão, como uma esteira transportadora, por exemplo. Todavia, devido a sua manutenção, ele tem caído em desuso, e é substituído por motor de indução trifásico, que apesar de seu controle ser mais complicado, consegue realizar as mesmas funções, com um custo menor.

3.1.4 Motores DC sem escovas

Servo motores sem escovas não possuem manutenção, tem uma longa vida-útil, alcança altas velocidades, silencioso e tem uma baixa temperatura de trabalho, porém são caros e os drives são mais complicados. Usados na robótica, máquinas *pick-and-place*, e aplicações com alto torque. (BISHOP, 2007)

Os servo motores sem escovas possuem todas as características de um motor AC e também são chamados de servo motores AC. São combinados com um dispositivo de controle dedicado, e sua performance é igual ou superior a um motor DC de alto rendimento.

O circuito inversor para o acionamento de um motor DC trifásico é composto por seis dispositivos eletrônicos, acionados como chaves e seis diodos que protegem as chaves eletrônicas quando abertas.

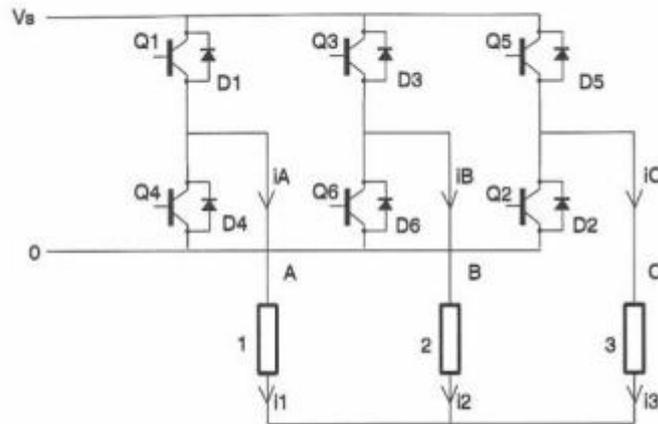


Figura 12 - Circuito Acionador de um Motor CC sem escovas.
Fonte: Miller (1989).

A Figura 12 demonstra um acionamento para um motor DC sem escovas, o controle deve ser feito de maneira que cada fase do estator seja percorrida por uma corrente de forma quadrada, defasadas 120° uma da outra.

As vantagens desse motor, vem da união dos pontos fortes dos motores de indução e dos motores CC com escovas, de maneira a eliminar os pontos críticos de cada um deles. É um motor de alto rendimento DC construído de maneira simples, semelhando-se à um motor de indução.

A velocidade de rotação de um servo motor é controlada variando-se a tensão aplicada em sua armadura, e como essas são quase proporcionais, o limite de variação de rotação se dá pelo limite de tensão.

3.2 Integrando o Encoder ao motor

Em sistemas *Motion control* é necessária a leitura da grandeza que é controlada (posição, velocidade, sentido de giro, entre outras), o que é conhecido como realimentação. Em leitura de posições relativas, a aplicação de um encoder do tipo incremental é a mais comum, já em posições fixas (comprimento de um eixo), o emprego de encoders do tipo absoluto é mais comum. (BISHOP, 2008).

A relação de pulsos por movimento que o encoder transmite ao controlador depende do sistema mecânico que o motor está interligado. Há casos que estes são diretamente acoplados a fusos de esferas, os quais possuem um passo, e esse

passo movimenta o eixo em determinada distância. Um passo do fuso equivale a uma volta do eixo do motor, e uma volta do encoder. Caso no equipamento, esse giro represente 10 mm de deslocamento, e a resolução do encoder seja de 1000 pulsos, isso significa que para cada pulso, o movimento real é de 0,01 mm.

A associação de pulsos/mm é feita diretamente no controlador da máquina, qual envia ao drive a quantidade de pulsos necessários para a execução do trabalho.

O controle de velocidade é mais simples, porque não é necessário se conhecer a mecânica no equipamento, já que o sensor é acoplado diretamente ao eixo do motor. O drive calcula o tempo de cada volta do motor e calcula sua velocidade em RPM, e também verifica o sentido, através do recebimento dos pulsos das duas fases dos encoder (se incrementais).

3.3 Exemplo de aplicação

Sistemas servo acionados são bastante utilizados nas indústrias, onde se deseja aumentar a produção, sem perder a qualidade. Há várias máquinas que se baseiam nesse conceito para acelerar a produção, exemplo dessas são as máquinas CNC e os robôs industriais.

3.3.1 Máquina CNC (Comando Numérico Computadorizado)

Máquinas CNC são equipamentos programáveis com a capacidade de se controlar, com comandos numéricos, a execução do seu trabalho. A encontramos em diversas aplicações e diversos tipos de indústria como indústria têxtil, alimentícia, de embalagens, de calçados, de plásticos, metalúrgica, e outras.



Figura 13 - Exemplo de uma máquina CNC.
Fonte: Leite et. al. (2015).

Um exemplo de um torno CNC é visto na Figura 11, destacados seus principais componentes como a placa giratória, responsável pela fixação da matéria prima que será usinada, essa possui o sistema servo acionado para se controlar a operação de giro (velocidade e sentido). A tela de programação é onde o programa, de código específico para cada fabricante, é inserido, nele consta as informações de usinagem (ou outra operação, a depender da máquina) a ser realizada.



Figura 14 - Painel de comando.
Fonte: Leite et. al. (2015).

O painel de comando, Figura 14 é onde é instalada a parte de acionamento dos servo motores, comumente possui servo *drives*, inversores de frequência, CLP, entre outros componentes de automação e proteção elétrica.

O comando numérico (NC) é uma forma de automação programável que as ações dos mecanismos são controladas por um programa contendo códigos alfanuméricos, que representam posições entre a área de trabalho e a área da peça. A área de trabalho é a ferramenta ou outro elemento de processamento, área da peça é o que está sendo processado. (GROOVER, 2002).

Há diversas aplicações para o sistema CNC, entre elas estão:

- Usinagem: presentes principalmente na indústria metalúrgica, são usadas para produção em escala, ou quando a precisão da peça é crítica. São encontradas para realizar as operações de torneamento, fresamento e furação.
- Máquinas de usinagem CNC, usadas na indústria metalúrgica, utilizam a tecnologia de servo motores para realizar seus movimentos. O controle dessas máquinas é, em sua grande maioria, em malha fechada.

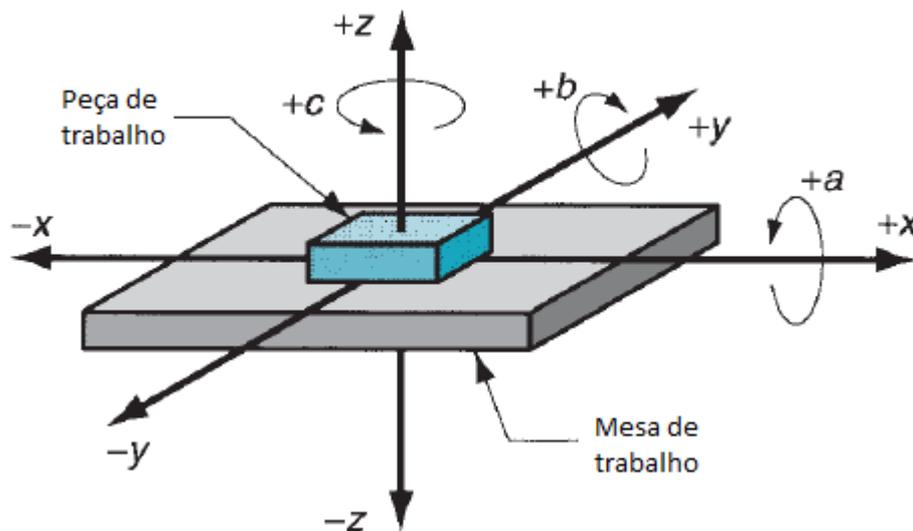


Figura 15 - Disposição dos eixos de uma máquina CNC.

Fonte: Groover (2002).

Na Figura 15, têm-se a disposição de um equipamento que possui 3 eixos, o “X”, “Y” e “Z”, neles é controlado o posicionamento, através da instalação de um servo motor acoplado a um sistema de transmissão mecânica, Figura 15 composto por um fuso de esferas, mancal e rolamentos, e o controle de rotação e posicionamento em torno dos próprios eixos. O sentido que o eixo se desloca depende do sentido de giro do motor, e a precisão do movimento, pelo passo do fuso de esferas.

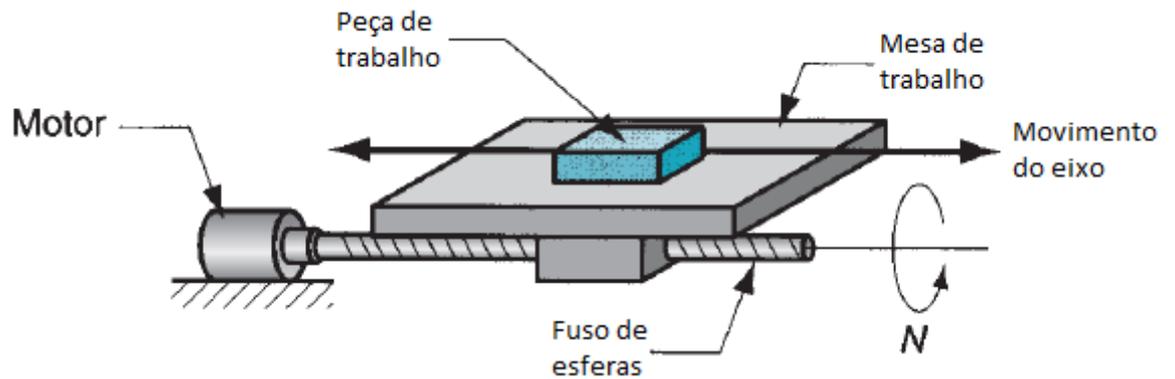


Figura 16 - Sistema mecânico de um eixo.

Fonte: Groover (2002).

A distância mecânica é fixa, então é incluso o recurso de referências, a fim de que a máquina reconheça o seu posicionamento, através da instalação de sensores fim de curso ou mesmo pela leitura do esforço do motor, que ao sofrer o esforço decorrente a limitação mecânica, aumenta o torque aplicado e sua corrente.

Para realizar o movimento de um dos eixos, o CNC transmite a informação ao CLP, que por sua vez, envia o comando ao servo conversor. A leitura de dados de posição é feita em tempo real através da rede ao CLP, e ao CNC, quando atingida a posição, e realizada a nova etapa do programa.

Há dois tipos de controle de movimento: o sistema em malha aberta; e em malha fechada. A diferença entre eles é que no primeiro caso, há realimentação, realizada pelo sensor acoplado ao eixo. Em sistemas com malha aberta, normalmente são utilizados motores de passo para se realizar o movimento. A precisão do movimento é dada pelo número de pólos do motor. Conforme a fórmula abaixo:

$$\alpha = \frac{360}{n_s}$$

α = ângulo de passo em graus; n_s = número de passos do motor (precisa ser número inteiro).

Em sistemas com malha fechada, são utilizados sensores para a realimentação de posição, velocidade e sentido de giro. A precisão de movimento é dada pela resolução do encoder interligado ao motor.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Quando se ouve o termo servo motor, o que se imagina é um dispositivo específico, fabricado de maneira única, criados apenas para determinadas aplicações. Ao analisar o conceito, entende-se que o mais importante para um motor ser considerado servo, é realizar o controle, por meio de circuitos eletrônicos e com uma realimentação acoplada ao eixo.

Nas aplicações de um motor de indução, o controle é mais complicado e não tão preciso, por isso não é tão utilizado, apesar do custo ser mais baixo comparado aos outros, e sem custos com manutenção.

Motores CC com escovas são mais baratos que os Motores CC sem escovas, porém necessitam manutenção, e uma menor precisão de movimento. Em movimentos que não há a necessidade de controle de posição, apenas de sentido de giro, são utilizados esses tipos de motores, já que o controle de velocidade é feito com circuitos mais simples.

A classe de motores PMSM (Motores CC sem escovas e Motores CA síncronos), é a mais utilizada em sistemas de precisão, porém são de alto custo. As vantagens desses motores incluem a não necessidade de manutenção e a alta precisão de movimento, além de conseguir alta velocidade.

Todas as categorias de servo motores estão presentes na indústria, cada aplicação utilizando qual melhor se enquadra. Em uma máquina de usinagem CNC, por exemplo, há eixos que são acionados com motores PMSM acoplados a encoders absolutos, a fim de garantir o correto posicionamento da máquina, mesmo após esta ser desligada. Há motores de acionamento de ferramentas de usinagem, pode ser acionado por um motor CC com escovas ou um motor de indução, acoplados a um encoder incremental, pois nesse caso a necessidade é apenas manter uma velocidade constante.

Os servo *drives* são necessários para realizar o controle do motor, e sua eletrônica é dedicada à categoria do motor, porém todos possuem as mesmas características de ligação. Em todos eles, há a necessidade da alimentação (normalmente feita em AC), o motor é alimentado por um circuito de potência, e o sensor de realimentação ao circuito de controle.

A comunicação dos drives é feita através de redes de comunicação industrial, ou através de entradas e saídas digitais e/ou analógicas. A rede de comunicação deve ser rápida o suficiente para garantir a velocidade de operação da máquina, ou seja, as velocidades de avanço estão diretamente ligadas à velocidade de resposta da rede que o drive está se comunicando com o CLP.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os servo motores estão presentes em todos os segmentos da indústria, desde a alimentícia até a automobilística, e seu uso contribuiu para o aumento da produção e da qualidade do produto. Nas linhas de produção, encontramos para tarefas simples desde a movimentação (esteiras), até a aplicação em robôs industriais, realizando as mais diversas tarefas.

Apesar de ser bastante difundido, a série de dúvidas que essa classe gera, contribui para o não correto manutenção, o que gera a redução da vida útil. Para um melhor aproveitamento, o correto é avaliar qual modelo de motor está sendo utilizado, tal como suas características de construção, pois estas influenciam diretamente em qual tipo de performance ele foi fabricado. Por exemplo, um motor Brushless CC pode ser construído com ímãs na superfície, que faz o motor ser ideal para aplicações que necessitam de precisão, porém não é o mais adequado ao uso em altas velocidades.

O encoder, responsável pela realimentação, é definido considerando apenas as características do motor e as características construtivas da máquina. A resolução vai estar ligada diretamente a precisão de controle de giro do motor, quanto menor o ângulo que este consegue controlar, maior será a resolução do encoder. Em casos que esse sensor esteja apenas para o monitoramento de velocidade, essa análise não é necessária. Qual será o trabalho executado, a menor distância de movimento, a velocidade aplicada, entre outros, são características do equipamento que determinam qual encoder será usado.

Por ter características específicas de construção, cada modelo de motor possui seu próprio sistema de acionamento. Isto porque o conceito de controle é diferente em cada um dos casos, entretanto, o conceito de parametrização é bastante similar em todos os modelos. Os dados a ser inseridos são, normalmente, dados de trabalho do motor (corrente, torque, potência, etc.), dados de trabalho do encoder (resolução), e as configurações de entrada/saída de dados, sejam elas feitas via entradas/saídas físicas, ou via rede de comunicação.

A comunicação tem como objetivo o controle do motor, que realiza o movimento solicitado, tal como informa quando esse foi concluído. A relação de

pulsos por distância percorrida é programada diretamente ao CLP ou outro controlador utilizado, porque a construção mecânica é responsável por essa relação.

Após a conclusão desse trabalho, pude compreender que o universo dos servo motores é amplo e, para melhor entendimento, é preciso um estudo aprofundado em cada uma das classes. Ao fim desse, consigo diferenciar os motores, e não mais tratá-los como iguais.

Há uma aplicação em específico, onde encontrei um motor Brushless CC, este é danificado constantemente. O conceito passado era que “o servo motor é fabricado para trabalhar em altas velocidades”, porém, compreendi que não é uma regra, e que há motores que são fabricados para operar em uma velocidade considerada normal (3.000 RPM), e nesse caso, ao desmontá-lo, descobri que sua construção era do tipo ímã na superfície, e provei, com base na revisão bibliográfica, que o uso dos motores estava incorreto.

Para a continuação desse trabalho, proponho um estudo mais avançado nas categorias mais aplicadas, o Brushless CC e o Brushless AC. Há uma grande difusão desses, e uma infinidade de aplicações, porém não há muita literatura nacional e um conceito muito genérico realizado ao tópico servo motores.

6 REFERÊNCIAS

ALCIATORE, David G. HISTAND, Michael B. **Introdução à mecatrônica e aos sistemas de medições**.4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

ANDERSON, Svante. **Optimization of a Servo Motor for an Industrial Robot Application**. 2000. Department of Industrial Electrical Engineering and Automation – Lund University, Lund, 2000.

AYDIN, Metin. **Brushless Permanent Magnet Servomotors**. Departamento of Mechatronics Engineering, Kacaeli University, Kacaeli, 2012.

BISHOP, Robert H. **The Mechatronics Handbook: Mechatronic system control, logic and data acquisition**.2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.

BOLTON, William. **Mecatrônica: Uma abordagem multidisciplinária**. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

DE MATOS, Nuno Miguel Rodrigues. **Análise do Funcionamento de um Servomotor de Corrente Alternada com Ímãs Permanentes**. 2012.114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Blumenau, 2012.

DOE, Yasuhiko. **Servo motor and motion control using digital signal**.1. ed. New Jersey: 1990.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons: 2002.

GROOVER, Mikell P. **Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing**.3. ed. New Jersey: Pearson, 2008.

LEITE, Anderson Galdino. DA SILVEIRA, Rodrigo Silvério. DE OLIVEIRA FILHO, Henrique Tavares. **Sistemas Eletroeletrônicos industriais: Manutenção**. 1. ed. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2015.

MILLER, T. J. E. **Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives**. 1. ed. London: Oxford University Press, 1989.

NASCIMENTO JUNIOR, Geraldo Carva. **Máquinas elétricas: teorias e ensaios**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2006.

PAZOS, Fernando. **Automação de Sistemas & Robótica**. 1. ed. Rio de Janeiro, Axcel, 2002.

PETRUZELLA, Frank D. **Motores elétricos e Acionamentos**. 1. ed. São Paulo: Bookman, 2013.

ROSÁRIO, João Maurício. **Princípios de mecatrônica**. 1. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

SIMONE, Gilio Aluísio. **Máquinas de Corrente Contínua: Teoria e Exercícios**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2000.

SKVARENINA, Timothy L. **The Power Electronics Handbook**. 1. ed. : USA: CRC Press LLC, 2002.