

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL**

FLÁVIO ROBERTO SFAIR TOMASCHITZ

**CONTROLE E ANÁLISE DA VELOCIDADE DE SERVOS-MOTORES
DE MANIPULADORES CARTESIANOS EM UMA LINHA
AUTOMATIZADA DE ESTAMPARIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2013

FLÁVIO ROBERTO SFAIR TOMASCHITZ

**CONTROLE E ANÁLISE DA VELOCIDADE DE SERVOS-MOTORES
DE MANIPULADORES CARTESIANOS EM UMA LINHA
AUTOMATIZADA DE ESTAMPARIA**

Monografia de conclusão do curso de Especialização em Automação Industrial do Departamento Acadêmico de Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Automação Industrial.

Prof.Orientador: Dr .Kleber Kendy Horikawa
Nabas

CURITIBA

2013

RESUMO

TOMASCHITZ, Flávio, **Controle e análise da velocidade de servos-motores de manipuladores cartesianos em uma linha automatizada de estampa**. 2013. Monografia (Especialização em Automação industrial) – Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

Este trabalho tem a propor um sistema de controle da velocidade de servo-motor em alimentadores de chapas, visando atenuar a fadiga de seus componentes. Inicialmente são detalhados as características e funcionamento dos servos-motores, informações sobre manipuladores cartesianos (Twist) e sua estrutura. Em seguida, será feita a análise a partir da coleta de dados e a utilização do *software* Matlab/Simulink para se realizar o estudo da curva ideal para o controle da velocidade no servos-motores. Esta pesquisa será de caráter explicativo e por fim será realizada comparações das curvas simuladas em relação a rotação por minuto do eixo no servo motor com as características do fabricante levando em conta o tempo de produção, tempo de manutenção, vida útil dos componentes e peças produzidas.

Palavras chaves: Sistema de controle. Servo motor. Fadiga.

ABSTRACT

TOMASCHITZ, Flávio, **Control and analysis of the velocity servo-motors Cartesian manipulators in an automated line for stamping**. 2013. Monograph (Specialization in Industrial Automation) - Academic Department of Electronics, Federal Technological University of Paraná, Curitiba, 2013.

This work is to propose a system of speed control servo motor on sheet feeders, to mitigate fatigue of its components. Initially, the detailed characteristics and performance of servos-engines, information about Cartesian manipulators (Twist) and structure. Then the analysis will be done through data collection and use of Matlab/Simulink to perform the study of the ideal curve for speed control motors in servos. . This study will be an explanatory and will eventually be simulated curves of comparisons performed against rotation per minute of the shaft servo motor with the features of the manufacturer taking into account the time of production downtime, service life of components and parts produced .

Keywords: Control system. Servo motor. Fatigue.

.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - COMPOSIÇÃO BÁSICA DE UM SERVO MOTOR CC	12
FIGURA 2- COMPOSIÇÃO BÁSICA DE UM SERVO MOTOR CA SÍNCRONO	13
FIGURA 3 - SERVO MOTOR AC ASSÍNCRONO.....	13
FIGURA 4 - CABOS DE COMUNICAÇÃO E POTÊNCIA	16
FIGURA 5 - ATRIBUIÇÃO DO CONECTOR, CONECTORES E SENSORES DE TEMPERATURA DO MOTOR NO MOTOR.....	16
FIGURA 6 - VELOCIDADE X TORQUE.....	17
FIGURA 7 - (A)FORMA BÁSICA DO ENCODER INCREMENTAL E (B) TRÊS FAIXAS DE ARRANJO	19
FIGURA 8 - (A) FORMA BÁSICA DO ENCODER ABSOLUTO	20
FIGURA 9 - ESTRUTURA DE UM ROBÔ CARTESIANO.....	21
FIGURA 10 - ESTRUTURA DE UM ROBÔ CILÍNDRICO	22
FIGURA 11 - ESTRUTURA DE UM ROBÔ ESFÉRICO	22
FIGURA 12 - ESTRUTURA DE UM ROBÔ ARTICULADO.....	23
FIGURA 13 - ESTRUTURA DE UM ROBÔ SCARA	24
FIGURA 14 - MANIPULADOR CARTESIANO TWIST	24
FIGURA 15 -COMPONENTES DO MANIPULADOR (CREMALHEIRA, ENGRENAGEM, VENTOSA E SERVO MOTOR).....	26
FIGURA 16 - CABO DE REDE PROFIBUS COM CLP E PAINEL VIEW (IHM).....	27
FIGURA 17 - - FALHA FADIGA EM UM EIXO. ZONA A - COMEÇO DA FALHA; ZONA B - PROPAGAÇÃO DA FALHA NA MAIOR PARTE DA SÉCÇÃO TRANSVERSAL (MARCAS DE PRAIA); ZONA C - FALHA FINAL POR FRATURA	29
FIGURA 18 - ESTRUTURA DO ENCAIXE DA ENGRENAGEM E A CREMALHEIRA	30
FIGURA 19 - ACOPLAMENTO DO SERVO MOTOR COM A ENGRENAGEM.....	30
FIGURA 20 - EXEMPLO DE MALHA ABERTA.....	31
FIGURA 21 - EXEMPLO DE MALHA ABERTA.....	32
FIGURA 22 - FÓRMULA DO SINAL DO PID	32
FIGURA 23 - FÓRMULA CONTROLADOR PROPORCIONAL.....	33
FIGURA 24 - FÓRMULA CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL.....	33
FIGURA 25 - - EXEMPLO DAS FORMAS DE ONDA DO CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL.....	34
FIGURA 26 - FÓRMULA CONTROLADOR PROPORCIONAL DERIVATIVO	34
FIGURA 27 - EXEMPLO DAS FORMAS DE ONDA DO CONTROLADOR PROPORCIONAL DERIVATIVO.....	35
FIGURA 28 - ESQUEMA DE UM MOTOR CC.....	37
FIGURA 29 - DADOS MOTOR CC	41
FIGURA 30 - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	42
FIGURA 31 - SIMULAÇÃO DA CURVA ÓTIMA DO SISTEMA.....	42
FIGURA 32 - SIMULAÇÃO DA CURVA COM AÇÃO PROPORCIONAL.....	43
FIGURA 33 - - SIMULAÇÃO DA CURVA COM AÇÃO PROPORCIONAL DO SISTEMA ESTRESSADO	44
FIGURA 34 - TELA DE CONFIGURAÇÃO DA VELOCIDADE DO SERVO MOTOR NO PAINEL VIEW	45

LISTA DE TABELA

TABELA 1 - DADOS TÉCNICOS DO MOTOR 1FK7	14
TABELA 2 - RESISTÊNCIA DE FRENAGEM	15
TABELA 3 - DADOS TÉCNICOS 1FK7100 CT	18

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 TEMA	6
1.1.1 Delimitação da pesquisa	7
1.2 PROBLEMA E PREMISSAS	7
1.3 OBJETIVOS	8
1.3.1 Objetivo geral	8
1.3.2 Objetivo específico	8
1.4 JUSTIFICATIVA	8
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	9
1.6 EMBASAMENTO TEÓRICO	9
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 CARACTERÍSTICAS DE SERVOMOTOR	11
2.1.1 Servo-motor 1FK7100-5AF71-1KA0	14
2.1.2 Encoder	19
2.1.3 Encoder AM16DQ K20	20
2.2 CARACTERÍSTICAS DE MANIPULADORES CARTESIANOS	20
2.2.1 Robô de coordenadas cartesianas	21
2.2.2 Robô de coordenadas cilíndricas	21
2.2.3 Robô de coordenadas polares (esféricas)	22
2.2.4 Robô de coordenadas de revolução (articulado)	23
2.2.5 Robô do tipo SCARA	23
2.3 MANIPULADORES CARTESIANO TWIST	24
2.3.1 - Fadiga nos componentes mecânicos do manipulador cartesiano	27
3 CONTROLE E SINTONIA	31
3.1 A IDÉIA DO SISTEMA DE CONTROLE	31
3.1.2 Sistema de controle em malha aberta	31
3.1.3 Sistema de controle em malha fechada	31
3.2 CONTROLADOR PID	32
3.2.1 Controlador proporcional (P)	33
3.2.2 Controlador proporcional integral (PI)	33
3.2.3 Controle proporcional derivativo (PD)	34
4 SIMULAÇÃO E ANÁLISE	36
4.1 PARAMETRIZAÇÕES DA VELOCIDADE X FADIGA	36
4.2 MATLAB/SIMULINK	36
4.2.1 Função de transferência do motor CC no servo motor 1FK7100-5AF71-1KA037	
4.2.2 Simulação da curva de velocidade utilizando a ferramenta Matlab/Simulink ...	40
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
6 REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

O trabalho inicialmente apresenta a introdução dos sistemas de controle nos meios industriais, apontando as vantagens e desvantagens com relação ao seu uso. Também será evidenciado o uso de ferramentas de controle e equipamentos para analisar e obter os resultados.

1.1 TEMA

A evolução do controle automático além de ter desempenhado um papel vital no avanço da engenharia e da ciência, “ tornou-se uma parte importante e integrante dos processos industriais e de manufatura modernos” (OGATA, 2003). Utilizando um sistema de controle automático em processos industriais, o mesmo se torna menos instável e mais seguro, resultando em ganhos para produção e melhor rendimento para a economia.

O problema da não utilização do sistema de controle automático seria a redução da vida útil tanto para equipamentos e seus componentes como perda de tempo em manutenções, perda de produção, ocasionando prejuízos financeiros para as empresas. Assim, “um sistema de controle é uma interconexão de componentes formando uma configuração de sistema que produzira uma resposta desejada do sistema (DOR, RICHARD C, 2001).

O uso do controle automático é realizado com o uso de *softwares* como, ” o Controlador Lógico Programável, CLP (*Programmable Logic Controller*), na qual, é um equipamento de automação criado inicialmente para controle lógico de variáveis discretas, cuja evolução atual abrange todos os tipos de controle” (BEGA et al, 2003,p.497). Como também a ferramenta Matlab, que utiliza uma linguagem de alto nível e um ambiente interativo para computação numérica, visualização e programação.

O servo-motor para um sistema controle tornou-se benéfico devido a sua precisão de leitura de posição, sendo usado para converter o elemento de controle

final em deslocamento mecânico, velocidade, etc., torque, como a saída desejada. Servos motores podem ser de corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA). Eles são construídos para as classificações que variam de um watt a kilowatts, vários servos motores são usados separadamente como motores CC excitados e do tipo *squirrel-cage* (gaiola de esquilo) e motores de indução tipo *drag-cup* (arrastar-copo). Portanto devem atender as características de partida e a regulação requerida para a operação de controle. Alguns dos requisitos importantes dos servos motores são os baixos momentos de inércia do rotor, a curva velocidade-torque linear com inclinação negativa, e a capacidade para suportar freqüente de partida e parada (Bhattacharya, 2009).

O presente estudo pretende analisar, a melhor velocidade utilizada em certo servo motor com a ajuda da simulação de valores o ganho do processo em relação à produção e fadiga de componentes de um manipulador cartesiano em uma linha automatizada de estamperia.

1.1.1 LIMITAÇÃO DE PESQUISA.

A fadiga excessiva de componentes industriais tornou-se um grande problema em empresas tanto em seu custo como tempos de produção. O tema proposto nesse trabalho será obter através do controle e analise a ótima velocidade do servomotor com a ajuda de softwares, a fim de, evitar o desgaste prematuro dos elementos que compõe um manipulador cartesiano.

1.2 PROBLEMA E PREMISAS

O processo utilizando manipuladores cartesianos em uma linha automatizada de estamperia necessita de velocidade e precisão combinado com a vida útil dos equipamentos que a compõe. Como as causas maiores e mais demoradas envolvem parada total do equipamento por mau uso ou uso constante, perde-se

muito tempo de produção, além do gasto para compra de novas peças e tempo de mão de obra de manutenção para o conserto adequado do equipamento.

Portanto deve se considerar o uso do sistema de controle em servos-motores para se obter a condição ideal neste processo visando reduzir as perdas desnecessárias e a prolongação do uso dos componentes.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Propor uma curva ótima para a velocidade de servo motor utilizando *softwares* para a simulação, a fim de, obter o controle sobre o processo de estamperia automatizado.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o sistema de controle da linha automatizada de estamperia.
- Apresentar os servos motores e seus detalhes técnicos.
- Simular curva ótima utilizando os *softwares* Matlab/Simulink..
- Comparar resultados obtidos em relação à fadiga dos componentes do manipulador cartesiano.

1.4 JUSTIFICATIVA

A competitividade junto com prazos estipulados entre empresas fornecedoras de peças e seus clientes, exigem uma precisão no tempo de produção e entrega de seus produtos. Para as indústrias se manterem ativas no mercado, as mesmas recorrem às ferramentas de otimização de produção, assim, modernizando seus

processos com um sistema de controle bem projetado evitando degradação dos seus equipamentos e oferecendo confiabilidade e flexibilidade a seus clientes.

Utilizando adequadamente as ferramentas de automação em conjunto com as propriedades mecânicas dos componentes dos equipamentos não só irá prolongar sua vida útil como reduzir o tempo de parada ociosa de fabricação tornando o processo viável e lucrativo para as indústrias que o aplicam corretamente.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho é de pesquisa aplicada, de campo explicativo segundo modelo proposto por Bishop (2001). Existe um objetivo prático específico, sendo a substituição da velocidade utilizada no servo motor configurado no sistema operacional do manipulador cartesiano.

Será utilizado o *software* Matlab/Simulink para realizar a simulação e análise do objetivo proposto.

As técnicas a serem exploradas no estudo são classificadas como experimental, sendo baseados em eventos e experiências para se obter os resultados conforme Ogata (2003).

1.6 EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste estudo, o foco principal será o a parametrização do servo-motor por Bhattacharya (2009) que apresenta as características do mesmo, como também, o sistema de controle por Ogata (2003) para a obtenção da curva ótima através da simulação utilizando *software* MATLAB/SIMULINK® 6.5. Além destes autores, demais autores como Dorf e Bishop (2001), Bega et al (2003) contribuem para o desenvolvimento da obtenção dos resultados a serem discutido no trabalho.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho compõe-se de 6 (seis) partes, com 7 (sete) capítulos, sendo;

- Parte 1 – Capítulo introdutório;
- Parte 2 – Fundamentos teóricos: Capítulo 2;
- Parte 3 – Controle e sintonia Capítulo 3;
- Parte 4 – Simulação e análise: Capítulo 4;
- Parte 5 – Considerações finais: Capítulo 5;
- Parte 6 – Referências: Capítulo 6.

O Capítulo 1, introdutório, apresenta o tema principal, estabelecendo o objetivo do estudo com alguns conceitos a serem usados no desenvolver do mesmo.

O Capítulo 2 aborda os fundamentos teóricos com os conceitos gerais sobre o uso do sistema de controle em servos motores no processo de automação dos manipuladores cartesianos.

O Capítulo 3 indica as formas de ações proporcionais, integrais e derivativas que podem ser usadas para obter o controle do processo.

O Capítulo 4 apresenta dados obtidos pela simulação utilizando o *software* Matlab/Simulink comparando as curvas com a velocidade de rotação do eixo do servo motor.

As considerações finais serão descritas no Capítulo 5, como também, a apresentação das referências no Capítulo 6.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CARACTERÍSTICAS DE SERVOMOTOR

Servo motor é um circuito fechado, um servo mecanismo que utiliza realimentação de posição final, permitindo o controle preciso da posição angular medida, como também, a velocidade do eixo de saída pelo envio de um sinal na entrada. Aplicados em sistemas de controle que necessita de maiores precisão tais como, robótica e CNC (MEDEIROS,2011).

As vantagens de se usar servos acionamentos são devido a sua alta dinâmica de torque, alta dinâmica de velocidade, alta capacidade de sobrecarga mecânica, projeto compacto (elevada relação de potência/volume), alta precisão no posicionamento, baixa manutenção e longa vida útil e relação de custo/desempenho aceitável.

Existe uma classificação para cada tipo de servo motor:

- Servo motor de CC.
- Servo motor de CA

Os servos motores de CC (corrente contínua) são basicamente motores de CC, sendo que o estator é do tipo ímãs permanentes e seu rotor é bobinado. Possui a sua velocidade controlada através de um modulador de largura de pulso (*PWM*), assim, se tem o controle do nível de potência nos equipamentos. Também podem ser usados para proporcionar uma ação corretiva no controle de sistemas remotos de posicionamento ou em mecanismos de velocidade controlada.

Em sua estrutura encontra-se um taco gerador, sendo um pequeno gerador elétrico de CC, com campo fornecido por ímã. A tensão gerada é proporcional à velocidade com que o fluxo magnético é cortado pelo enrolamento do rotor, assim, o taco gerador é um transdutor mecânico elétrico linear. Também há um encoder, que basicamente é um dispositivo que consiste de um disco perfurado, em um sistema de componentes opto - eletrônicos.

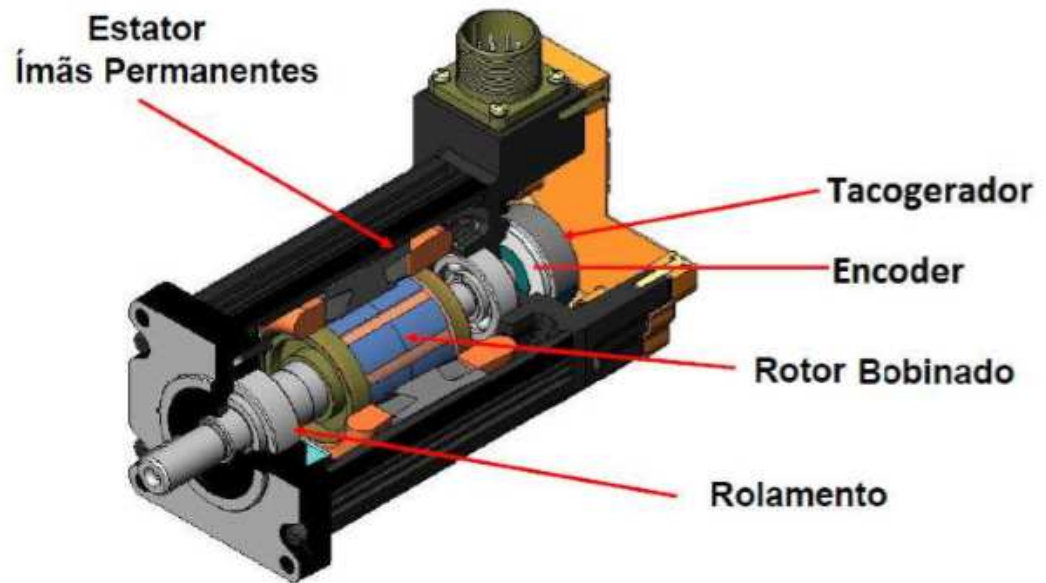


Figura 1 - Composição básica de um Servo motor CC
 Fonte: MENDES, 2004

Servo motor CA (corrente alternada), também conhecido como servo motor CC sem escovas (servo motor brushless), são motores CA, sendo que seu estator é bobinado e o rotor de ferro sólido, sendo que possui certo número de pares de ímãs permanentes. Uma de suas fases é alimentada com tensão alternada de frequência e amplitude constante e a outra fase recebe uma tensão da mesma frequência, mas defasada 90° em fase e com amplitude ajustável. Existem dois tipos de servos motores CA, o assíncrono e o síncrono.

Síncronos, são dispositivos eletromecânicos que possuem uma parte fixa (estator) e outro móvel (rotor). O estator possui bastante semelhança ao de uma máquina elétrica convencional, porém com restrições quanto à alimentação, já o rotor é composto por ímãs permanentes, os quais são posicionados alinhadamente sobre o rotor e com o controlador, ou gerador de sinais, chamado de resolver.

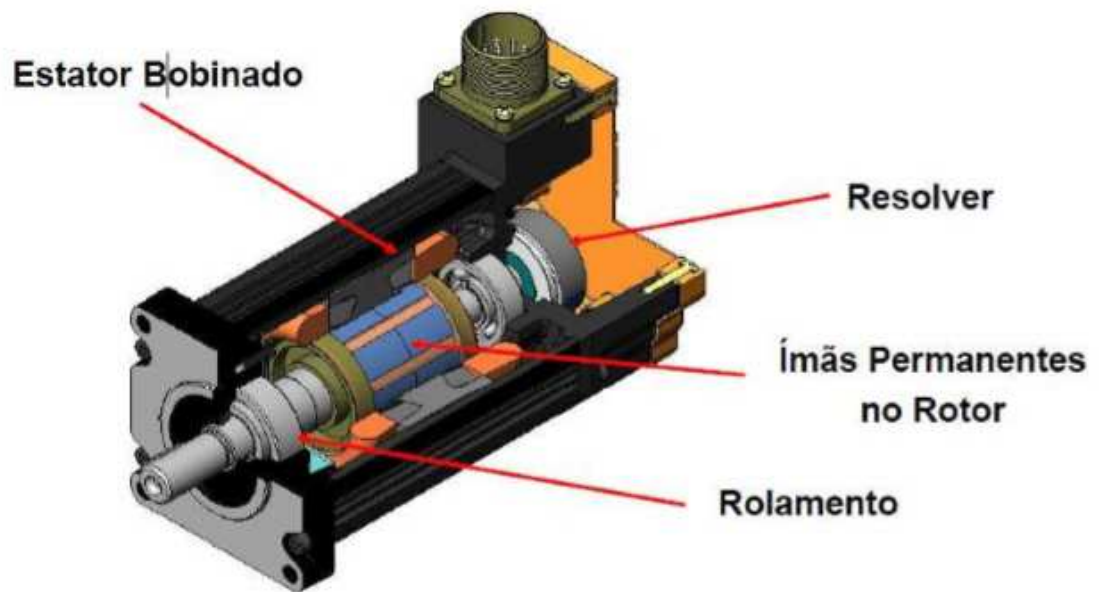


Figura 2 - Composição básica de um servo motor CA síncrono

Fonte: MENDES, 2004

Assíncronos, são robustos iguais aos motores trifásicos "gaiola de esquilo" e a controlabilidade do servo motor síncrono, mas com a necessidade de um sinal de realimentação. Diferenciados apenas por uma ponta adicional no eixo do rotor, utilizada para acoplar um sistema de controle de posição e velocidade, podendo esse ser o transdutor de posição angular, encoder.



Figura 3 - Servo motor AC Assíncrono

Fonte: ERIC, LUAN, RAFAEL, 2012

2.1.1 Servo-motor 1FK7100-5AF71-1KA0

O servo motor 1FK7100-5AF71-1KA0, possui motor 1FK7 síncrono CC permanente excitado, são extremamente compactos, de elevada dinâmica de resposta graças ao baixo momento de inércia do rotor.

Tabela 1 - Dados técnicos do Motor 1FK7

Motor type	Permanently excited synchronous motor
Magnet material	Rare-earth magnet material
Stator winding insulation according to EN 60034-1 (IEC 60034-1)	Temperature class F for a winding temperature rise of $\Delta T = 100$ K at an ambient temperature of +40 °C
Type of construction acc. to EN 60034-7 (IEC 60034-7)	IM B5 (IM V1, IM V3)
Degree of protection to EN 60034-5 (IEC 60034-5)	IP64
Cooling	Natural cooling
Temperature monitoring	KTY 84 temperature sensor in stator winding
Paint finish	Without paint finish
2nd rating plate	Attached in the NDE cover
3rd rating plate	Supplied separately packed
Drive shaft end in accordance with DIN 748-3 (IEC 60072-1)	Plain shaft
Radial eccentricity, concentricity, and axial eccentricity in accordance with DIN 42955 (IEC 60072-1)	Tolerance N (normal)
Vibration severity acc. to EN 60034-14 (IEC 60034-14)	Grade N (normal)
Sound pressure level, max. acc. to DIN EN ISO 1680	1FK702: 55 dB (A) 1FK703: 55 dB (A) 1FK704: 55 dB (A) 1FK706: 65 dB (A) 1FK708: 70 dB (A) 1FK710: 70 dB (A)
Built-in encoder systems	<ul style="list-style-type: none"> • Incremental encoder sin/cos 1 V_{pp} 2048 pulses/revolution • Absolute encoder, multiturn, 2048 pulses/revolution with 1FK704 to 1FK710. 512 pulses/revolution with 1FK702 and 1FK703 and traversing range 4096 pulses/rev. with EnDat interface • Simple absolute encoder, multiturn, 32 pulses/rev. and traversing range 4096 pulses/rev. with EnDat interface • Resolver multi-pole ¹⁾ (number of poles corresponds to number of pole pairs of the motor) • Resolver 2-pole
Wiring	Connectors for signals and power can be rotated (270°)
Options	<ul style="list-style-type: none"> • Drive shaft end with key and keyway (half-key balancing) • Integrated holding brake • Degree of protection IP65, additional IP67 drive end flange • Planetary gearboxes/helical/angular gearboxes • Paint finish, anthracite
Installation altitude	Up to 1.000 m without de-rating
Ambient temperature in operation	-15 °C to +40 °C
During storage	-20 °C to +60 °C

Fonte - SIEMENS, 2005

Possui um resfriamento natural, com gama de temperatura entre -15°C a $+40^{\circ}\text{C}$, sendo que sua perda de energia é dissipada por radiação e convecção natural. A fim de evitar danos mecânicos o servo possui uma armação de frenagem em curto-circuito, sendo que, para transistor conversores PWM, quando os valores de tensão CC são excedidos ou se o sistema eletrônico falhar, então a frenagem elétrica não é mais possível, assim, a unidade que está costeando para baixo, pode representar um perigo potencial, então o motor pode ser travado por um curto-circuito de armação. A armação de curto-circuito de frenagem deve ser iniciada o mais tardar até o fim de curso na área de deslocamento do eixo de alimentação. O atrito do sistema mecânico e os tempos de comutação dos contadores devem ser tomados em conta na determinação da distância a que o eixo de alimentação necessário para chegar a uma parada completa.

Tabela 2 - Resistência de frenagem

Motor type	External braking resistor R_{opt} [Ω]	Average braking torque $M_{br\ rms}$ [Nm]		Max. braking torque $M_{br\ max}$ [Nm]	RMS braking current $I_{br\ rms}$ [A]	
		without external braking resistor	with external braking resistor		without external braking resistor	with external braking resistor
1FK7100-5AF71	4.1	4.2	13.4	16.6	19.9	17.8

Fonte - SIEMENS, 2005

A comunicação é feita através de dois conectores, diferenciados pelas cores verdes (dados) e laranja (potência e controle de temperatura do motor). Ambos são ligados em uma unidade SIMOTION, um sistema de controle de movimento que engloba um sistema integrado atribuindo programação e parâmetros para testes e comissionamento de diagnósticos. Também é responsável pela alimentação e sincronismo de servos motores. Ligados em uma mesma rede *Profibus*. A rede *Profibus* é um sistema aberto e padronizado, definido pelas normas IEC 61158 e IEC 61784, que abrange desde o meio físico utilizado até perfis de dados para determinados conjuntos de equipamentos. Este sistema tem como objetivo permitir uma comunicação rápida, cíclica e determinística entre mestres e escravos. Composta pelo protocolo DP, meio de transmissão RS485, que define uma série de taxas de comunicação que podem ser utilizadas, desde 9.6 Kbit/s até 12 Mbit/s.

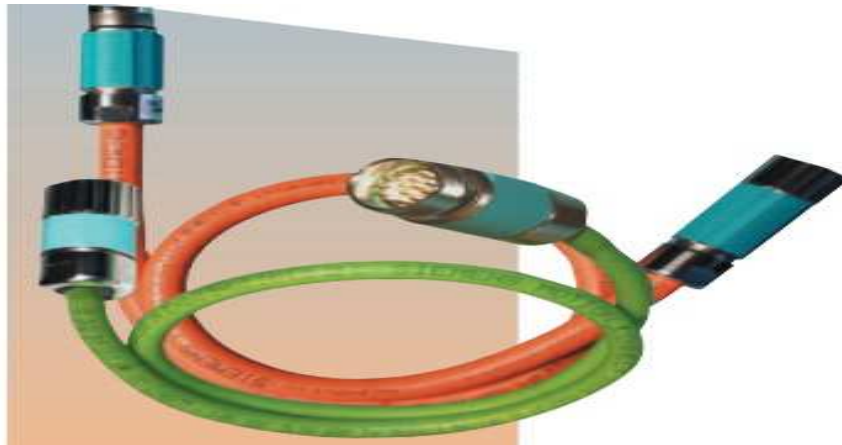


Figura 4 - Cabos de comunicação e Potência.

Fonte: SIEMENS, 2005

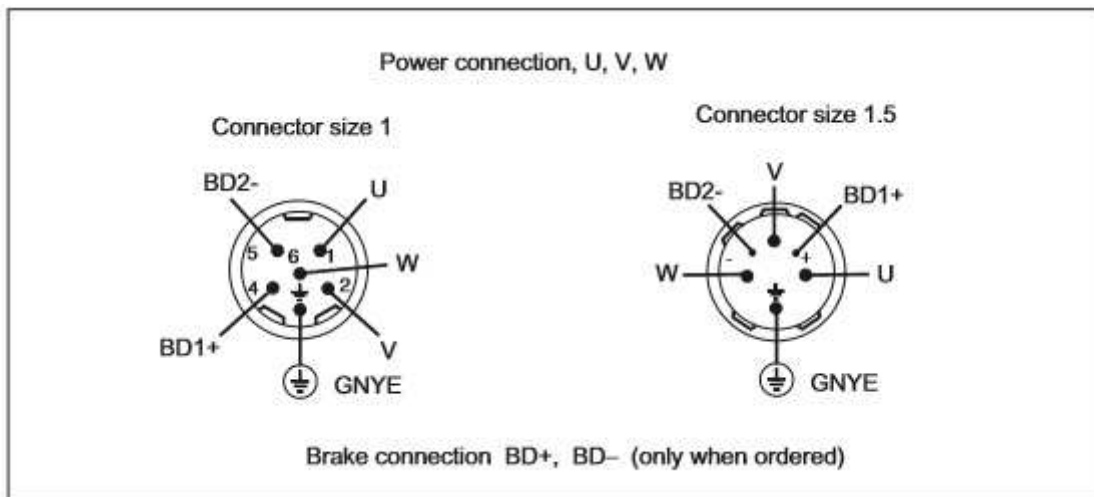


Figura 5 - Atribuição do conector, conectores e sensores de temperatura do motor

Fonte: SIEMENS, 2005

O servo motor possui dois tipos de freio, o magnético-permanente (*Permanent-operate*) e o freio com mola (*Spring-operate*).

No modo de operação de freio magnético de ímãs permanentes, resulta em uma força de tração sobre o disco do induzido do freio. Isto significa que, na condição de ausência de corrente, o freio é fechado e o eixo do motor é mantido. Quando 24 V DC tensão nominal é ligado ao freio, o solenóide, através do qual a corrente flui, estabelece um campo oposto. Isso neutraliza a força dos ímãs permanentes. Freios de ímãs permanentes têm uma ligação rígida proporcionalmente ao rotor do motor. Esta é a razão pela qual este freio é quase sem qualquer folga.

No modo de operação do freio por mola, a fim de que o freio de mola opere, o disco do induzido do freio tem de ser capaz de se mover axialmente. Portanto, a folga de torção não pode ser evitada. Quando o freio está fechado, o eixo do motor pode mover-se um grau acima.

O controle de velocidade utilizando o servo motor 1FK7100-5AF71-1KA0, está diretamente relacionado com seu torque, sendo que aplicado nos manipuladores cartesianos torques acima dos especificados pelo fabricante, irá ocorrer fadiga nos componentes mecânicos do mesmo. O diagrama abaixo mostra a relação da velocidade X torque.

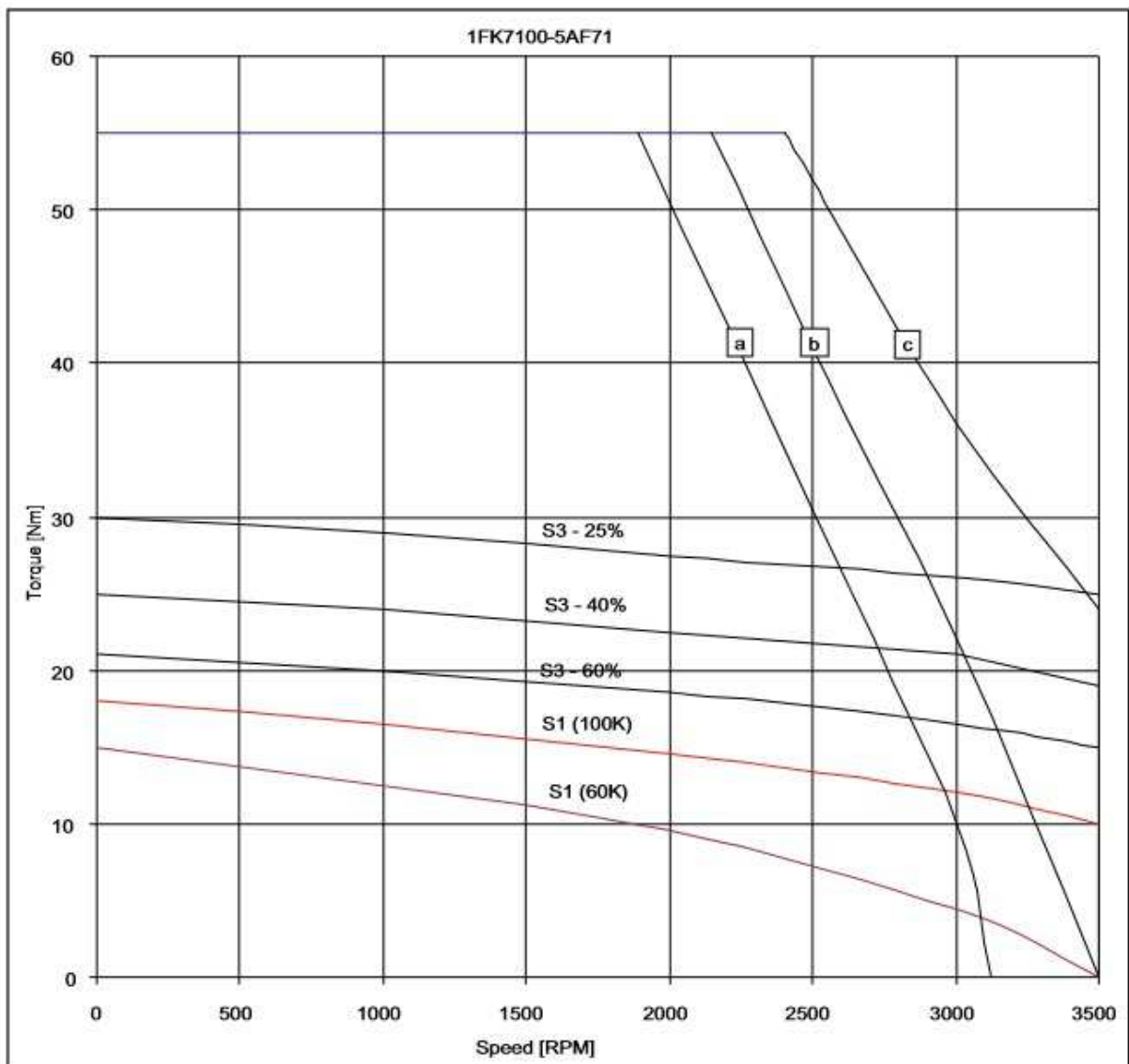


Figura 6 - Diagrama Velocidade X Torque

Fonte - SIEMENS, 2005

No diagrama o S3 representa as específicas temperaturas limitantes referentes à $\Delta T = 100$ K para 1 minuto de duração do ciclo. O S1 representa o *stall* torque, ou seja, um binário de bloqueio já que seu torque ultrapassa o valor nominal permitido. As curvas "a", "b" e "c" são torques comparativos utilizando algumas unidades de controle, [a] MASTERDRIVES MC, VDC link=540V (DC), $V_{mot}=340V_{rms}$, [b] SIMODRIVE 611 (UE), VDC link=540V (DC) e MASTERDRIVES MC (AFE), VDC link=600V (DC), $V_{mot}=380V_{rms}$ e [c] SIMODRIVE 611 (ER), VDC link=600V (DC), $V_{mot}=425V_{rms}$ (Manual de configuração PFK7, 2005).

Tabela 3 - Dados técnicos 1FK7100 CT.

Technical data	Code	Units	-5AF71	
Engineering data				
Rated speed	n_N	RPM	3000	
Number of poles	2p		8	
Rated torque (100K)	$M_{N(100K)}$	Nm	12	
Rated current	I_N	A	8	
Stall torque (60K)	$M_{0(60K)}$	Nm	15	
Stall torque (100K)	$M_{0(100K)}$	Nm	18	
Stall current (60K)	$I_0(60K)$	A	9.2	
Stall current (100K)	$I_0(100K)$	A	11.2	
Moment of inertia (with brake)	J_{mot}	10^{-4} kgm ²	63.9	
Moment of inertia (without brake)	J_{mot}	10^{-4} kgm ²	55.3	
Optimum operating point				
Optimum speed	n_{opt}	RPM	3000	
Optimum power	P_{opt}	kW	3.77	
Limiting data				
Max. permissible speed (mech.)	n_{max}	RPM	5000	
Max. torque	M_{max}	Nm	55	
Peak current	I_{max}	A	37	
Physical constants				
Torque constant	k_T	Nm/A	1.59	
Voltage constant	k_E	V/1000 RPM	101	
Winding resistance at 20 °C	R_{ph}	Ohm	0.34	
Rotating field inductance	L_D	mH	7.0	
Electrical time constant	T_{el}	ms	20.5	
Shaft torsional stiffness	c_t	Nm/rad	184000	
Mechanical time constant	T_{mech}	ms	2.23	
Thermal time constant	T_{th}	min	55	
Weight with brake	m	kg	21.5	
Weight without brake	m	kg	19	

Fonte - SIEMENS, 2005

2.1.2 Encoder

Encoders são transdutores que convertem movimento angular ou linear em uma série de pulsos digitais. Os pulsos servem para determinar a velocidade, aceleração, distância, rotação e posição. São classificados em dois tipos, encoder incremental e encoder absoluto.

O encoder incremental possui uma construção mais simples. Um feixe de luz, talvez a partir de um LED, passa através de ranhuras em um disco e é detectado por um sensor de luz, tal como um fotodiodo ou foto transistor. Quando o disco gira, o feixe de luz é transmitido alternadamente e são interrompidos, e assim um pulso na saída produzido a partir do sensor de luz. O principal ponto negativo na utilização no uso do mesmo, é que caso ele deixe de ser energizado no meio de uma volta, não saberá a posição na qual ele se encontra quando voltar a ser energizado, até o momento que passar pela marcação de início de volta.

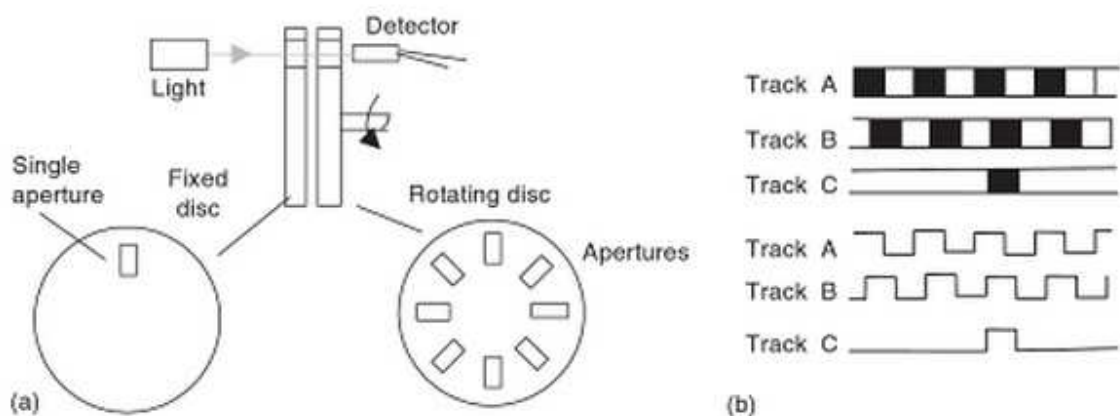


Figura 7 - (a) Forma básica do encoder Incremental e (b) Três faixas de arranjo.

Fonte: BOLTON, 2009

O encoder absoluto difere do incremental por ter um padrão de *slots* que definem de forma exclusiva cada posição angular. O disco rotativo tem quatro círculos concêntricos de *slots* e quatro sensores para detectar os pulsos de luzes. As ranhuras estão dispostas de tal maneira que a saída seqüencial dos sensores é um número em código binário, cada número de posição que pode ser detectado é $2^4=16$, ou seja, a resolução de $360/16 = 22,5^\circ$.

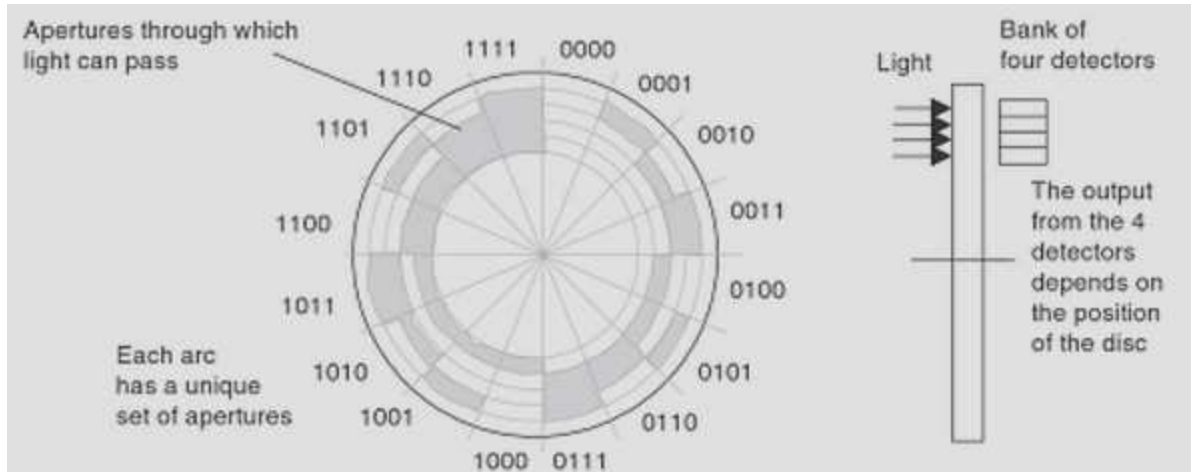


Figura 8 - (a) Forma básica do encoder Absoluto.

Fonte: BOLTON, 2009.

2.1.3 Encoder AM16DQ K20

O servo motor 1FK7100-5AF71-1KA0, possui seu sistema de controle de posição angular por um encoder absoluto Am16D1 K20, ou seja, seu controle é feito de acordo com a emissão de feixes de luzes em suas ranhuras do disco que gera a cada posição códigos binários únicos, assim, garantindo uma alta precisão de posição do manipulador cartesiano. Encoder absoluto de 16 bits (resolução 65.536, interna de 32 S / R) + 12 bit *multi-turn* (atravessando faixa de 4.096 rotações).

2.2 CARACTERÍSTICAS DE MANIPULADORES CARTESIANOS

Na busca de um aumento de produtividade, melhoria e a consciência na qualidade final do produto e a padronização e precisão no processo, surgiram os manipuladores cartesianos. Utilizados em muitos casos em operações críticas, de manipulação de produtos químicos e que causem a fadiga do homem por repetidos movimentos do processo.

Os manipuladores são classificados de acordo com o número de eixos, tipo de controle, tipo de acionamento e geometria. Os eixos do corpo de um robô podem ser encontrados em várias combinações de configurações rotacionais e lineares, dependendo da aplicação. Estas combinações são denominadas geometria do robô.

Existem cinco classes principais de robôs manipuladores, segundo o tipo de juntas (de rotação ou de revolução, ou de translação ou prismáticas), o que permite diferentes possibilidades de posicionamento no volume de trabalho. As cinco classes ou geometrias principais de um robô são: cartesiana, cilíndrica, polar (ou esférica), de revolução (ou articulada) e SCARA (*Selective Compliant Articulated Robot for Assembly*).

2.2.1 Robô de coordenadas cartesianas.

No robô cartesiano as coordenadas especificam um ponto do espaço em função de suas coordenadas X, Y e Z, podendo se movimentar em linhas retas, em deslocamentos verticais e horizontais.

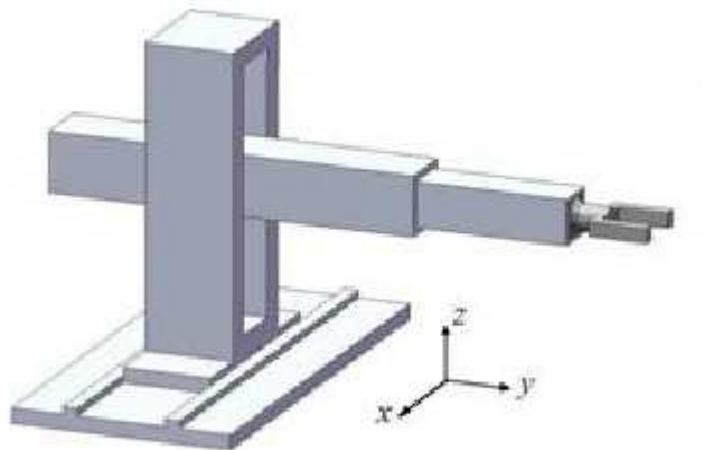


Figura 9 - Estrutura de um robô cartesiano

Fonte: RIASCOS, 2010.

2.2.2 Robô de coordenadas cilíndricas.

Possui normalmente um movimento rotacional na cintura (*waist*) e no resto da estrutura movimentos linear, junto estes eixos descrevem um cilindro.

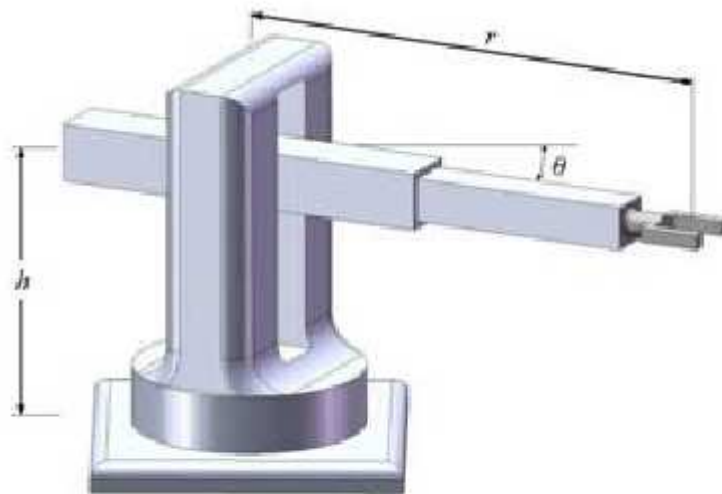


Figura 10- Estrutura de um robô cilíndrico
 Fonte: RIASCOS, 2010.

2.2.3 Robô de coordenadas polares (esféricas).

Seus três eixos ao combinar os movimentos representam uma esfera. Possui dois movimentos que são rotacionais na cintura e ombro e um terceiro movimento linear.

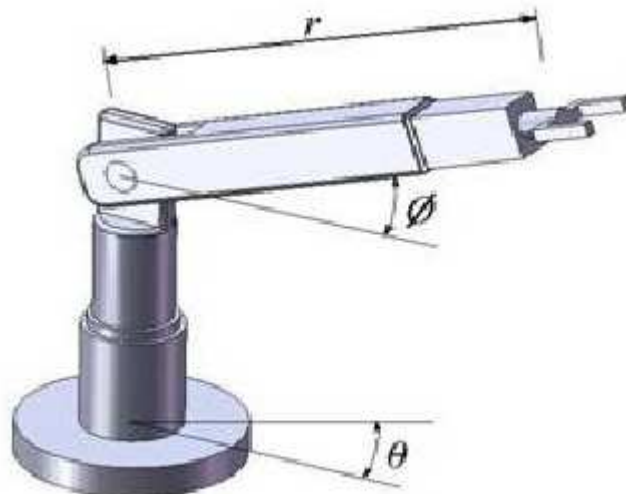


Figura 11- Estrutura de um robô esférico
 Fonte: RIASCOS, 2010.

2.2.4 Robô de coordenadas de revolução (articulado).

O robô de coordenadas articuladas possui junto e movimentos que se assemelham aos de um braço humano. Um exemplo seria o robô PUMA (*Programmable Universal Machine for Assembly*), projetado inicialmente para cumprir com os requerimentos da indústria automobilística.

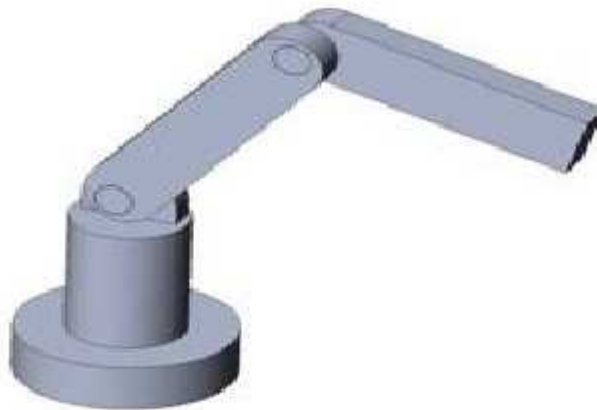


Figura 12- Estrutura de um robô articulado

Fonte: RIASCOS, 2010.

2.2.5 Robô do tipo SCARA

Este modelo de robô SCARA (*Selective compliance assembly robot arm*) utilizado em tarefas de montagem possui os mesmos tipos de juntas que uma configuração esférica, Rotacional-Rotacional-Prismática RRP, se diferenciando apenas pela sua aparência e pela sua faixa de aplicação.

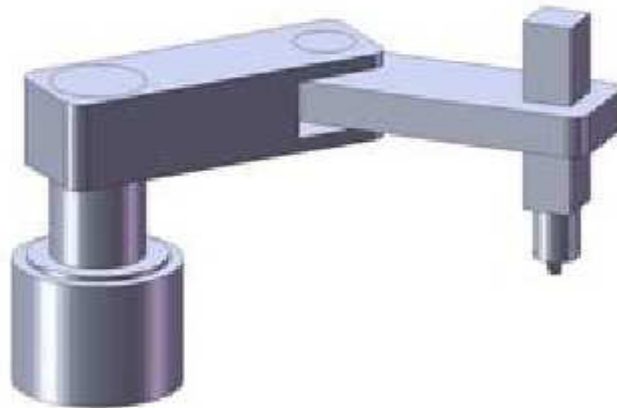


Figura 13 - Estrutura de um robô SCARA

Fonte: RIASCOS , 2010.

2.3 MANIPULADORES CARTESIANO *TWIST*

O manipulador cartesiano do tipo *twist* está classificado nos modelos dos robôs de coordenadas cartesianas, é um robô de grau de liberdade três, ou seja, possui 3 eixos que se movimentam linearmente em X, Y e Z.



Figura 14 - Manipulador cartesiano *TWIST*.

Fonte:< [HTTP://WWW.BR.NORDASPA.COM/MANIPOLATORI-TWIST](http://www.br.nordaspa.com/manipolatori-twist)>.

Sua utilização tem grande vantagem em linhas de estamperia em indústrias automobilísticas por causa da contínua repetição de movimentos, velocidade e precisão. Visto que em processos deste tipo a quantidade produção em relação ao tempo é crucial para o lucro, desenvolvimento e competitividade no mercado de trabalho. Sua estrutura é dividida em mecânica e elétrica, como:

1. Parte mecânica.

- **Trave** - É uma trave fixada nas duas colunas da prensa, que serve de suporte para o Robô
- **Dispositivo de desengate** - É formado por um eixo com guia portante, fixado na trave, que serve de suporte para o carro transversal no qual está fixado o Robô.
- **Eixos X, Y e Z** - É formado por 1 servo motor brushless, dotado de freio de estacionamento que aciona um carro vertical através de uma corrente cinemática formada por: redutor, pinhão, cremalheira.
- **Dispositivos de prensão** - No carro horizontal do eixo X está fixado o suporte dos dispositivos de prensão dotado de pinos de centragem, de alça de bloqueio rápido do dispositivo de prensão, de ventosas de ligação ao circuito de vácuo.
- **Esquema pneumático** - É formado por um grupo de tratamento do ar que possui uma válvula com cadeado, um filtro, um redutor de pressão com manômetro, os componentes do circuito do cilindro equilibrador do eixo Z.

2. Parte elétrica.

- **Painel elétrico** - É constituído por um armário metálico. No armário está instalado um interruptor geral, uma série de tarjetas de segurança.

- **Circuito de potência** - É a parte do circuito sob tensão. Todos os serviços alimentados pela tensão da rede são dotados de dispositivo de proteção contra as correntes em excesso (interruptor automático ou fusível).
- **Circuito auxiliar** - É a parte do circuito alimentada por tensão reduzida mediante transformadores e/ou conversores estáticos.
- **Circuito de emergência**- É um circuito que alimenta um relé de segurança alimentado por uma tensão de 24 VDC. Durante o funcionamento normal este relé deverá permanecer excitado
- **Circuito de proteção equipotencial** - Este circuito serve para assegurar a proteção das pessoas contra choques elétricos em caso de avaria do isolamento entre as várias partes ativas (isto é em tensão) do circuito elétrico da máquina e dos eixos.



Figuras 15- Componentes do manipulador (cremalheira, engrenagem, ventosa e servo motor).

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

O comando e parametrização dos dados no processo são realizados utilizando uma interface homem-máquina (IHM), na qual, os dados registrados são

recebidos pelo controlador lógico programado (CLP) por uso de comunicação de rede *Profibus*. Seu sistema operacional é centrado em um *Simodrive* ou *Simotion*, que fazem o sincronismo das informações dos *drivers* e potência dos servos motores em uma linha onde há vários manipuladores operando ao mesmo tempo.



Figura 16- Cabo de rede *Profibus* com CLP e Painel View (IHM).
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Utilizando o painel *view*, é possível realizar as parametrizações do manipulador como, configurações de quotas de movimentos, configuração dos comandos de bloco, perfil de *comes* e controle de velocidade e aceleração. O sistema de controle da velocidade e aceleração do manipulador configurado ponto a ponto do processo está diretamente relacionado com o esforço excessivo ou fadiga dos componentes mecânicos, assim, reduzindo a vida útil dos materiais e causando problemas de paradas no processo para substituição dos mesmos.

2.3.1 - Fadiga nos componentes mecânicos do manipulador cartesiano.

Com freqüência se descobre que membros de máquina falharam sob a ação de tensões repetidas ou flutuantes, todavia, uma análise mais cuidadosa revela que as tensões reais máximas estavam bem abaixo da resistência última do material e, muito seguidamente, abaixo mesmo da resistência ao escoamento. A característica mais distinguível dessas falhas é que as tensões foram repetidas muitas e muitas vezes, assim a falha ser denominada falha por fadiga. Quando peças de máquina falham estaticamente, em geral desenvolvem uma deflexão muito grande, visto que a tensão excedeu à resistência ao escoamento, e a peça é trocada antes que a fratura realmente ocorra, então, muitas falhas estáticas dão um aviso visível antecipadamente. No entanto, o mesmo não ocorre com a falha por fadiga, ela é súbita e total, portanto, perigosa. As falhas por fadiga têm aparência similar à de uma fratura frágil, uma vez que as superfícies de fratura são planas e perpendiculares ao eixo de tensão, com a ausência de estricção. As características de fratura de uma falha por fadiga, contudo, são bem diferentes daquelas de uma fratura frágil estática, surgindo de três estágios de desenvolvimento. O primeiro estágio corresponde ao início de uma ou mais micro trincas, causadas por deformação plástica cíclica seguida de propagação cristalográfica estendendo-se por dois a cinco grãos relativamente à origem. As trincas do primeiro estágio não são normalmente discerníveis a olho nu. O segundo estágio compreende a progressão de micro a macro trincas, formando superfícies de fratura com platôs paralelos, separados por sulcos também paralelos. Tais platôs são normalmente lisos e normais na direção da máxima tensão de tração. Essas superfícies podem ser onduladas e escuras e ter bandas leves conhecidas como marcas de praia ou marcas de concha de ostra. Durante o carregamento cíclico, tais superfícies fissuradas abrem e fecham, roçando-se umas nas outras, e a aparência das marcas de praia depende das mudanças no nível e na freqüência do carregamento, bem como da natureza corrosiva do meio. O terceiro estágio ocorre no ciclo de carga final, quando o material remanescente não pode suportar as cargas, resultando em fratura rápida e repentina. Uma falha de terceiro estágio pode ser frágil, dúctil ou uma combinação de ambas. Com bastante freqüência, as marcas de praia, caso existentes, e os padrões possíveis na fratura de terceiro estágio, denominados linhas de divisa, apontam para a origem das trincas iniciais (Joseph, Charles e Richard, 2008)

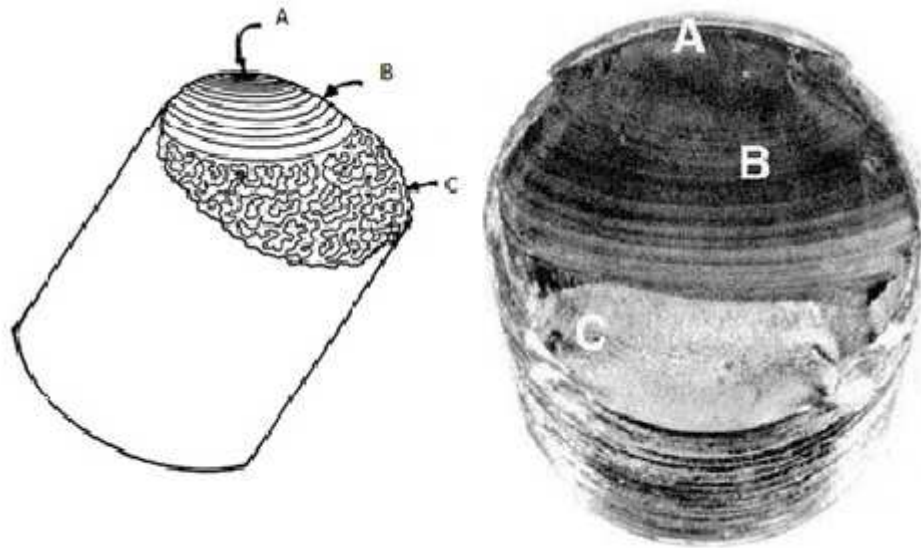


Figura 17- Falha fadiga em um eixo. Zona A - começo da falha; Zona B - Propagação da falha na maior parte da secção transversal (marcas de praia); Zona C - Falha final por fratura.

Fonte: SHIGLEY,MISCHKE,BUDYNAS,2008

A fadiga nos componentes do manipulador é ocasionada pelo esforço excessivo devido à aceleração do eixo na partida para a movimentação linear do robô. O eixo do servo motor está acoplado na engrenagem e a mesma está em conjunto com a cremalheira, quando a velocidade e a aceleração, para a movimentação, é acima do permitido nominal suportado pelo motor, é ocasionado um esforço entre a engrenagem e a cremalheira, assim, causando tensões repetidas ou flutuantes e essas tensões vão originando trincas nos componentes, na qual, ao longo do processo estão sujeitas a quebras gerando paradas do processo.



Figura 18 -. Estrutura do encaixe da engrenagem e a cremalheira.

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

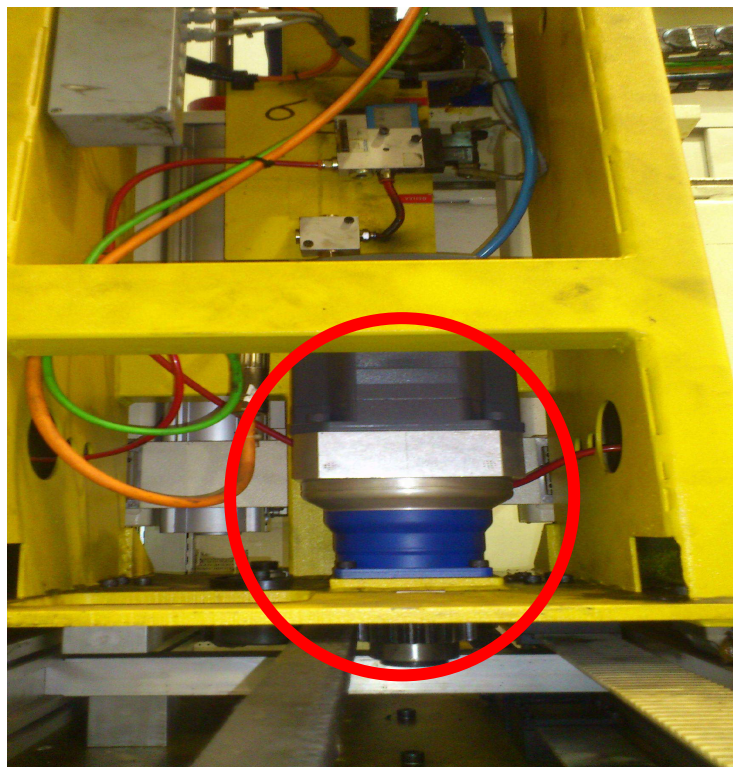


Figura 19 - Acoplamento do servo motor com a engrenagem.

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

3 CONTROLE E SINTONIA

3.1 A IDÉIA DO SISTEMA DE CONTROLE.

Engenharia de controle está preocupada com o controle de um sistema dinâmico, ou planta. Um sistema dinâmico pode ser um sistema mecânico, um sistema elétrico, um sistema de fluidos, um sistema térmico ou uma combinação de dois ou mais tipos de sistema. O comportamento de um sistema dinâmico é descrito pelas equações diferenciais. Dado o modelo (equação diferencial), as entradas e as condições iniciais, podemos facilmente calcular a saída do sistema (Dogan Ibrahim,2006).

3.1.2 Sistema de controle em malha aberta.

Em um sistema de controle em malha aberta, a saída nem é medida, nem é realimentada para comparação com a entrada (OGATA,2003). Um exemplo seria um forno microondas, na qual, não há um sinal de retorno avisando se o alimento está aquecido ou não. O controle é feito por base de tempo, sendo que o sistema não tem o controle sobre a temperatura do alimento para saber se já está na temperatura ideal para o preparo.

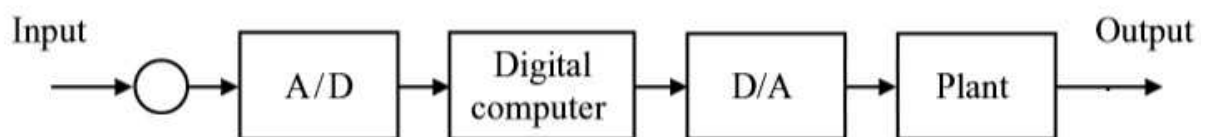


Figura 20 - Exemplo de Malha aberta.

Fonte: IBRAHIM, 2006

3.1.3 Sistema de controle em malha fechada.

São sistemas de controle realimentados. O sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal realimentado, é aplicado ao controlador de modo a reduzir o erro e manter a saída do sistema em um valor desejado (OGATA, 2003). Um exemplo é a geladeira, onde a temperatura interna é medida e

comparada com um valor de referência pré-estabelecido pelo usuário. Caso a temperatura interna fique acima da desejada (devido à temperatura externa ou algum alimento colocado na geladeira esteja acima da temperatura interna), a geladeira é acionada e começa a baixar a temperatura. Quando atinge o valor de referência, o motor é desligado, tendendo a ficar em torno do valor estabelecido.

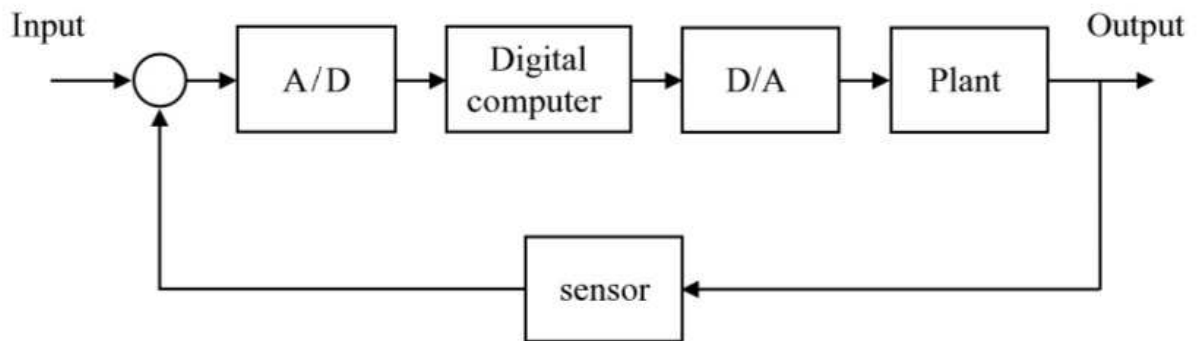


Figura 21 - Exemplo de Malha aberta.

Fonte: IBRAHIM, 2006

3.2 CONTROLADOR PID.

Os controladores têm como função manter o sistema operando dentro de limites pré-definidos, a fim de, conseguir atender as exigências do processo em que são aplicados. Seu controle pode ser realizado em várias formas, o controle proporcional (P), proporcional e integral (PI), proporcional e derivativo (PD), proporcional, integral e derivativo (PID). O objetivo do controlador PID é aproveitar as características particulares de cada uma destas ações a fim de se obter uma melhora significativa do comportamento transitório e em regime permanente do sistema controlado. O sinal de controle gerado pelo controle proporcional integral derivativo é dado como:

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt})$$

Figura 22 - Fórmula do sinal do PID.

Fonte: BAZANELLA, 2011

Assim, têm-se os três parâmetros de sintonia no controlador formando o ganho proporcional K (ação proporcional), o tempo integral T_i (ação integral) e o tempo derivativo T_d (ação derivativa). O uso das três ações não será necessária em todas as aplicações, dependerá do tipo de controle de processo que será realizado.

3.2.1 Controlador proporcional (P).

Utilizados em processos simples, não tendo a necessidade das ações integrais e derivativas, podem ser representados por:

$$u(t) = K(e(t))$$

Figura 23 - Fórmula Controlador Proporcional

Fonte: BAZANELLA,2011

Sendo $u(t)$ a banda proporcional, região de comportamento linear, e K o ganho proporcional, quanto maior o valor de K menor é banda proporcional, ou seja, em um sistema do tipo 0 (que não possui pólos na origem), quanto maior o ganho menor será o valor do erro em regime permanente, mas o erro nunca será anulado completamente.

3.2.2. Controlador proporcional integral (PI)

O controlador tem como função contrabalancear o processo utilizando a ação integral para conseguir um erro nulo, dando um sinal de referência do tipo salto, com a ação proporcional.

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau))$$

Figura 24 - Fórmula Controlador Proporcional Integral.

Fonte: BAZANELLA,2011

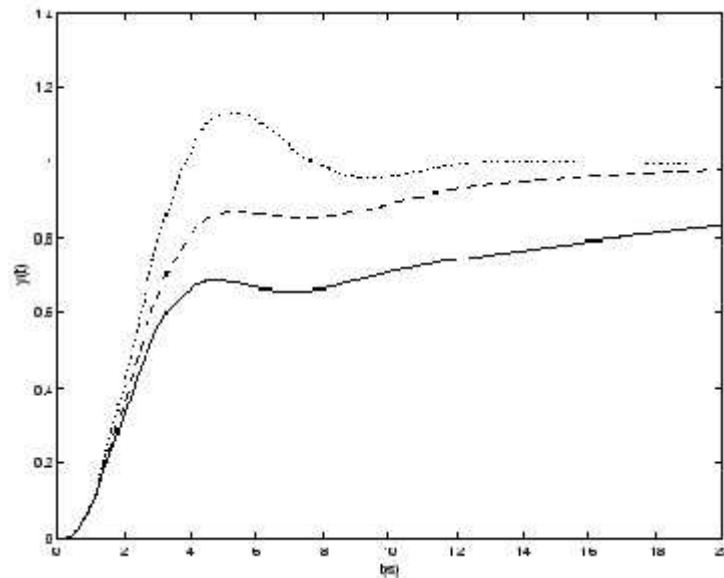


Figura 25 - Exemplo das formas de onda do Controlador Proporcional Integral.

Fonte: BAZANELLA,2011

Assim, tem-se um equilíbrio entre o ganho proporcional e a ação integral buscando a estabilidade do sistema buscando um erro nulo.

3.2.3 Controle proporcional derivativo (PD)

A ação derivativa, combinada com a ação proporcional tem como objetivo de "antecipar" a ação de controle buscando uma resposta mais rápida do sistema.

$$u(t) = K(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt})$$

Figura 26- Fórmula Controlador Proporcional Derivativo.

Fonte: BAZANELLA,2011

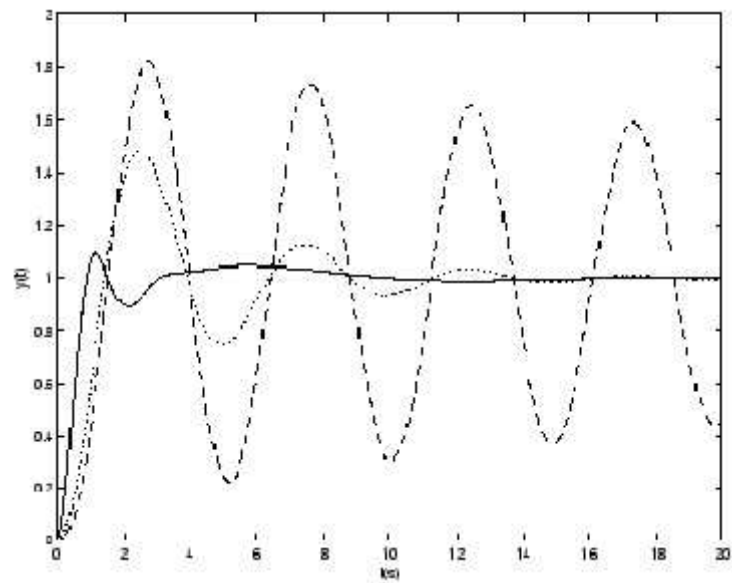


Figura 27- Exemplo das formas de onda do Controlador Proporcional Derivativo.

Fonte: BAZANELLA,2011

Dependendo da dinâmica do processo, o sinal de controle estará em atraso, sendo responsável por uma grande amplitude e período de oscilação, podendo gerar respostas instáveis, assim, é necessário um controle PD.

4 SIMULAÇÃO E ANÁLISE.

4.1 PARAMETRIZAÇÕES DA VELOCIDADE X FADIGA.

O manipulador cartesiano é utilizado em uma linha de estamparia automatizada para tornar o processo mais estável e repetitivo, assim, evitando perdas de tempo de produção, garantindo maior número de peças em menos tempo, buscando um resultado melhor e lucro maior para a empresa.

Para conseguir este resultado envolvendo lucro e tempo de peças por hora favoráveis sem oscilações no processo, é necessário realizar a correta parametrização de dados, levando em conta a velocidade do servo motor e a vida útil dos componentes mecânicos que compõe o manipulador cartesiano. A alimentação errada ou acima do permitido dos dados no sistema operacional, envolvendo o controle da velocidade e aceleração do servo motor, ocasiona uma redução na vida útil de engrenagens e cremalheiras, como também, folgas por esforço excessivo entre as interligações dos componentes que movimentam o manipulador cartesiano. Portanto, para se ter um processo com o mínimo de perdas esperado, deve-se ter um sistema de controle preciso, respeitando as configurações estipuladas pelos fabricantes, assim conseguindo ter o melhor custo benefício em relação à produção de peças por hora.

Para controlar o sistema existem *softwares* capazes de dimensionar o melhor resultado para que não haja perdas no processo, o que será usado neste trabalho será o Matlab/Simulink.

4.2 MATLAB/SIMULINK.

O MATLAB (*Matrix Laboratory* – laboratório de matrizes) da Mathworks é uma poderosa ferramenta matemática cujo uso difundiu-se da área acadêmica para a industrial, passível de ser empregado em todas as etapas de um processo como projeto, operação e otimização, possibilitando seu uso on-line e off-line. Já o Simulink é uma biblioteca de simulação pertencente ao ambiente MATLAB, de grande utilidade no controle de processos químicos por possuir módulos específicos. O software implementa uma linguagem de programação: MATLAB, com funções predefinidas e que admite ferramentas adicionais com as mais diversas finalidades.

A unidade fundamental de dados neste programa é a matriz: uma coleção de dados organizados em linhas e colunas e que podem ser utilizados mediante a utilização de um nome específico. Uma variável em MATLAB é uma região utilizada pela memória para o conteúdo de uma matriz específica (CHAPMAN, 2003).

Para se ter o controle no processo utilizando o manipulador cartesiano na linha de estamparia, é necessário saber quais os corretos parâmetros a serem colocados no sistema. O Matlab será usado para se obter a curva ótima do sistema e assim encontrando qual os valores de K_p , k_d e k_i e dimensionando a correta velocidade do servo motor, a fim de garantir a melhor produção sem a fadiga excessiva das peças mecânicas.

4.2.1 Função de transferência do motor CC no servo motor 1FK7100-5AF71-1KA0

O controle do servo-motor CC será realizado através da corrente da armadura, (i_a), tendo o objetivo da conversão de energia eletromagnética em energia mecânica. Considerando os esquemas abaixo, será encontrada a função de transferência do motor CC, levando em conta as características conforme figura 9.

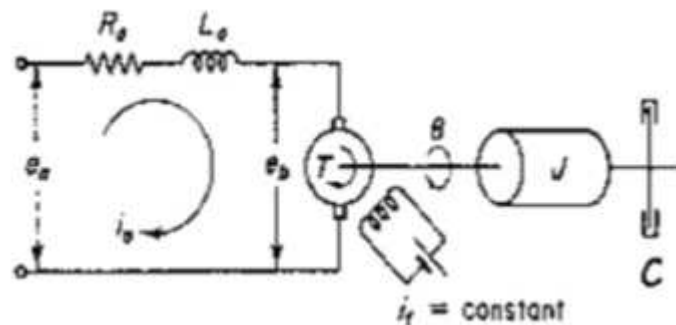


Figura 28- Esquema de um motor CC.

Fonte: RENAN,IVANES,VICTOR E ORLANDO, 2011

Assim, identifica-se:

R_a = resistência da armadura [Ω]

L_a = indutância da armadura [H]

i_a = corrente na armadura [A]

i_f = corrente de campo [A]

e_a = voltagem na armadura [V]

e_b = força contra-eletromotriz [V]

θ = deslocamento angular do eixo do motor [rad]

T = torque desenvolvido pelo motor [Nm]

J = momento de inércia do motor e da carga, referidos ao eixo do motor [kg m²]

C = coeficiente de amortecimento viscoso do motor e carga, referidos ao eixo do motor [Nms/rad]

Para a modelagem matemática, é necessário aplicar as leis físicas dos vários componentes.

Parte elétrica:

Fluxo magnético, ψ : é proporcional à corrente de campo, sendo k_f é uma constante de proporcionalidade.

$$(1) \psi = k_f i_f;$$

.

Torque desenvolvido pelo motor, T : é proporcional ao produto da corrente da armadura pelo fluxo magnético.

$$(2) T = k_1 i_a \psi \text{ ou } T = k_1 i_a k_f i_f;$$

Como k_1 , k_f e i_f são constantes: $k_1 k_f i_f = k$ (constante do motor, fornecida pelo fabricante). Logo:

$$(3) T = k i_a;$$

Força contra-eletromotriz e_b : quando a armadura está girando, está presente também a lei do gerador, fazendo com que surja uma voltagem proporcional à velocidade angular.

$$(4) e_b = K_b d\theta/dt ;$$

Sendo k_b é a constante do gerador.

Lei de Kirchhoff das malhas para o circuito elétrico da armadura:

$$(5) e_a = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b$$

Parte mecânica:

2a Lei de Newton:

$$\Sigma T_{\text{ext}} = J \frac{d^2\Theta}{dt^2} \rightarrow T - C \frac{d\Theta}{dt} = J \frac{d^2\Theta}{dt^2};$$

Isolando T;

$$(6) T = J \frac{d^2\Theta}{dt^2} + C \frac{d\Theta}{dt};$$

Levando em conta a equação 3;

$$(7) k \cdot i_a = J \frac{d^2\Theta}{dt^2} + C \frac{d\Theta}{dt}.$$

Função de transferência do servo motor CC:

Considerando todas as condições iniciais nulas, podemos obter as transformadas de Laplace das equações (4), (5) e (7):

$$(8) E_b(s) = K_b s \Theta(s);$$

$$(9) L_a s I_a(s) + R_a I_a(s) + E_b(s) = E_a(s);$$

$$(10) J s^2 \Theta(s) + C s \Theta(s) = K I_a(s);$$

Substituindo a equação (8) na equação (9);

$$L_a s I_a(s) + R_a I_a(s) + K_b s \Theta(s) = E_a(s) \rightarrow I_a(s) = \frac{E_a(s) - K_b s \Theta(s)}{L_a s + R_a};$$

Levando $I_a(s)$ na equação (10), após modificações algébricas, tem-se;

$$(Js^2 + Cs + (Kkbs / Las + Ra) \Theta(s) = (K / Las + Ra) Ea(s);$$

Considerando $ea(t)$ como entrada e $\Theta(t)$ como saída, pode-se achar a função de transferência;

$$(11) \Theta(s) / Ea(s) = K / s [LaJs^2 + (Lab + RaJ)s + RaC + Kkb].$$

A equação (11) é um sistema de 3° ordem. Entretanto, pode-se baixar a sua ordem para um sistema de 2° ordem, devida o valor da indutância da armadura ser muito pequena na presença dos demais parâmetros. Assim, a função de transferência simplificada será:

$$(12) \Theta(s) / Ea(s) = K / s(RaJs + RaC + Kkb);$$

Dividindo tudo por RaJ , tem-se:

$$(12) \Theta(s) / Ea(s) = (K / RaJ) / s (s + RaC + Kkb / RaJ);$$

Simplificando a equação, chamando;

$$K / RaC + Kkb = Km = \text{ganho do motor};$$

$$RaJ / RaC + Kkb = Tm = \text{constante de tempo do motor};$$

Pode-se reescrever a equação final como:

$$(13) \Theta(s) / Ea(s) = Km / s (Tms + 1).$$

4.2.2 Simulação da curva de velocidade utilizando a ferramenta *Matlab/Simulink*.

Para realizar a curva ótima da velocidade do servo motor visando analisar o quanto de esforço é causado nos componentes mecânicos, primeiramente serão adicionados os dados do motor CC no *Matlab* para achar a função de transferência.

Depois de alimentado o sistema, será criado no *Simulink* o diagrama de blocos buscando os gráficos da curva da velocidade, a fim de, comparar o desgaste prematuro da mecânica do manipulador cartesiano com a condição ideal.

1. Dados do servo motor no *Matlab*.

```
Command Window
>> % Ra , resistência da armadura [Ω]
>> Ra = 0.34;
>> % La , indutância da armadura [H]
>> La = 0.007;
>> % Ia , corrente na armadura [A]
>> Ia = 8;
>> % J , momento de inércia do motor e da carga, referidos ao eixo do motor [kg m2]
>> J = 63.9*10^-4;
>> % C , coeficiente de amortecimento viscoso do motor e carga, referidos ao eixo do motor [Nms/rad]
>> C = 18400;
>> % T , torque desenvolvido pelo motor [Nm]
>> T = 1.59;
>> % kb , constante do gerador.
>> % [ V.s/rad]
>> kb = 314;
>> % K , constante do motor [ Nm/A]
>> k = 0.19785;
```

Figura 29 - Dados motor CC.

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

2. Calculo da função de transferência..

Name	Value	Min	Max
C	18400	18400	18400
G	<1x1 tf>		
Ia	8	8	8
J	0.0064	0.0064	0.0064
La	0.0070	0.0070	0.0070
Ra	0.3400	0.3400	0.3400
T	1.5900	1.5900	1.5900
Tm	3.4387e-07	3.4387...	3.4387
ans	19785	19785	19785
g	<1x1 tf>		
k	0.1979	0.1979	0.1979
kb	314	314	314

```
Command Window
>> % Valor do ganho do motor, km:
>> km = k / Ra*C + k*kb

km =

    1.0769e+004

>> % Valor da constante de tempo do motor, Tm:
>> Tm = (Ra*J / (Ra*C + k*kb))

Tm =

    3.4387e-007

>> % Função de transferência, G
>> G = km / (s*(Tm*s + 1))

Transfer function:
    1.077e004
-----
    3.439e-007 s^2 + s
```

Figura 30 - Função de transferência.

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

3. Diagrama de bloco no *Simulink*

Para comparar os comportamentos utilizando os parâmetros corretos com a situação de estresse do sistema (configurações acima das características do fabricante), serão simuladas as curvas usando o diagrama de blocos com as ações proporcionais, integrais e derivativas.

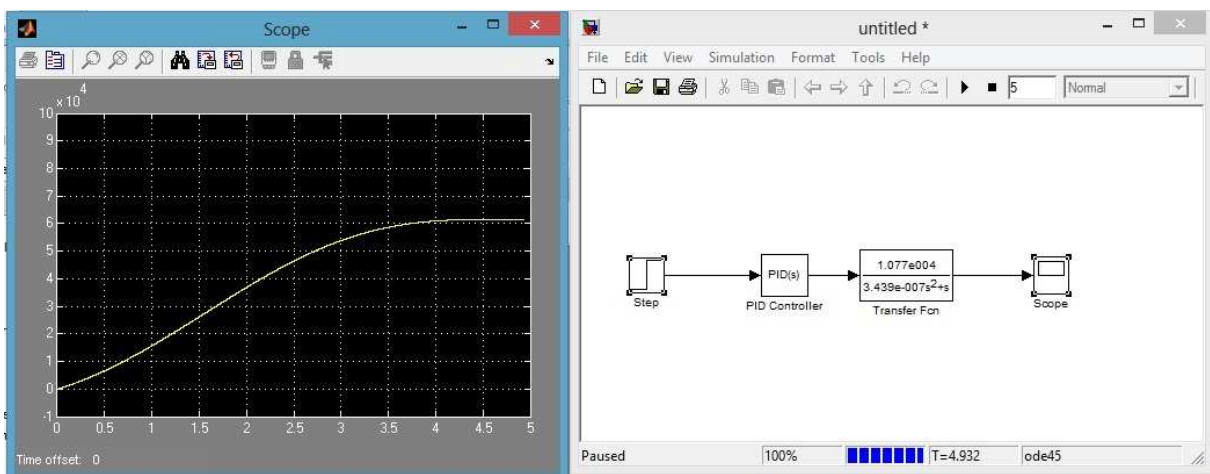


Figura 31 - Simulação da curva ótima do sistema

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Na figura 31, é apresentado a curva normal do sistema, com os valores das ações do PID igual a 1. Essa simulação representa o funcionamento correto da velocidade do manipulador cartesiano (velocidade nominal = 3183 rpm) com os parâmetros recomendados pelo fabricante. A correta alimentação dos dados no painel *view* realizada pelo técnico na linha de estamparia, terá como consequência para a empresa a melhor relação de peças por horas produzidas, como também, o tempo de vida útil dos componentes mecânicos será de acordo com as suas características de origem do material e o número de intervenções de manutenção por quebra, fadiga de cremalheiras e engrenagens danificadas irá ser reduzida.

A representação do valor das rotações por minutos de acordo com a curva será:

(1) Eixo Y = 60.000 graus em 5 segundos;

Conversão de graus para π rad/s (3.1416 rad) ;

$$(2) \text{ Eixo Y} * \pi \text{ rad} = 60.000 * 3,1416 ;$$

$$\text{Eixo Y} = 333,33 \pi \text{ rad};$$

Conversão de π rad para rotações por minutos (1 Rpm = 9.54929659643 rad/s);

$$(3) \text{ Eixo Y} * 1 \text{ Rpm} = 333,33 * 9.54929659643;$$

$$\text{Eixo Y} = 3183 \text{ rpm}$$

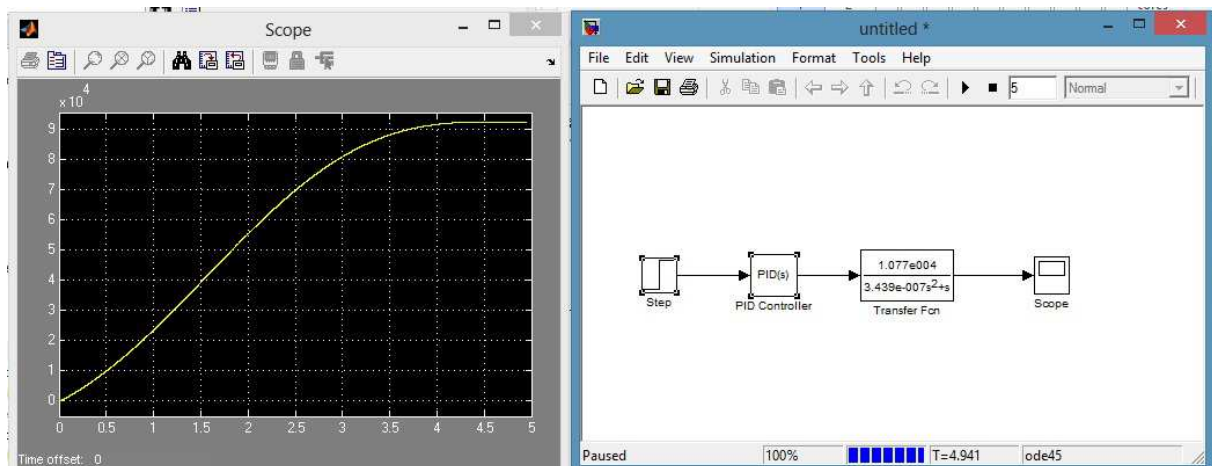


Figura 32 - Simulação da curva com ação proporcional

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Aplicando um ganho proporcional de valor 1.5, observa-se que a curva só irá se estabilizar com um valor acima da curva normal do sistema. A inclinação da curva tende a ser mais vertical, assim, é gerado um esforço maior no partido do servo motor em relação a movimentação do manipulador cartesiano. Essa velocidade maior que a nominal na partida, ocasionará um desgaste maior nas peças que compõe o robô, deste modo, aumentando o risco de parada e folgas entre chavetas da engrenagem com o eixo do servo motor.

A representação do valor das rotações por minutos de acordo com a curva será:

$$(1) \text{ Eixo Y} = 90.000 \text{ graus em 5 segundos};$$

Conversão de graus para π rad/s (3.1416 rad) ;

$$(2) \text{ Eixo Y} * \pi \text{ rad} = 90.000 * 3,1416 ;$$

$$\text{Eixo Y} = 500 \pi \text{ rad};$$

Conversão de π rad para rotações por minutos (1 Rpm = 9.54929659643 rad/s);

$$(3) \text{ Eixo Y} * 1 \text{ Rpm} = 500 * 9.54929659643;$$

$$\text{Eixo Y} = 4774 \text{ rpm}$$

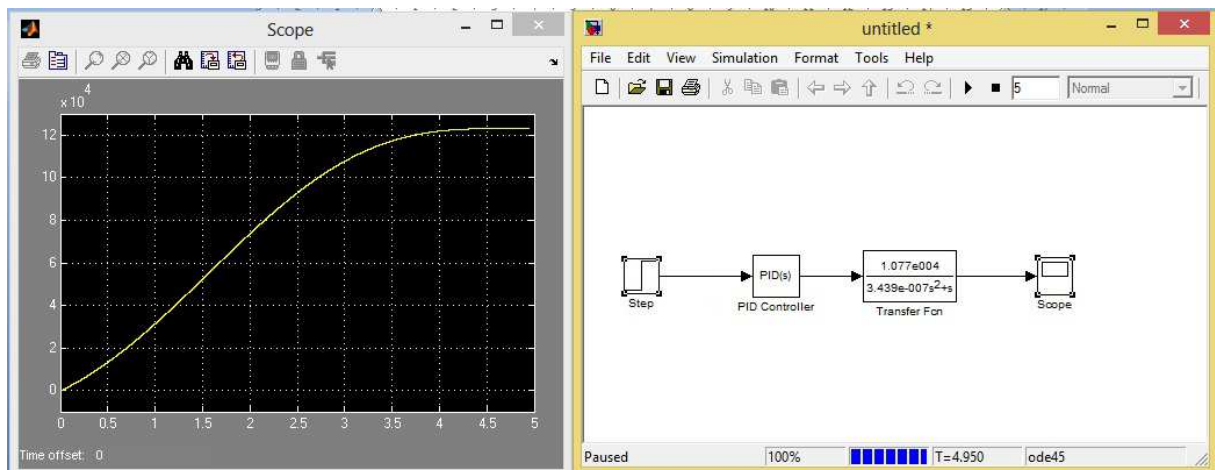


Figura 33 - Simulação da curva com ação proporcional do sistema estressado

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

Quando se há muitas intervenções de manutenções corretivas nos manipuladores cartesianos, a causa mais provável é a configuração errônea aplicada no sistema operacional do painel *view*. Na pressa de se conseguir um número de peças maior em relação a tempo de produção, ocorre o aumento da velocidade para 100% forçando todos os componentes responsáveis pela movimentação possuírem um desgaste pré-maturo. A configuração da velocidade realizada na linha de produção pelo técnico por via IHM em porcentagem é mostrada conforme figura 34.

A representação do valor das rotações por minutos de acordo com a curva será:

(1) Eixo Y = 120.000 graus em 5 segundos;

Conversão de graus para π rad/s (3.1416 rad) ;

(2) Eixo Y * π rad = 120.000 *3,1416 ;
Eixo Y = 666,7 π rad;

Conversão de π rad para rotações por minutos (1 Rpm = 9.54929659643 rad/s);

(3) Eixo Y * 1 Rpm = 666,7 * 9.54929659643;
Eixo Y = 6366 rpm

The screenshot shows the 'Dados ciclo0000' screen with the following data:

Quotas atuais (mm)		X	Z	SEL. EIXO		
		00000,0	00000,0	---		

BL	X [mm]	Z [mm]	Vel. [%]	Ac. [%]	Antec. [mm]
1: Posição start	00000,0	00000,0	0000,0	0000,0	
2: Z baixo durante prensão tapete		00000,0	0000,0	0000,0	
3: Z alto após prensão		00000,0	0000,0	0000,0	0000,0
4: X aguarda diante prensa	00000,0		0000,0	0000,0	
5: X p/frente sob prensa	00000,0		0000,0	0000,0	0000,0
6: Z baixo durante lib.		00000,0	0000,0	0000,0	
7: Z alto após lib.		00000,0	0000,0	0000,0	0000,0

At the bottom, there is a 'BLOCO' section with '0000', '-', '+', and 'ACK' buttons, and a 'COMANDOS' section with 'AJUDA' and 'OK' buttons.

Figura 34 - Tela de configuração da velocidade do servo motor no painel view.

Fonte: MANUAL ROBÔ NORDA.

O esforço excessivo resulta na quebra do manipulador e parada total da linha de estamparia. Para simular essa situação o valor da ação proporcional é igual a 2, ou seja, o dobro do valor ideal da velocidade do fabricante.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos propostos neste trabalho foram atingidos através dos estudos das curvas nos gráficos em relação a velocidade do eixo do servo motor no manipulador cartesiano com os parâmetros inseridos no sistema de controle.

Nas três simulações das curvas realizadas pelo *software simulink* no presente trabalho, observou-se o comportamento da inclinação da curva diretamente relacionado com a ação proporcional do sistema. Quanto maior era o ganho, maior o ângulo de inclinação na vertical e esse aumento do ângulo está diretamente relacionado com o esforço excessivo nos componentes mecânicos do robô, reduzindo sua vida útil e futuras quebras.

Outro ponto importante observado é a correta parametrização realizada pelo operador no painel *view* (interface homem máquina-IHM), sempre respeitando as limitações impostas pelo fabricante. Como o sistema apresentado no diagrama de blocos representa uma estrutura de malha aberta, ou seja, não tem o sinal de realimentação, uma vez inserido os dados no sistema, o comportamento dos manipuladores na linha de estamparia será o mesmo até que se acabe o processo. Portanto é necessário sempre um estudo, levando em conta os limites do sistema, para realizar o processo buscando o melhor custo benefício de produção de peças por horas sem as perdas desnecessárias por intervenções da manutenção.

REFERÊNCIAS

AUGUSTO, Eric R., SANTOS, Luan A., CANTÚ, Rafael M, **Servo motores**, Centro universitário univates centro de ciências exatas e tecnológicas engenharia de controle e automação disciplina de conversão de energia, Rio Grande do Sul, 2012.

BAZANELLA, Alexandre S., **Ajuste de Controladores PID**, Universidade Federal do Rio grande do sul Departamento de Engenharia Elétrica, 2011

BEGA, Egídio Alberto et al. **Instrumentação Industrial**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003

BHATTACHARYA, S. K., **Electrical Machinees** 3 ed. New Delhi, SDR Printers,2009

BOLTON, W. **Programmable Logic Controllers**. 5 ed. Burlington: Elsevier Ltd, 2009.

CHAPMAN, Stephen J. **Programação em MATLAB para engenheiros**. Austrália: Editora Thomson, 2003.

DORF, R.C.; BISHOP, R.H. **Sistemas de Controle Modernos**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

IBRAHIM, D, **Microcontroller Based Applied Digital Control**, England, John Wiley & Sons Ltd., 2006

LIMA, Carlos Raimundo Erig. **Notas de aula de fundamentos de controle**. Especialização em Automação Industrial, Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba: 2012.

MEDEIROS, Renan L. P. **Desenvolvimento e aplicação de motores de corrente contínuas virtuais aplicadas nas aulas laboratoriais de controle de sistemas**, Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Elétrica, Belém. 2011

MENDES, Ubiradir, **Acionamentos Elétricos**, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba 2004.

NORDA, **Manual Roboy Simotion Ver.5.0**, Itália, edição 2004

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4 ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

RIASCOS, Luis A.M, **Fundamentos de Robótica: manipuladores e robôs móveis**
Ed. Pleiade, São Paulo, 2010

SIEMENS, **For coordinated, highly dynamic motion control** -simodrive 611/
universal. Germany,edition 04/2003

SIEMENS, **Confiration manual** - simodrive e masterdrives - simodrive
611/masterdrives mc 1fk7 synchronous motors. Germany,edition 10/2005

SHIGLEY, Joseph E., MISCHKE, Charles R. , BUDYNAS, Richard G., **Projeto de engenharia mecânica**, 7 ed, São Paulo, Artmed editora s a , 2008.

STEBEL, Sergio Leandro. **Notas de aula de sintonia de controladores e estratégias de controle**. Especialização em Automação Industrial, Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba: 2012

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. **Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos**. Curitiba: Editora da UTFPR, 2008.