

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE UM  
SISTEMA IMPRESSOR *RASTER* DE FORMATO EXTRA-LARGO**

**Tese submetida à**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**para obtenção do grau de**

**DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Ing. David Guillermo Pimentel Burgoa, M.Eng.**

**Florianópolis, agosto de 2004**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE UM  
SISTEMA IMPRESSOR *RASTER* DE FORMATO EXTRA-LARGO**

**Ing. David Guillermo Pimentel Burgoa, M.Eng.**

**Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de  
DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA  
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA  
sendo aprovada na sua forma final.**

---

**Prof. Dr.-Ing. Carlos Alberto Martin**  
**Orientador**

---

**Dr.-Ing. T. Nagel, (TU - Dresden)**  
**Co-orientador**

---

**Prof. Dr. José Antonio Bellini da Cunha Neto**  
**Coordenador do curso de Pós-Graduação**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr.-Ing. Carlos Alberto Martin**  
**Presidente**

---

**Prof. José Maria Gálvez Ph.D.**  
**Relator**

---

**Prof. Hari Bruno Mohr Dr.Eng.**

---

**Prof. Dr.-Ing. Walter L. Weingaertner**

---

**Prof. Victor Juliano De Negri Dr. Eng.**

---

**Prof. Paulo A. de C. Beltrão Ph.D.**

## **AGRADECIMENTOS**

- Ao meu orientador Prof. C.A. Martin pelo permanente apoio recebido
- Ao CNPq pelo apoio institucional com a bolsa de doutorado
- A empresa Visual Signs e a sua diretiva pelo apoio financeiro e pela amizade
- A todos os professores, colegas e estagiários que de alguma maneira ajudaram na conclusão deste trabalho
- A toda minha família pelo apoio incondicional recebido

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE SIGLAS	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS	xviii
RESUMO	xxiii
ABSTRACT	xxiv
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Necessidades do mercado	1
1.2 Soluções e processos existentes	2
1.3 Projeto proposto	4
1.4 Requisitos de projeto	4
1.5 Solução inovadora desenvolvida	6
CAPÍTULO 2 ESTADO DA ARTE	8
2.1 Princípios de impressão	8
2.1.1 Cabeçotes de impressão	8
Cabeçote de impressão de caracteres fixos	8
Cabeçotes de impressão de caracteres por composição	9
2.1.2 Tipos de movimentação do cabeçote	11
Movimentação contínua	11
Movimentação seqüencial	12
2.1.3 Concepção estrutural	13
Rolo - cabeçote	13
Pórtico X-Y	13
2.1.4 Tabela comparativa	14
2.2 Impressoras comerciais	14
2.2.1 <i>Plotters</i>	14
2.2.2 Impressora margarida ( <i>daisy wheel</i> ) e de esfera ( <i>golf ball</i> )	15
2.2.3 Impressora matricial	16
2.2.4 Impressora matricial de linha	16
2.2.5 Impressora a jato de tinta	16
2.2.6 Impressora a LASER, LCD & LED)	17
2.2.7 Impressora de transferência térmica	18

2.2.8 Tabela comparativa dos modelos de impressoras comerciais	19
2.3 Dispositivos de impressão raster a jato de tinta	19
2.3.1 Dispositivo impressor piezo-elétrico	19
2.3.2 Dispositivo impressor térmico	20
2.3.3 Micro-máquina de fluxo contínuo de tinta	21
2.3.4 Válvula integrada (I.V.)	22
2.3.5 Válvula-solenóide com tinta sob pressão	23
2.3.6 Aerógrafos adaptados para comando automático	24
2.3.7 Tabela comparativa dos dispositivos impressores a jato de tinta	28
2.4 Teoria das cores, a visão e tecnologia de tintas	28
2.4.1 A luz	29
2.4.2 A cor do objeto	30
Cores primárias	31
Cores secundárias	33
Cores terciárias	34
Cores complementares	34
Propriedades de uma superfície	35
Modelos de cores	37
As cores e os efeitos psicológicos	38
Grandezas físicas da luz - fotometria	39
2.4.3 A visão	42
As cores primárias da visão	43
Imagem e resolução visual	43
2.4.4 Pinturas	48
Tintas Ultravioleta - UV	50
2.5 Análise de elementos para máquinas de formatos grandes	53
2.5.1 Estrutura de sustentação mecânica	53
2.5.2 Acionamento dos eixos	54
2.5.3 Guias para deslocamento translativo	55
2.5.4 Sistema de medição de deslocamento translativo	56
Encoder translativo óptico aberto sem contato	57
Encoder translativo indutivo aberto sem contato	57
2.5.5 Comando / controle de movimento e sinais digitais	58
Arquitetura aberta	59
Arquitetura modular	59

2.5.6 Gerenciamento do sistema	59
Programação em ambiente gráfico	59
Programação no modo texto	60
<b>CAPÍTULO 3 CONCEPÇÃO DO PROTÓTIPO</b>	<b>61</b>
3.1 Princípio de funcionamento	61
3.1.1 Módulos propostos	61
Módulo de pós-processamento	62
Conjunto impressor	64
Cabeçote impressor	64
3.1.2 Definição das funções do sistema e escolha da melhor opção de realização	65
Função obtenção da informação a ser impressa	66
Função comando / controle de movimento e sinais digitais I/O	67
Função gerenciamento do sistema	68
Função medição de deslocamento translativo	68
Função acionamento dos eixos	68
Função deslocamento translativo	69
Função estrutura de sustentação mecânica	69
Função concepção estrutural	69
Função impressão digital	70
3.1.3 Definição preliminar da solução proposta	70
3.2 Detalhamento do protótipo	71
3.2.1 Cabeçote impressor	72
Cabeçote de válvulas-solenóide	72
Projeto mecânico do cabeçote de válvulas-solenóides	73
3.2.2 Módulo de pós-processamento	74
3.2.3 Conjunto impressor	77
3.2.4 Protótipo do sistema impressor proposto	82
<b>CAPÍTULO 4 MODELAGEM QUALITATIVA DO SISTEMA PROPOSTO</b>	<b>83</b>
4.1 Introdução	83
4.2 Modelos dinâmicos dos sistemas de movimentação	88
4.2.1 Modelo dinâmico do módulo eletro-mecânico do eixo X	88
4.2.2 Modelo dinâmico do módulo eletro-mecânico do eixo Y	96
4.2.4 Algoritmo do controlador de movimentos	103

Ganho proporcional, $K_p$	104
Ganho derivativo, $K_d$	104
Ganho integral, $K_i$	105
4.3 Simulações dos modelos dinâmicos dos eixos X e Y	105
4.3.1 Simulação do modelo do eixo X em malha fechada	105
4.3.2 Especificações do controlador de posição requerido para o eixo X	107
4.3.3 Simulação do modelo do eixo X em malha fechada e controlador PID	108
4.3.4 Simulação do modelo do eixo Y em malha fechada	111
4.3.5 Especificações do controlador de posição requerido para o eixo Y	113
4.3.6 Simulação do modelo do eixo Y em malha fechada e controlador PID	113
CAPÍTULO 5 ENSAIOS E RESULTADOS OBTIDOS	117
5.1 Ensaio dinâmico do conjunto impressor	117
5.1.1 Introdução	117
5.1.2 Parâmetros do controlador	117
5.1.3 Resultados do ensaio de resposta ao degrau	119
5.1.4 Ensaio de trajetória	122
5.2 Testes técnicos preliminares do sistema impressor	125
5.2.1 Verificação da resolução	125
5.2.2 Teste de impressão	126
5.2.3 Exemplo de impressão	128
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÃO PARA CONTINUIDADE	130
6.1 Conclusões	130
6.1.1 Conclusões sobre o sistema impressor <i>raster</i>	130
6.1.2 Conclusões sobre o conjunto impressor	131
6.1.3 Principais contribuições	133
6.2 Sugestão para futuro trabalho	133
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135
APÊNDICES	142
APÊNDICE 1 Determinação dos acionamentos do sistema impressor	143
APÊNDICE 2 Exemplo de decodificação do código binário	155
APÊNDICE 3 Perfis e unidades de acionamento em alumínio	160
APÊNDICE 4 Fotos dos componentes do sistema impressor raster	163
APÊNDICE 5 Principais algoritmos do software gerenciador	166
APÊNDICE 6 Principais esquemas eletro-eletrônicos	171

APÊNDICE 7 Algoritmo PID-FF implementado no controlador de movimentos	179
Limite de integração ILim	180
Período de amostragem derivativo, $T_d$	181
Ganho de realimentação (secundário) de velocidade, $K_v$	182
Ganho de trans-alimentação da aceleração (Acceleration - Feed-Forward)	183
Ganho de trans-alimentação da velocidade (Velocity - Feed-Forward)	183
Faixas de valores dos parâmetros do algoritmo de controle	184
APÊNDICE 8 Lista de elementos de circuito	186



## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. <i>Outdoor</i> com descontinuidades na imagem.	1
Fig. 2. Esquema do sistema de acionamento do cabeçote <i>daisy wheel</i> .	8
Fig. 3. Esquema do sistema de acionamento do cabeçote <i>print chain</i> (IBM, 1968).	9
Fig. 4. Esquema da caneta para impressão vetor.	9
Fig. 5. Esquema do cabeçote matricial para impressão <i>raster</i> .	10
Fig. 6. Esquema do cabeçote impressor de caractere, <i>raster</i> .	10
Fig. 7. Esquema do cabeçote impressor de linha, <i>raster</i> .	11
Fig. 8. Sistema impressor de página.	11
Fig. 9. Esquema de uma impressão vetor, realizando o desenho mediante um movimento contínuo do cabeçote de impressão.	12
Fig. 10. Esquema de uma impressão <i>raster</i> , realizando o desenho a partir da impressão de pontos.	12
Fig. 11. Concepção de estrutura mecânica clássica rolo cabeçote. a) Estrutura própria para os cabeçotes de movimentação seqüencial. b) Para cabeçotes com ambos os tipos de movimento, contínuo e seqüencial.	13
Fig. 12. Concepção de estrutura mecânica do tipo pórtico X-Y.	14
Fig. 13. Vista de um <i>plotter</i> utilizando a concepção pórtico X-Y.	14
Fig. 14. Fotografias dos cabeçotes, a) Esfera <i>golf ball</i> da IBM. b) Disco <i>daisy wheel</i> (COMPUTER MUSEUM TONH, 2003).	15
Fig. 15. Processo de funcionamento dos cabeçotes piezo-elétricos.	20
Fig. 16. Processo de funcionamento dos cabeçotes térmicos.	20
Fig. 17. Processo de funcionamento dos cabeçotes de fluxo contínuo de tinta.	21
Fig. 18. Adaptação de um bico do “cabeçote de fluxo contínuo” para funcionar como cabeçote de impressão.	22
Fig. 19. Componentes da válvula integrada (DIAGRAPH, 2003).	23
Fig. 20. Válvula solenóide com tinta sob-pressão.	24
Fig. 21. a) Aerógrafo com mistura interna. b) Aerógrafo com mistura externa (AEROGRAFIA, 2004).	25
Fig. 22. Aerógrafo de ação simples (AEROGRAFIA, 2004).	25
Fig. 23. Aerógrafo de dupla ação (AEROGRAFIA, 2004).	26
Fig. 24. Esquema do aerógrafo modelo HP-101 (SOGOLEE, 2001).	26

Fig. 25. Adaptação do solenóide para movimentar o mecanismo que libera a saída da tinta (agulha).	27
Fig. 26. Instalação da eletro-válvula para controle de ar no aerógrafo.	27
Fig. 27. A avaliação visual de uma cor depende da luz, da cor do objeto e da visão do observador.	28
Fig. 28. Onda eletromagnética de propagação da luz (MOLECULAR EXPRESSIONS, 2002).	29
Fig. 29. Espectro visível da luz.	29
Fig. 30. Faixas de comprimentos de onda de cada cor.	30
Fig. 31. Absorção de parte da luz que incide sobre uma superfície e reflexão do resto.	31
Fig. 32. Conjunto de cores primárias aditivas.	32
Fig. 33. Conjunto de cores primárias subtrativas.	32
Fig. 34. Conjunto de cores primárias pigmento.	33
Fig. 35. a) Cores primárias pigmento. b) Cores secundárias pigmento.	33
Fig. 36. Cores terciárias da cor pigmento.	34
Fig. 37. O círculo cromático.	34
Fig. 38. Cores complementares.	35
Fig. 39. Tonalidade do verde.	35
Fig. 40. Saturação da cor.	35
Fig. 41. Luminância das cores.	36
Fig. 42. Espaço de cor tridimensional Munsell (SINTEPLAST, 2004).	36
Fig. 43. Definição da unidade padrão do ângulo sólido, estereoradiano.	40
Fig. 44. a) A retina do olho. b) Bastões e cones constituintes da retina (CORTESE, 2004).	42
Fig. 45. Tramas de densidades diferentes (MOLES, 1997).	45
Fig. 46. Várias figuras que podem ser utilizadas na medida da resolução ou acuidade visual humana.	45
Fig. 47. Parâmetros da fração Sneller.	46
Fig. 48. Relação entre acuidade visual e a distância de teste, (Takayuki 2001).	46
Fig. 49. Triângulo formado na fração Sneller.	47
Fig. 50. Relação entre a distância visual e a máxima resolução que pode ser visualizada, para as diferentes faixas etárias.	48
Fig. 51. Pigmentos que absorvem "seletivamente" uma gama de comprimentos de onda refletindo o resto.	49

Fig. 52. Módulos de transmissão a) Cabo de aço b) Correia sincronizadora dentada.	55
Fig. 53. Guias <i>slide pack</i> com esferas recirculantes (THK LM SYSTEM, 2000).	56
Fig. 54. Princípio de funcionamento do <i>encoder</i> translativo óptico utilizando o método reflexivo (HEIDENHAIN, 2004).	57
Fig. 55. Constituição da escala indutiva (DYNAPAR, 2000).	58
Fig. 56. Princípio de funcionamento dos <i>encoders</i> indutivos abertos sem contato (DYNAPAR, 2000).	58
Fig. 57. Esquema do sistema impressor <i>raster</i> de formato extra-largo.	61
Fig. 58. Esquema dos componentes mecânicos definidos para o conjunto impressor.	71
Fig. 59. Cabeçote de Impressão utilizando válvulas solenóide como dispositivos de impressão.	73
Fig. 60. Aquisição da informação de impressão via <i>hardware</i> .	74
Fig. 61. Freqüência dos sinais na impressora fonte, tela do osciloscópio.	75
Fig. 62. Diagrama de blocos do controlador de movimento.	76
Fig. 63. Tela de interface com o usuário do <i>software</i> gerenciador do sistema e programa principal em código gráfico.	77
Fig. 64. Estrutura mecânica do protótipo do conjunto impressor.	78
Fig. 65. Detalhes do projeto mecânico do protótipo do sistema impressor.	79
Fig. 66. Erro de posicionamento na realização dos pontos de impressão.	79
Fig. 67. Freqüência dos sinais gerados pelo <i>encoder</i> indutivo translativo.	80
Fig. 68. Protótipo do sistema impressor de formato extra-largo.	82
Fig. 69. Croqui dos componentes do eixo X do sistema impressor.	85
Fig. 70. Croqui dos componentes do eixo Y do sistema impressor.	86
Fig. 71. Fluxograma do modelo dinâmico do sistema de controle para ambos os eixos do sistema impressor.	86
Fig. 72. Modelo básico da planta do eixo X baseado em elementos de circuito.	89
Fig. 73. Somadores e funções de transferência dos elementos funcionais constituintes do eixo X.	90
Fig. 74. Modelo dinâmico para a planta do eixo X.	91
Fig. 75. Modelo dinâmico simples do <i>drive</i> do servomotor (SCIATICCO, 1996).	91
Fig. 76. Modelo dinâmico em diagrama de blocos de um servomotor com seu <i>drive</i> .	92

Fig. 77. Modelo dinâmico em diagrama de blocos de um servo servomotor com <i>drive</i> em modo torque.	92
Fig. 78. Modelo dinâmico completo do acionamento em conjunto com a planta do eixo X.	93
Fig. 79. Modelo dinâmico reduzido do acionamento em conjunto com a planta do eixo X.	93
Fig. 80. Modelo dinâmico do eixo X implementado como diagrama de programação para Simulink do MatLab.	95
Fig. 81. Resultados da simulação do modelo matemático do eixo X a uma entrada em degrau de 10 V de sinal ao <i>drive</i> do servomotor.	96
Fig. 82. Modelo básico da planta do eixo Y baseado em elementos de circuito.	97
Fig. 83. Somadores e funções de transferência dos elementos funcionais constituintes do eixo Y.	98
Fig. 84. Modelo dinâmico para a planta do eixo Y.	98
Fig. 85. Modelo dinâmico completo do acionamento em conjunto com a planta do eixo Y.	99
Fig. 86. Modelo dinâmico reduzido do acionamento em conjunto com a planta do eixo Y.	99
Fig. 87. Modelo dinâmico do eixo Y implementado como diagrama de programação para Simulink do MatLab.	101
Fig. 88. Resultados da simulação do modelo matemático do eixo Y a uma entrada em degrau de 10 V de sinal ao <i>drive</i> do servomotor.	101
Fig. 89. Resultados da simulação considerando a correia com $k_y=1.727$ N/m.	102
Fig. 90. Resultados da simulação considerando a correia com $k_y=1.727$ N/m e $m_y=12$ kg.	103
Fig. 91. Diagrama de blocos do controlador PID em paralelo.	104
Fig. 92. Modelo dinâmico do eixo X com realimentação de posição mas sem controlador (controlador unitário).	106
Fig. 93. Resultados da simulação do eixo X com malha fechada de posição mas sem controlador.	106
Fig. 94. Diagrama de blocos do controlador implementado para cada eixo de movimento do sistema impressor.	107
Fig. 95. Modelo dinâmico básico completo do eixo X.	108
Fig. 96. Modelo dinâmico do <i>encoder</i> .	108

Fig. 97. Diagrama de blocos do modelo implementado no eixo X com controlador PID.	109
Fig. 98. Respostas ao degrau do modelo implementado no eixo X com controlador PID.	110
Fig. 99. Mais rápida resposta ao degrau obtida pela simulação do modelo do eixo X.	111
Fig. 100. Modelo dinâmico do eixo Y com realimentação de posição mas sem controlador (controlador unitário).	112
Fig. 101. Resultados da simulação do eixo Y com malha fechada de posição mas sem controlador.	112
Fig. 102. Modelo dinâmico básico completo do eixo Y.	114
Fig. 103. Diagrama de blocos do modelo implementado no eixo Y com controlador PID.	114
Fig. 104. Primeira simulação da resposta ao degrau do modelo implementado no eixo Y com controlador PID.	115
Fig. 105. Segunda simulação da resposta ao degrau do modelo implementado no eixo Y com controlador PID.	116
Fig. 106. Parâmetros do controlador do eixo X.	118
Fig. 107. Parâmetros do controlador do eixo Y.	118
Fig. 108. Resposta medida a um degrau de posição de 01 rotação (8000 pulsos de encoder) do servomotor do eixo X.	119
Fig. 109. Resposta medida a um degrau de posição de 0,5 rotação (4000 pulsos de encoder) do servomotor do eixo Y.	120
Fig. 110. Resposta ao degrau de 336 pulsos de posição do eixo Y.	121
Fig. 111. Ensaio de perfil de velocidade na trajetória do eixo X.	123
Fig. 112. Ensaio de perfil de velocidade na trajetória do eixo Y.	124
Fig. 113. Ensaio realizados variando a frequência de energização do dispositivo de impressão, sobre um papel branco de 75 g/m <sup>2</sup> .	125
Fig. 114. Quadrado de 30x30 pontos impresso no sistema proposto.	126
Fig. 115. Detalhe dos retângulos impressos nos extremos da área de impressão. a) Extremo direito. b) Extremo esquerdo	127
Fig. 116. Tela no computador da figura a ser impressa.	128
Fig. 117. Protótipo do sistema impressor em funcionamento.	129
Fig. 118. Impressão de aproximadamente 6 m <sup>2</sup> realizada pelo sistema impressor de formato extra-largo proposto.	129

Fig. 119. Curva de velocidade do cabeçote no eixo X.	143
Fig. 120. Análise de forças no cabeçote impressor.	144
Fig. 121. Tempo utilizado pelo eixo Y para um deslocamento de 12 mm.	148
Fig. 122. Conjunto impressor do sistema proposto.	148
Fig. 123 Imagem a ser decodificada.	155
Fig. 124 Visualização em hexadecimal da imagem.	155
Fig. 125 Dados do arquivo, em destaque.	156
Fig. 126 Dados sobre a imagem, em destaque.	157
Fig. 127 Dados referente aos pixels do arquivo.	158
Fig. 128. Perfil de AI 160x80.	160
Fig. 129. Unidade de acoplamento do servomotor.	160
Fig. 130. a) Unidade motriz para correia fixa. b) Princípio de funcionamento.	161
Fig. 131. Guias lineares cilíndricas com castanha de esferas recirculantes.	162
Fig. 132. Interface de aquisição de sinal.	163
Fig. 133. Foto do módulo condicionar de sinal.	163
Fig. 134. Estrutura mecânica do protótipo do Conjunto Impressor.	164
Fig. 135. Guias com castanhas de esferas recirculantes.	164
Fig. 136. Impressão de dois retângulos nos extremos da área de impressão.	165
Fig. 137. Tela dos valores dos parâmetros durante a execução da impressão.	166
Fig. 138. Tela de interface com o usuário do <i>software</i> gerenciador.	167
Fig. 139. Código do programa principal do sistema impressor.	167
Fig. 140. Sob-programas do programa principal.	168
Fig. 141. Código do programa que realiza a impressão <i>raster</i> .	169
Fig. 142. Sob-programa "mover" da função imprimir <i>raster</i> .	170
Fig. 143. Esquema das ligações entre o condicionador de sinal com os diversos elementos eletro-eletrônicos do sistema impressor.	171
Fig. 144. Diferentes componentes do condicionador de sinal.	172
Fig. 145. Diagrama de blocos dos sensores de fim de curso óticos de ambos os eixos.	173
Fig. 146. Esquema elétrico da placa eletrônica dos sensores de fim de curso óticos.	174
Fig. 147. Esquema elétrico da ligação dos sensores óticos de fim de curso.	174
Fig. 148. Diagrama de blocos da placa eletrônica dos relês para liga/desliga dos <i>drives</i> dos servomotores.	175

- Fig. 149. Circuito elétrico da placa de acionamento dos solenóides dos bicos ejetores do cabeçote impressor. 176
- Fig. 150. Esquema da ligação elétrica dos sinais da placa de controle de movimentos com o resto dos módulos. 176
- Fig. 151. Esquema da ligação elétrica entre o *drive* do servomotor X com seus diversos módulos requeridos para seu funcionamento. 177
- Fig. 152. Esquema da ligação elétrica entre o *drive* do servomotor Y com seus diversos módulos requeridos para seu funcionamento. 178
- Fig. 153. Algoritmo de controle PID+FF implementável com o módulo (placa) de controle de movimento utilizado no sistema. 179

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo dos princípios de impressão.	14
Tabela 2. Resumo dos modelos de impressoras comerciais.	19
Tabela 3. Resumo das características dos dispositivos impressores a jato de tinta.	28
Tabela 4. Máximas distâncias (m) em que podem ser visualizados os detalhes dos objetos (em dpi) do ensaio de resolução visual, pelas diferentes faixas etárias.	47
Tabela 5. Matriz morfológica do Sistema.	67
Tabela 6. Variáveis e valores dos coeficientes requeridos no modelo do eixo X.	94
Tabela 7. Variáveis e valores dos coeficientes requeridos no modelo do eixo Y.	100
Tabela 8. Orientação básica para um ajuste manual do controlador PID (DA SILVA, 2003).	117
Tabela 9. Massa dos componentes que atuam sobre o eixo Y.	149
Tabela 10. Dados do arquivo	156
Tabela 11. Dados do gráfico.	157
Tabela 12. Módulos de transmissão utilizando guias de precisão (SCHÜCO DESIGN, 2003).	161
Tabela 13. Faixas de valores dos parâmetros PID+FF para o algoritmo de controle do sistema implementado (NI, 2004).	185



## LISTA DE SIGLAS

- BMP:** Abreviação de "**Bit Map**".
- CMY:** Abreviação do modelo de cor "**Cyan - Magenta - Yellow**".
- CMYK:** Abreviação do modelo de cor "**Cyan-Magenta-Yellow-Black**".
- CNC:** Abreviação de "**Computer Numeric Control**".
- cps:** Caracteres por segundo.
- DAC:** Abreviação de "**Digital Analogic Converter**".
- dpi:** Abreviação de "**dots per inch**", pontos por polegada linear.
- GPiB:** Abreviação de "**General Purpose Interface Bus**".
- HPGL:** Abreviação de "**Hewlett Packard Graphics Language**".
- HSB:** Abreviação do modelo de cor "**Hue - Saturation - Brightness**", matiz - saturação - brilho.
- LASER:** Abreviação de "**Ligh Amplification by Stimulated Emission of Radiation**".
- LCD:** Abreviação de "**liquid crystal display**".
- LED:** Abreviação de "**light emitting diode**".
- MAX:** Abreviação de "**Measurement & Automation Explorer**".
- OMT:** Abreviação de "**Object Model Technique**".
- P&B:** Preto e branco.
- PCL:** Abreviação de "**Printer Control Language**".
- PDL:** Abreviação de "**Page Description Language**".
- PID:** Algoritmo de controle Proporcional Integral e Derivativo.
- PI-D-FF:** Algoritmo de controle Proporcional Integral Derivativo Trans-alimentado (FeedForward).
- PostScript:** Linguagem de impressão e processamento utilizada pelas impressoras.
- ppm:** Número de páginas impressas por minuto.
- PXI:** Sistema de arquitetura aberta baseada no *CompactPCI*.
- RAD:** Abreviação de "**Rapid Application Development**".
- RGB:** Abreviação do modelo de cor "**Red - Green - Blue**".
- UV:** Ultravioleta.
- VI:** Válvula Integrada.
- VXI:** Abreviação de "**Versa Modul on eurocard eXtension for Intercacing**".

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu$ :	Coeficiente de atrito de rolamento	
$\eta$ :	Rendimento do conjunto	
$\lambda$ :	Comprimento da onda eletromagnética de propagação da luz	
$\theta$ :	Deslocamento angular instantâneo do eixo do servomotor	[rad]
$\nu$ :	freqüência da onda eletromagnética de propagação da luz	
$\omega$ :	Velocidade angular instantânea do eixo do servomotor	[rad/s]
$\theta_p$ :	Realimentação digital do deslocamento angular do eixo do servomotor	[pulsos]
$\omega_{ry}$ :	Velocidade angular na entrada do redutor	[rad/s]
$\omega_x$ :	Velocidade angular do servomotor do eixo X	[rad/s]
$\omega_{x1}$ :	Velocidade angular da polia acoplada ao eixo do servomotor	[rad/s]
$\omega_{x2}$ :	Velocidade angular da polia da unidade de desvio	[rad/s]
$\omega_y$ :	Velocidade angular do servomotor do eixo Y	[rad/s]
$1/T$ :	Estimador para cálculo de baixíssimas velocidade do servomotor.	
$a$ :	Aceleração	[pulsos/s <sup>2</sup> ]
$A_{ff}$ :	Ganho de trans-alimentação da aceleração	
$A_p$ :	Área impressa numa passada do cabeçote impressor	[m <sup>2</sup> ]
$a_x$ :	Aceleração do cabeçote impressor	[m/s <sup>2</sup> ]
$a_y$ :	Aceleração do conjunto impressor	[m/s <sup>2</sup> ]
$b$ :	Coeficiente de atrito viscoso total aplicado no eixo do servomotor	[Nm/rad/s]
$b_1$ :	Coeficiente de atrito viscoso na polia acoplada ao servomotor do eixo X	[Nm/rad/s]
$b_2$ :	Coeficiente de atrito viscoso na polia na unidade de desvio do eixo X	[Nm/rad/s]
$b_3$ :	Coeficiente de atrito viscoso castanhas / guias lineares	[Nm/rad/s]
$b_4$ :	Coef. de atrito viscoso nas 3 polias do carro de acionamento Y	[Nm/rad/s]
$b_L$ :	Coeficiente de atrito viscoso na carga	[Nm/rad/s]
$b_m$ :	Coeficiente de atrito viscoso no servomotor	[Nm/rad/s]
$b_{mx}$ :	Coeficiente de atrito viscoso no servomotor X	[Nm/rad/s]
$b_{my}$ :	Coeficiente de atrito viscoso no servomotor Y	[Nm/rad/s]
$b_x$ :	Coeficiente de atrito viscoso total aplicado no eixo do servomotor X	[Nm/rad/s]
$b_y$ :	Coeficiente de atrito viscoso total aplicado no eixo do servomotor Y	[Nm/rad/s]
$C_i(s)$ :	Função reguladora de corrente	
$d$ :	Deslocamento	[m]

$d_l$ :	Distância para 1 arco min para medida da fração de Snellen	[m]
$d_v$ :	Distância Visual para medida da fração de Snellen	[m]
$d_x$ :	Espessura dos detalhes das figuras para medida da fração de Snellen	[m]
$e$ :	Erro de posição, diferença entre o valor de referência e a realimentação	
$e_a$ :	Tensão aplicada na armadura do servomotor	[V]
$e_c$ :	Tensão de comando aplicado ao <i>drive</i>	[V]
$e_g$ :	Força contra eletro-motriz	[V]
$e_L$ :	Tensão sobre $L_a$	
$e_{out}$ :	Sinal de tensão de saída do DAC e Sinal de tensão de comando do <i>drive</i>	[V]
$e_R$ :	Tensão sobre $R_a$	
$e_{x_{out}}$ :	Sinal de tensão de comando no <i>drive</i> do servomotor do eixo X	[V]
$e_{y_{out}}$ :	Sinal de tensão de comando no <i>drive</i> do servomotor do eixo Y	[V]
$F$ :	Força total aplicada	[N]
$f_0$ :	Força total aplicada na correia do eixo	[N]
$f_1$ :	Força para movimentar a massa total a ser transportada	[N]
$f_2$ :	Força para vencer o atrito viscoso das castanhas nas guias no eixo Y	[N]
$f_3$ :	Força para vencer o atrito viscoso das castanhas nas guias no eixo X	[N]
$f_4$ :	Força aplicada na polia da unidade de desvio	[N]
$F_{ax}$ :	Força para acelerar a carga no eixo X	[N]
$F_{ay}$ :	Força para acelerar a carga no eixo Y	[N]
$f_e$ :	Frequência dos sinais do <i>encoder</i>	[Hz]
$F_{ext}$ :	Força externa de perturbação	[kgf]
$F_{tx}$ :	Força total a ser aplicada pelo servomotor no eixo X	[N]
$F_{ty}$ :	Força total a ser aplicada pelo servomotor no eixo Y	[N]
$F_{ux}$ :	Força de atrito no eixo X	[N]
$F_{uy}$ :	Força de atrito no eixo Y	[N]
$g$ :	Acceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$G_v$ :	Ganho do <i>drive</i>	
$i$ :	Relação de redução de engrenagens	
$i_a$ :	Corrente de alimentação no enrolamento da armadura	[A]
$ILim$ :	Limite de integração	
$i_y$ :	Relação na redução planetária no eixo Y	
$j$ :	Momento de inércia total aplicado no eixo do servomotor	[kg m <sup>2</sup> ]
$j_1$ :	Momento de inércia da polia e acoplamento	[kg m <sup>2</sup> ]
$j_2$ :	Inércia da polia da unidade de desvio do eixo X	[kg m <sup>2</sup> ]

$j_3$ :	Inércia das 3 polias do carro de acionamento Y	[kg m <sup>2</sup> ]
$j_L$ :	Momento de inércia da carga	[kg m <sup>2</sup> ]
$j_{Lx}$ :	Momento de inércia da carga do eixo X	[kg m <sup>2</sup> ]
$j_{Ly}$ :	Momento de inércia da carga do eixo Y	[kg m <sup>2</sup> ]
$j_m$ :	Momento de inércia do eixo do servomotor	[kg m <sup>2</sup> ]
$j_{mx}$ :	Momento de inércia do eixo do servomotor X	[kg m <sup>2</sup> ]
$j_{my}$ :	Momento de inércia do eixo do servomotor Y	[kg m <sup>2</sup> ]
$j_{ry}$ :	Momento de inércia da carga depois do redutor no eixo Y	[kg m <sup>2</sup> ]
$j_x$ :	Momento de inércia total aplicado no eixo do servomotor X	[kg m <sup>2</sup> ]
$j_y$ :	Momento de inércia total aplicado no eixo do servomotor	[kg m <sup>2</sup> ]
$K_c$ :	Transdutor da corrente de alimentação à armadura	[V/A]
$K_{cx}$ :	Transdutor da corrente de alimentação à armadura do eixo X	[V/A]
$K_{cy}$ :	Transdutor da corrente de alimentação à armadura do eixo Y	[V/A]
$K_d$ :	Ganho derivativo	
$K_e$ :	Constante (de tensão) da força contra-eletromotriz	[V/rad/s]
$K_{enc}$ :	Constante do <i>encoder</i>	[pulsos/rot]
$K_{ex}$ :	Constante (de tensão) da força contra-eletromotriz no eixo X	[V/rad/s]
$K_{ey}$ :	Constante (de tensão) da força contra-eletromotriz no eixo Y	[V/rad/s]
$K_i$ :	Ganho integral	
$K_p$ :	Ganho proporcional	
$K_t$ :	Constante de torque do servomotor	[Nm/A]
$K_{tx}$ :	Constante de torque do servomotor no eixo X	[Nm/A]
$K_{ty}$ :	Constante de torque do servomotor no eixo Y	[Nm/A]
$K_v$ :	Ganho de realimentação da velocidade	
$k_x$ :	Constante de elasticidade da correia sincronizadora no eixo X	[N/m]
$k_y$ :	Constante de elasticidade da correia sincronizadora no eixo Y	[N/m]
$L_a$ :	Indutância do enrolamento da armadura	[H]
$l_{ax}$ :	Distância de aceleração e desaceleração	[m]
$l_{vx}$ :	Deslocamento em velocidade constante	[m]
$l_x$ :	Deslocamento do eixo X por linha de impressão	[m]
$l_y$ :	Deslocamento do eixo Y por linha de impressão	[m]
$l_{y1}, l_{y2}$ :	Distância de aceleração de desaceleração no eixo Y	[m]
$m$ :	Massa do corpo a ser movimentado	[kg]
$M_0$ :	Torque eletromecânico do servomotor	[Nm]
$M_1$ :	Torque para vencer a inércia total aplicada no eixo do servomotor	[Nm]

$M_3$ :	Torque para vencer o atrito viscoso total aplicado no eixo do servomotor	[Nm]
$M_4$ :	Torque disponível para movimentar a carga	[Nm]
$M_5$ :	Torque para mover a polia da unidade de desvio	[Nm]
$M_6$ :	Torque para vencer a inércia da polia da unidade de desvio	[Nm]
$M_7$ :	Torque para vencer o atrito viscoso da polia da unidade de desvio	[Nm]
$M_{ac}$ :	Torque de acionamento da carga no eixo Y	[Nm]
$M_c$ :	Carga devido à massa do cabeçote impressor	[N]
$m_c$ :	Massa do cabeçote impressor	[kg]
$M_{ca}$ :	Carga devido à massa do carro porta-cabeçote	[N]
$m_{ca}$ :	Massa do carro porta-cabeçote	[kg]
$m_{co}$ :	Massa da correia	[kg]
$M_{ext}$ :	Perturbação externa de torque	[Nm]
$M_{iy}$ :	Torque fornecido depois do redutor do eixo Y	[Nm]
$M_m$ :	Torque eletromecânico do servomotor	[Nm]
$M_{mx}$ :	Torque do servomotor do eixo X	[Nm]
$M_{my}$ :	Torque do servomotor do eixo Y	[Nm]
$M_r$ :	Torque resistente da carga	[Nm]
$M_{ry}$ :	Torque requerido no eixo Y	[Nm]
$M_x$ :	Carga total sobre as guias do eixo X	[N]
$m_x$ :	Massa total sobre as guias do eixo X	[kg]
$M_y$ :	Carga total sobre as guias do eixo Y	[N]
$m_y$ :	Massa total sobre as guias do eixo Y	[kg]
$N$ :	Reação normal ao peso do corpo	[N]
$n_{ry}$ :	Rotações na entrada do redutor	[rpm]
$N_x$ :	Reação normal ao peso aplicado no eixo X	[N]
$n_x$ :	Rotações do servomotor X	[rpm]
$N_y$ :	Reação normal ao peso aplicado no eixo Y	[N]
$n_y$ :	Rotações do servomotor Y	[rpm]
$R_a$ :	Resistência do enrolamento da armadura	[ $\Omega$ ]
$r_e$ :	Resolução do <i>encoder</i>	[m]
$r_v$ :	Resolução visual	
$r_x$ :	Raio da polia acoplada ao servomotor do eixo X	[m]
$r_y$ :	Raio da polia acoplada ao servomotor do eixo Y	[m]
$s$ :	Variável de Laplace	
$T_a$ :	Período de amostragem da malha PID	

$t_{ax}$ :	Tempo de aceleração	[s]
$T_d$ :	Período de amostragem derivativo	
$t_i$ :	Tempo total de impressão de uma passada do Conjunto Impressor	[s]
$t_{si}$ :	Período dos sinais do <i>encoder</i>	[s]
$T_v$ :	Constante de tempo do <i>drive</i>	
$t_{vx}$ :	Tempo para deslocamento em velocidade constante	[s]
$t_x$ :	Tempo total de deslocamento do cabeçote impressor no eixo X	[s]
$t_y$ :	Tempo de deslocamento do eixo Y por linha de impressão	[s]
$t_{y1}$ :	Tempo de aceleração	[s]
$t_{y2}$ :	Tempo de desaceleração	[s]
$v$ :	Velocidade	[pulsos/s]
$V_{if}$ :	Ganho de trans-alimentação da velocidade	
$v_i$ :	Velocidade de impressão do sistema impressor	[m <sup>2</sup> /h]
$v_x$ :	Velocidade do dispositivo de impressão no eixo X	[m/s]
$v_{x1}$ :	Velocidade da correia tangente à polia acoplada ao servomotor	[m/s]
$v_{x2}$ :	Variação da velocidade ao longo da correia considerada como mola	[m/s]
$v_y$ :	Velocidade do carro de acionamento Y	[m/s]
$v_{y1}$ :	Velocidade da correia tangente à polia acoplada ao servomotor	[m/s]
$v_{y2}$ :	Variação da velocidade ao longo da correia considerada como mola	[m/s]
$X$ :	Deslocamento	[m]
$x$ :	Referência de posição	[pulsos]
$\Omega$ :	Velocidade angular instantânea do eixo do servomotor	[rad/s]
$\Omega_p$ :	Realimentação digital da velocidade angular do eixo do servomotor	[pulsos/s]

## RESUMO

O presente trabalho visa contribuir para o desenvolvimento de sistemas de impressão, apresentando uma proposta de análise de dispositivos para impressão e desenvolvendo um sistema impressor *raster* de formato extra-largo, necessidade especial e atual das micro e pequenas empresas de comunicação visual. Destina-se a realizar impressões de mídias sem emendas, na ordem dos metros (3,5m de boca), com resolução adequada (menor) para visualização acima dos 6 m possibilitando maiores velocidades de impressão, de até 40 m<sup>2</sup>/h e a menor custo.

Devido a sua concepção com base vazada pode imprimir através do plano de base diretamente sobre a superfície final, o que permite realizar impressões tanto sobre superfícies rígidas como filmes flexíveis (papel, plástico, lona, etc). O protótipo do sistema impressor proposto consta de três principais módulos: O módulo de pós-processamento que realiza a leitura da informação de impressão, condiciona os sinais e gera os comandos específicos que atuam nos sistemas de acionamento localizados no segundo módulo, o conjunto impressor, estes comandos movimentam adequadamente os eixos do pórtico X-Y para que o terceiro módulo, o cabeçote impressor, realize a impressão propriamente dita ao comando de sinais elétricos.

A leitura da informação de impressão, cor e sua posição x,y no desenho para cada ponto, foi implementada no módulo de pós-processamento utilizando dois métodos, um via *hardware* utilizando a informação existente numa impressora comum durante seu funcionamento e outro via *software* diretamente do gráfico a ser impresso.

Com o objetivo de melhor conhecer e otimizar a resposta dinâmica do conjunto impressor, os dois eixos de movimento da máquina foram modelados obtendo suas funções de transferência. A simulação destas funções permite conhecer seu comportamento e conseguir um ajuste adequado dos parâmetros de controle da placa controladora de movimentos. Após todos estes processos, foram realizados com o conjunto impressor vários ensaios de resposta no tempo para posicionamento e trajetória, até atingir o comportamento especificado.

O *software* gerenciador projetado integra todos estes sub-sistemas e comanda o funcionamento do protótipo impressor desenvolvido. Com o sistema funcionando realizaram-se testes de qualificação de impressão em formato extra-largo, os quais já atendem satisfatoriamente as exigências impostas. Atualmente o protótipo desenvolvido encontra-se em fase experimental e de otimização de funcionamento.

## ABSTRACT

This research work is a contribution to design printing systems, presenting a proposal in order to analyze devices and to develop a raster printer system having extra-large format, specially and update need by visual communication enterprises, having small and medium size.

Such printing system is intended for print large-scale images within the range of 3,5 meters of mouth with adequate resolution (smaller) for visualization above 6 meters supporting printing velocities up to 40 m<sup>2</sup>/h and lower cost.

Due to its conception it is able to print directly through its base plan on the final surface, allowing printing on rigid surfaces as well as on flexible films (papers, plastic, canvas etc...)

The prototype of the proposed printing system has three main modules:

The post-processing module reads the information to be printed, sets the signals and generates the specific commands that actuate on the specific drives placed on the second module. The printing head in the third module follows the program feeding the drives of the x – y gantry in order to do the printing movements.

The reading of the printing color and x – y position informations for each point in the drawing has been implemented in the post-processing module using two methods, one by hardware, using an existing information in a standard printer in use, and another way, directly from the printing graphics file.

For to better know how to optimize the dynamic behavior of the printing system the two motion axis have been modeled in order to get its transfer functions. The simulation of this functions allows to know its behavior in order to help obtain an adequate values set of the parameters of the motion controller. After these procedures, systematic time measurements helped to match the given specifications.

The main implemented system software integrates all these sub-systems and commands the printer machine. Qualifying printing tests using extra-large format show that the system supports well the imposed requirements. Right now the developed prototype is in experimental tests aiming optimization.



## CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Necessidades do mercado

O mercado de comunicação visual para produção de painéis de propaganda, de informação, *outdoors*, cartazes de produtos ou de nomes de empresas, etc. com dimensões na ordem de metros (p/ex. um *outdoor* de rua tem um tamanho padrão de 3x9m), é atendido principalmente por inúmeras micro e pequenas empresas, tratando-se do ramo de atividade em crescimento exponencial.

Entretanto, a maior parte dos trabalhos realizados por estas empresas NÃO oferece um resultado final de impacto e sofisticação, principalmente porque são realizados a partir de linhas e traços (processo adesivo, as letras e figuras são decalcadas - coladas - no painel) ou porque são realizados mediante sua produção em partes (mosaicos) que são daí unidas quando da aplicação no suporte (mural, parede, etc) como apresentado na Fig. 1. Este processo de aplicação traz alguns graves problemas, tais como, descontinuidades na imagem devido às emendas ou à falta de precisão no processo de colocação dos mosaicos, e variações nos tons, devido a não terem sido impressas como uma peça única. O problema dos tons se acentua quando ocorre o reabastecimento de tinta durante a impressão dos mosaicos de uma mesma imagem, facilmente verificado ao se imprimir quantidades maiores de exemplares.

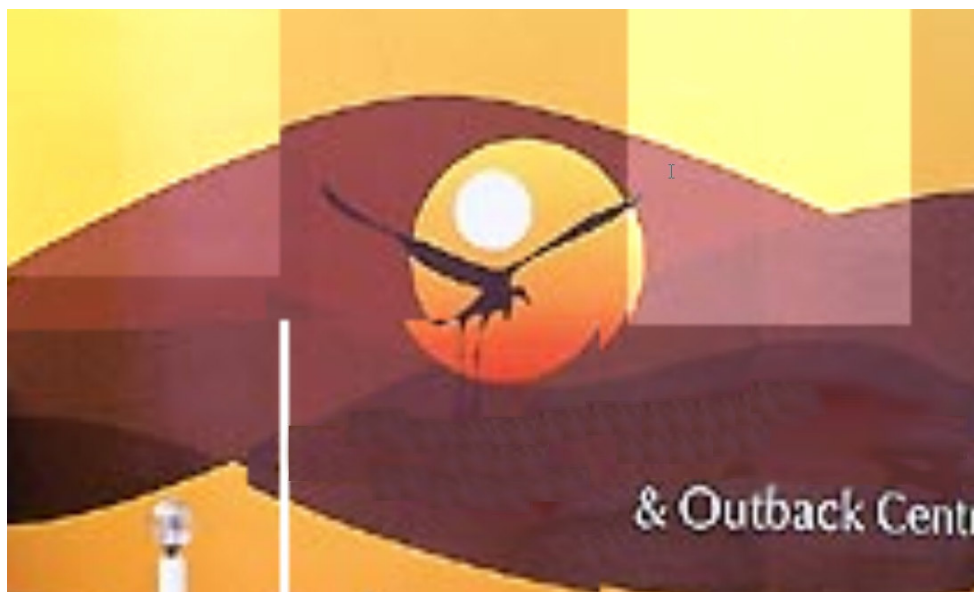


Fig. 1. *Outdoor* com descontinuidades na imagem.

Estas artes de formato extra-largo são realizadas em mosaicos devido a que as máquinas de serigrafia e impressoras existentes nas empresas do ramo são pequenas para o tamanho da arte requerida. Por outro lado segundo LARESE (2002) a maior máquina de serigrafia num processo semi-automático está na ordem de 1,4x4,0m, que também não atende as necessidades de tamanho exposto. Respeito às impressoras, a mais difundidas no mercado local tem uma largura de boca de 60 ou 90 cm e algumas de 150 cm. As empresas não adquirem máquinas maiores devido ao elevado preço, p/ex. segundo o representante ELMATEC da marca ENCAD (2002), uma impressora de 36" (91cm) de boca com resolução de 300x300 dpi custa no Brasil, cerca de oito mil dólares americanos, impressoras que só tem garantia se utilizados os materiais de consumo próprios.

Para as mídias de papel, o processo de produção em mosaicos é geralmente por serigrafia por ser mais econômico, desde que se realize um lote com muitas peças, já para pequenos lotes o processo de impressão torna-se mais atrativo.

Na serigrafia seu maior custo está no processo inicial de reprodução, a qual requer primeiro a realização da arte num fotolito de material vegetal especial, logo esta arte é transferida a uma tela (*silkscreen*) para gerar a matriz, com a matriz pronta pode-se então realizar a impressão propriamente dita das cópias a um menor custo. Quando a arte é colorida este processo deve ser realizado para cada cor a ser impressa.

Por outro lado, a utilização de impressoras que foram projetadas para produzir mídias que podem ser vistas a curtas distâncias (a menos de um metro) para imprimir mosaicos de mídias de formato extra-largo, é exagerada. Por exemplo, no caso de *outdoor*, onde a mídia é observada a uma distância de vários metros, um décimo da resolução disponível já seria suficiente (veja item, Imagem e resolução visual).

## **1.2 Soluções e processos existentes**

Para produzir estas artes maiores (p/ex. um *outdoor* de lona) e imprimi-las como peça única, são utilizadas impressoras de formato extra-largo, cuja impressão tem um custo ainda muito maior. No Brasil, estas impressoras são importadas por preços muito elevados, devido a uma situação de quase-monopólio no mercado mundial, p/ex. a impressora VUTEK 3360, de 3 m de boca, com resolução de 360 dpi, e velocidade de impressão de 52 m<sup>2</sup>/h (VUTEK, 2002), que utiliza tinta a base de

solvente num cabeçote piezo-elétrico, apresenta um custo de aquisição de meio milhão de dólares e custo de operação elevadíssimo.

As impressoras de formato extra-largo operam com resoluções maiores que 300x300 dpi e utilizam sistemas de 4, 6 ou 8 cores (CMYK; *Pantone Hexachrome*; CMYK, *plus light cyan, light magenta, light yellow e light black*, respectivamente). Possuem vários modos de impressão segundo a necessidade p/ex. fotográfico, qualidade ou alta velocidade (ENCAD, 2002).

O modo alta velocidade, nos modelos de 8 cores, incrementa a velocidade de impressão trocando o sistema para 4 cores, utilizando assim dois canais para cada cor, mas traz o problema de baixar a intensidade da cor da mídia, o que não acontece ao utilizar uma cor por canal. Para impressões que requerem uma maior resolução (360 dpi) são utilizados os modos de impressão de um canal por cor, estes modos proporcionam também uma maior quantidade de cores, o que os habilita a realizar impressões que podem ser vistas a distâncias muito próximas. Impressoras da marca ENCAD, oferecem uma boa flexibilidade ao manter dois conjuntos de tintas instalados ao mesmo tempo, uma para ambientes externos (tinta indelével) e outra para internos (solvente a base de água). Os cabeçotes de impressão em geral são piezo-elétricos. Adicionalmente estas impressoras têm um cortador de mídia que é acionado automaticamente quando requerido.

As impressoras de formato extra-largo, geralmente são operadas em modos de “alta velocidade” a fim de reduzir o tempo de impressão e poder amortizar o elevadíssimo investimento que estas impressoras representam, sendo que ainda, com o mesmo intuito de amortização a impressora é operada 24 h, com suporte técnico permanente, corpo de vendas trabalhando em turnos, etc.

Além disto, algumas impressoras exigem uma instalação inicial sofisticada, o que geralmente toma um tempo considerável. A garantia da impressora é válida só se forem utilizados os insumos aprovados pelo fabricante e realizadas as manutenções indicadas, e por pessoal autorizado, o que em seu conjunto aumenta enormemente o custo operacional da máquina, sem considerar que o usuário daí se encontra fortemente dependente do representante.

Entre as diversas características destas impressoras observa-se que possuem propriedades de impressão de mídias para serem observadas a distâncias menores

a 1 m (elevada resolução, vários sistemas de cores, etc.), características e funções especiais, que em seu conjunto elevam seu preço, por outro lado, estas impressoras mesmo com seu alto custo, só permitem impressão sobre filmes (papel, plástico, lona, etc) que posteriormente precisam ainda ser fixados sobre suportes tais como *outdoors*, placas, etc.

### **1.3 Projeto proposto**

O projeto proposto visará atender a produção de mídias de formato extra-largo com características apropriadas para serem observadas a vários metros de distância, possuirá uma concepção de "base vazada" (Fig. 57), isto é, imprimir através da base, de maneira que a impressão poderá ser realizada diretamente sobre uma superfície final rígida e plana que se mantém fixa. Esta característica de "base vazada" é uma necessidade sentida pelas empresas de comunicação visual, com esta característica o sistema poderá imprimir sobre superfícies tais como: pisos montados sob o sistema; placas fixas (tanque de combustível, baús de caminhão, fuselagem de aeronaves, etc.); chapas de aço (placas, *outdoor*, etc.); chapas plásticas de acrílico, policarbonatos, etc. ou sobre filmes flexíveis (papel, plástico, lona, etc).

O mercado a ser atendido são as micro e pequenas empresas de propaganda, impressão digital e comunicação visual que necessitam de impressoras de formato extra-largo (com boca >3m), que imprimam mídias com qualidade e durabilidade, que tenham menor custo de aquisição, que tenham assistência técnica local e permanente, que imprimam sobre todo tipo de mídias flexíveis ou rígidas, que utilizem todos os recursos atuais fornecidos pelos novos *softwares* gráficos (imagens de fundo, letras em 3D, desenhos complexos, etc.), que tenham velocidade de impressão próxima as existentes, e operem na faixa de resolução adequada para serem vistas a distâncias maiores que 6 m.

### **1.4 Requisitos de projeto**

Considerando as necessidades do mercado em impressão de formato extra-largo sentidas pelas micro e pequenas empresas do ramo, o sistema impressor proposto deverá ter as seguintes características:

- Uma área plana de trabalho de 3,5x9,0 m respectivamente, o tamanho padrão dos *Outdoors* é de 3x9m.
- Possibilidade de impressão sobre superfícies rígidas e flexíveis.
- Uma velocidade de impressão similar ou maior à velocidade das impressoras existentes no mercado, 52 m<sup>2</sup>/h.
- O eixo que movimentara o cabeçote impressor deve ter na resposta ao degrau um valor de sobre-passagem de no máximo 1%. Este valor de sobre-passagem permitirá que o cabeçote impressor entre no regime permanente mais rapidamente.
- Como o processo de impressão inicia-se quando o sistema entra no regime permanente é necessário que o cabeçote impressor esteja com velocidade constante durante 3,0 dos 3,5 metros do comprimento total. Como a largura do cabeçote impressor é de 0,22 m a distância de aceleração e desaceleração deverá ser de 0,28 m (8% do comprimento total).
- Com o objetivo de conseguir que o sistema impressor proposto atinja velocidades de impressão iguais ou superiores às das impressoras existentes, o eixo que movimentará longitudinalmente o conjunto impressor deve ter um tempo de aceleração de no máximo 10 % do tempo total utilizado pelo cabeçote impressor e um valor de sobre-passagem ao degrau de no máximo 15 %, este valor é menos rigoroso devido a que este eixo possui uma inércia maior.
- Para conseguir um movimento com velocidade constante nos dois eixos do sistema impressor deve ser implementado um sistema em malha fechada.
- Como a mídia impressa será colocada a distancias maiores ou iguais a 6 m, o diâmetro do ponto (resolução da impressão) deve ser só o necessário requerido para esta distância (veja item, Imagem e resolução visual). O valor deste diâmetro é aquele que quando impressos dois pontos o olho humano a uma determinada distância, só consegue enxergar um ponto.
- O sistema impressor proposto deve ter um erro de posicionamento entre pontos menor a 1/10 do diâmetro do ponto (erro de seguimento na resposta ao degrau), com um posicionamento nesta ordem de grandeza qualquer variação na impressão será imperceptível à vista humana.
- Considerando que o diâmetro do ponto realizado é o mínimo requerido para não observar os detalhes impressos, então este será ser o erro máximo de desalinhamento admitido entre duas linhas impressas nos extremos (3 metros).

### 1.5 Solução inovadora desenvolvida

Para o sistema impressor proposto funcionar de maneira adequada, um dos principais desafios é obter do computador a informação de impressão do gráfico a ser reproduzido, principalmente se o arquivo é do tipo "*bit map*" (gráfico formado a partir de um grupo de bits). Desta maneira a informação de impressão é o conjunto de dados sobre cada ponto (bit) que indica sua cor e sua posição x,y no desenho.

Para obter esta informação de impressão existem dois métodos que foram implementados neste projeto. Um método tradicional de **aquisição via software** onde se obtém a informação de impressão diretamente do arquivo a ser impresso (neste trabalho foi implementado só para arquivos em preto e branco), e um método inovador de **aquisição via hardware** que obtém a informação de impressão diretamente de uma impressora de mesa durante seu funcionamento.

O método via *hardware* obtém a informação de impressão através uma interface de aquisição que é conectada numa impressora comercial de mesa (no projeto chamada de impressora fonte, Fig. 60) e uma placa de portas digitais I/O de alta taxa de aquisição. Neste método para obter esta informação é necessário que paralelamente se realize uma pre-impressão na impressora fonte e se execute o programa de aquisição em tempo real para obter os dados requeridos.

Este método tem a vantagem de obter a informação de impressão sem a necessidade de realizar o complexo processamento que os *drives* das impressoras efetuam sobre uma imagem que é enviada a impressão. O processamento realizado é praticamente a transformação da ampla gama de cores existentes nos desenhos (true colors 32 bits) para as cores primárias existentes no cartucho de impressão (normalmente 3 cores primárias e o preto).

Entre outros benefícios deste método podem-se citar os seguintes:

- Todo aperfeiçoamento realizado pelos fabricantes de impressoras p/ex. maiores velocidades de impressão ou novos sistemas de cores implementados, será diretamente absorvido pelo método proposto sem precisar de nenhum trabalho extra.
- O método via *hardware* proposto fica independente de todo novo sistema operacional a ser utilizado, desde que só é necessário que a impressora fonte esteja

instalada e os novos *drives* (*software*) disponibilizados pelos fabricantes estejam funcionando corretamente para colocar a impressora em funcionamento.

Assim, pode-se verificar que a maior vantagem deste método é não ter a necessidade de realizar o desenvolvimento dos *drivers* (*software*) de processamento de imagens para impressão, já que este método utiliza os *drives* realizados pelos fabricantes. Assim não é necessário efetuar os altos investimentos requeridos para manter equipes especializadas e com ampla experiência trabalhando no aprimoramento e desenvolvimento destes programas.

## CAPÍTULO 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 Princípios de impressão

Os sistemas impressores podem se classificar segundo o **cabeçote de impressão**, forma de **movimentação do cabeçote** e **concepção estrutural**.

#### 2.1.1 Cabeçotes de impressão

##### **Cabeçote de impressão de caracteres fixos**

Os cabeçotes de impressão de caracteres fixos, produzem as letras e caracteres a partir de moldes fixos, característica que só lhes permite imprimir texto (WEBOPEDIA, 2004), p/ex. as impressoras margarida *daisy wheel*.

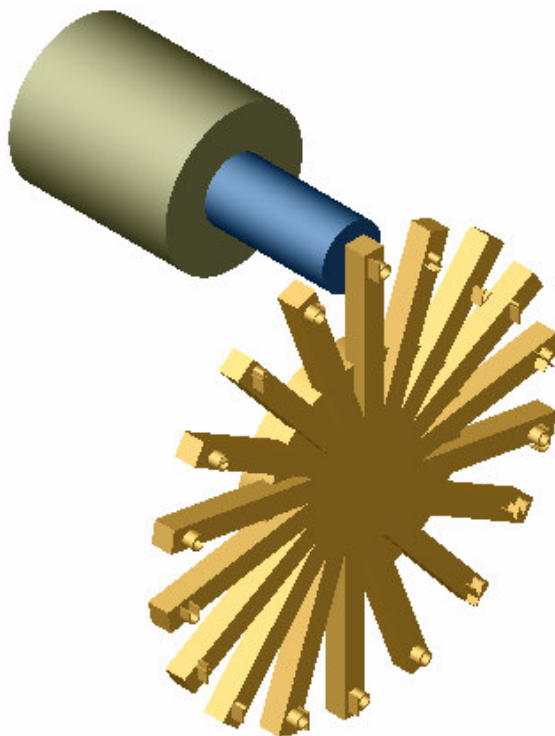


Fig. 2. Esquema do sistema de acionamento do cabeçote *daisy wheel*.

Com uma concepção similar, se encontra a denominada *print chain*, que é constituída de uma corrente com uma série caracteres em alto relevo, esta corrente circula entre a folha a ser impressa e uma série de martelos que são acionados quando o caractere requerido do texto a ser impresso se encontra em posição.



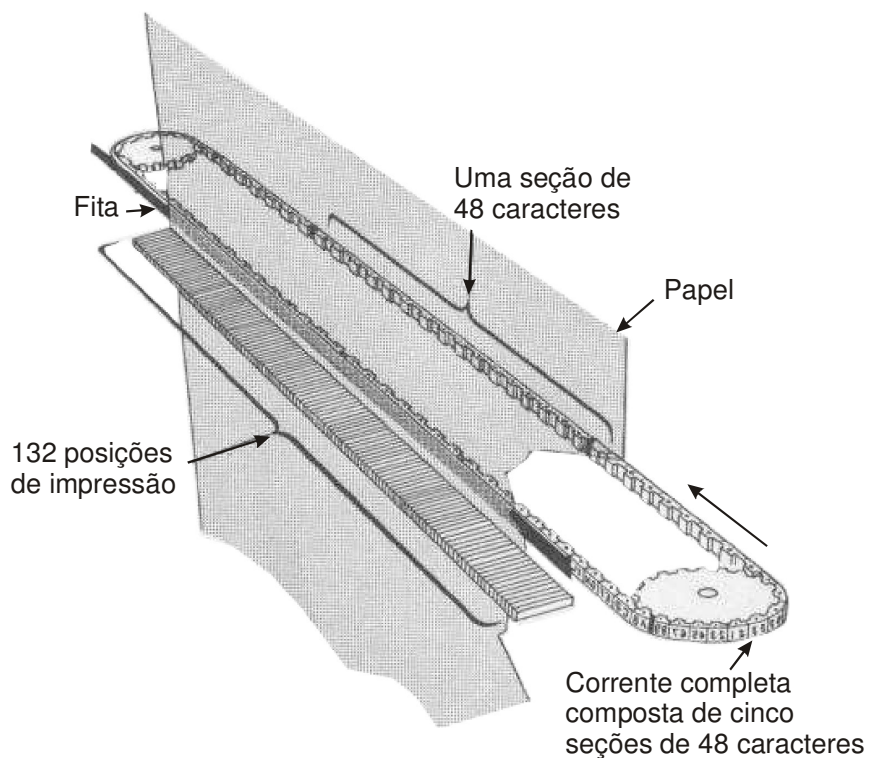


Fig. 3. Esquema do sistema de acionamento do cabeçote *print chain* (IBM, 1968).

### Cabeçotes de impressão de caracteres por composição

Estes cabeçotes produzem os caracteres a partir da composição de linhas contínuas (vetorial) ou mediante a composição de pontos (*raster*), característica que lhes permite imprimir gráficos e figuras.

A caneta de impressão da Fig. 4 mediante um movimento contínuo da mesma utiliza o princípio da composição de linhas contínuas para formar os caracteres e desenhos. Este tipo de impressão é denominada de impressão vetor.

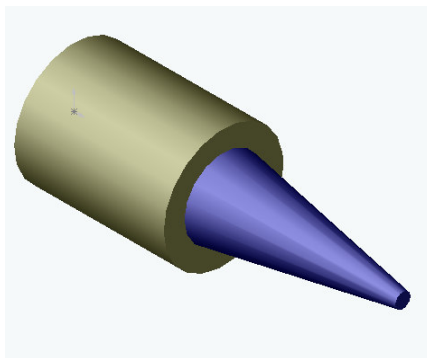


Fig. 4. Esquema da caneta para impressão vetor.

Já o cabeçote matricial da Fig. 5 utiliza o princípio da composição discreta de pontos para formar os caracteres e desenhos, este tipo de impressão é denominada de impressão *raster*.

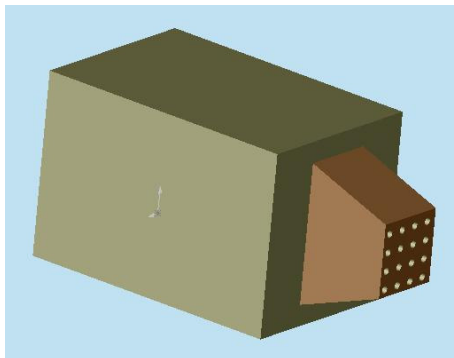


Fig. 5. Esquema do cabeçote matricial para impressão *raster*.

O cabeçote matricial é constituído de várias linhas de acionamento ou bicos (WEBOPEDIA, 2004). Este cabeçote possui diferentes tamanhos em função do número de bicos, pode ser do tamanho necessário para imprimir um caractere completo em um único acionamento, cabeçote típico das impressoras matriciais Fig. 6.

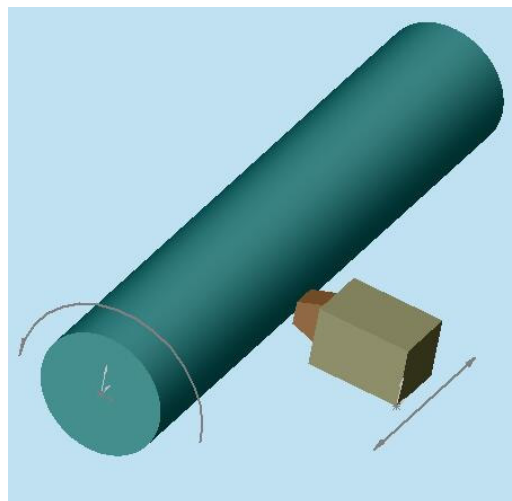


Fig. 6. Esquema do cabeçote impressor de caractere, *raster*.

Cabeçotes matriciais também podem ser concebidos para imprimir uma linha inteira em um mesmo instante de acionamento, se caracterizam por possuírem uma cadeia de agulhas em toda uma linha de maneira a imprimir uma fileira de um só impacto. Esta impressora de linha tem apenas o sistema de acionamento do rolo de papel como parte móvel, Fig. 7.

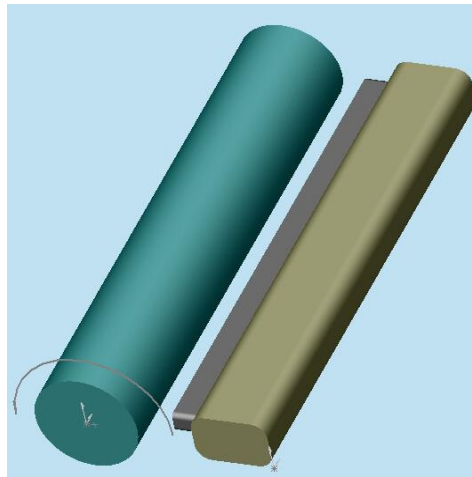


Fig. 7. Esquema do cabeçote impressor de linha, *raster*.

Entre os tipos de cabeçotes de impressão *raster* pode-se incluir o sistema de impressão a LASER, LCD & LED (como é o caso das fotocopiadoras), que imprimem uma página por vez como mostrado no esquema da Fig. 8.

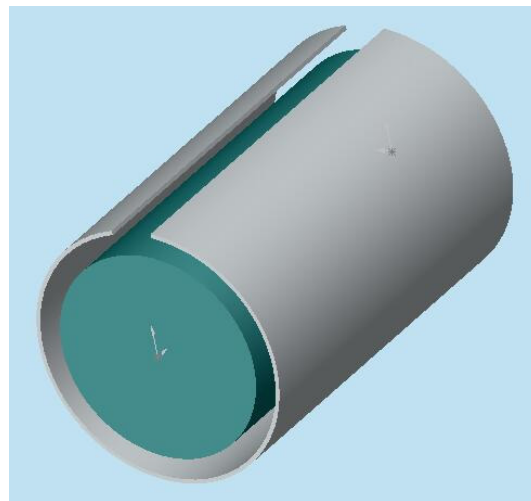


Fig. 8. Sistema impressor de página.

### 2.1.2 Tipos de movimentação do cabeçote

#### **Movimentação contínua**

Como apresentado no esquema da Fig. 9, uma movimentação contínua é caracterizada por um deslocamento ininterrupto do cabeçote de impressão. Para realizar este tipo de movimento é necessário o acionamento simultâneo do cabeçote impressor em duas coordenadas.

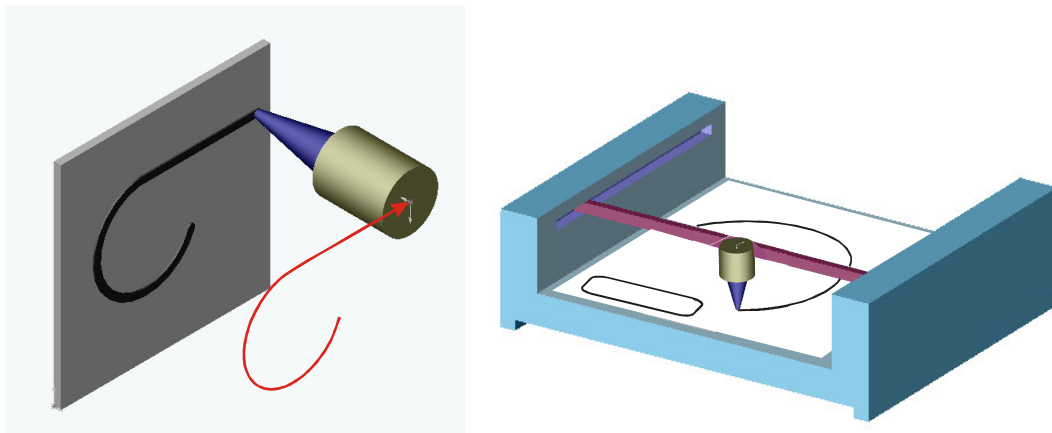


Fig. 9. Esquema de uma impressão vetor, realizando o desenho mediante um movimento contínuo do cabeçote de impressão.

### Movimentação seqüencial

Este tipo de movimento acontece seqüencialmente, primeiro o cabeçote impressor é posicionado numa coordenada e só quando este finaliza seu movimento é movimentado na segunda coordenada, repetindo este processo até que seja coberta toda a área de impressão. Este movimento é característico do cabeçote impressor *raster*, como apresentado no esquema da Fig. 10.

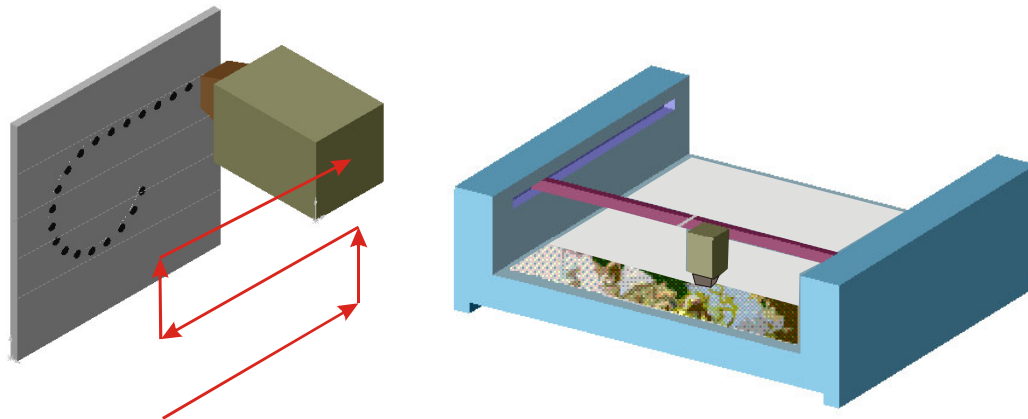


Fig. 10. Esquema de uma impressão *raster*, realizando o desenho a partir da impressão de pontos.

Uma das características da impressão vetor em relação à impressão *raster* é que a caneta de impressão (vetor) desenha uma linha contínua, enquanto o cabeçote matricial (*raster*) só pode simular a linha através da impressão de uma série de pontos justapostos.

### 2.1.3 Concepção estrutural

#### Rolo - cabeçote

Este tipo de estrutura apresenta um rolo que mediante seu movimento circular alimenta a mídia flexível a ser impressa Fig. 11 a), esta concepção estrutural é própria dos cabeçotes com movimentação seqüencial. A concepção da Fig. 11 b), apresenta o rolo que movimenta a mídia numa coordenada enquanto um segundo acionamento desloca o cabeçote impressor na segunda coordenada. Esta concepção utiliza ambos os tipos de movimento do cabeçote impressor (contínua e seqüencial).

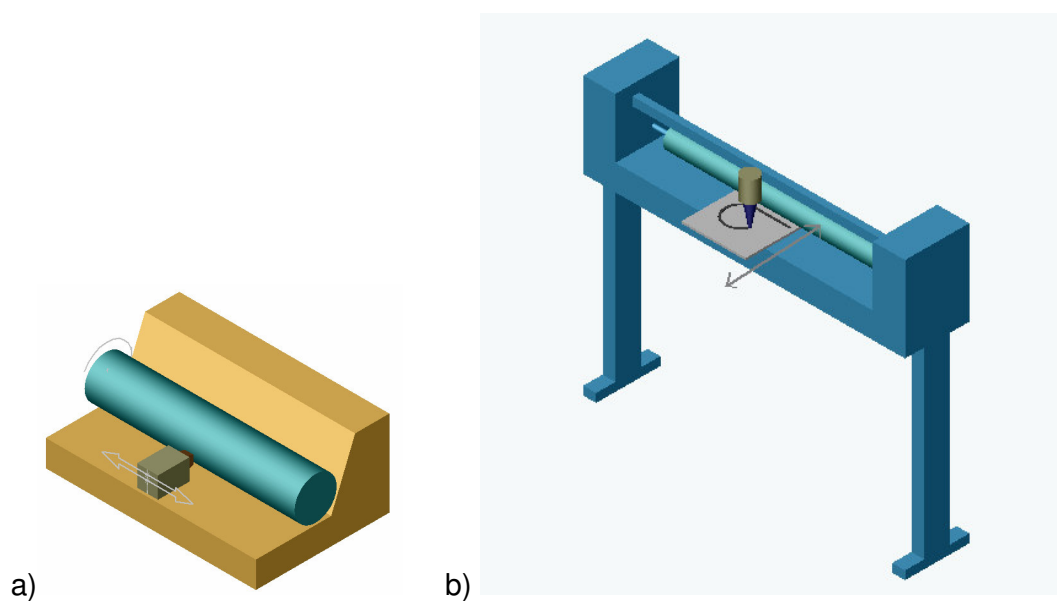


Fig. 11. Concepção de estrutura mecânica clássica rolo cabeçote. a) Estrutura própria para os cabeçotes de movimentação seqüencial. b) Para cabeçotes com ambos os tipos de movimento, contínua e seqüencial.

#### Pórtico X-Y

Nesta concepção estrutural a mídia a ser impressa se encontra fixa na base do sistema e o cabeçote impressor se movimenta em ambas as coordenadas Fig. 12, nesta concepção o tamanho da mídia está limitada à área do pórtico. Da mesma maneira que o projeto rolo - cabeçote, este sistema utiliza ambos os tipos de movimento do cabeçote impressor (contínua e seqüencial). Este projeto estrutural como pode ser observado na Fig. 12, tem como vantagem a possibilidade de imprimir mídias flexíveis e rígidas.

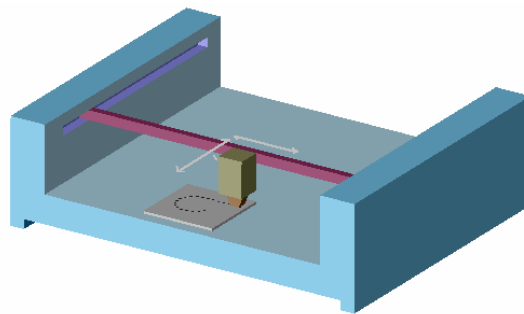


Fig. 12. Concepção de estrutura mecânica do tipo pórtico X-Y.

#### 2.1.4 Tabela comparativa

Tabela 1. Resumo dos princípios de impressão.

Tipos de cabeçote de impressão	- Caractere fixo: margarida, esfera, <i>daisy chain</i> - Caractere por composição: caneta de impressão, cabeçote matricial
Movimentação do cabeçote	- Movimentação contínua para impressão vetor - Movimentação sequencial para impressão <i>raster</i>
Concepção estrutural	- Rolo cabeçote - Portico X-Y

## 2.2 Impressoras comerciais

A seguir serão apresentados alguns sistemas impressores comerciais que implementam combinações da classificação acima realizada (WEBOPEDIA, 2004).

### 2.2.1 Plotters

Os chamados *plotters* Fig. 13, se caracterizam por utilizar como cabeçotes de impressão as canetas de impressão e deslocar o cabeçote mediante uma movimentação contínua, podem ser do tipo rolo - cabeçote ou pórtico X-Y, esquemas Fig. 11 b) e Fig. 12.



Fig. 13. Vista de um *plotter* utilizando a concepção pórtico X-Y.

A caneta de impressão dos *plotters* pode ser preta ou colorida. Existem também os *foto-plotters* onde a caneta de impressão é substituída por uma fonte de luz. Este dispositivo gera as imagens fotograficamente controlando a intensidade da luz que incide diretamente sobre um material sensível à luminosidade, transparente ou não, podendo gerar negativos ou positivos. É freqüentemente utilizado para gerar fotolitos de circuitos impressos.

Atualmente os *foto-plotters* utilizam o princípio de funcionamento da impressão *raster*. Mediante um LASER formam a imagem incidindo um ou mais raios sobre o material sensível à luz a altas freqüências (na ordem dos megahertz). Nos modelos antigos, o LASER mais comumente utilizado era o Argon-Ion verde junto com Helium-Neon vermelho, entre outros. Os modelos mais recentes utilizam matrizes de LED's para gerar as imagens (WIKIPEDIA, 2004).

### 2.2.2 Impressora margarida (*daisy wheel*) e de esfera (*golf ball*)

São impressoras que operam com os cabeçotes de impressão de caracteres fixos, podem ser do tipo esfera ou margarita (*daisy wheel*, disco de plástico ou metal em forma de pétalas) em cujos extremos estão os caracteres em alto relevo Fig. 14.

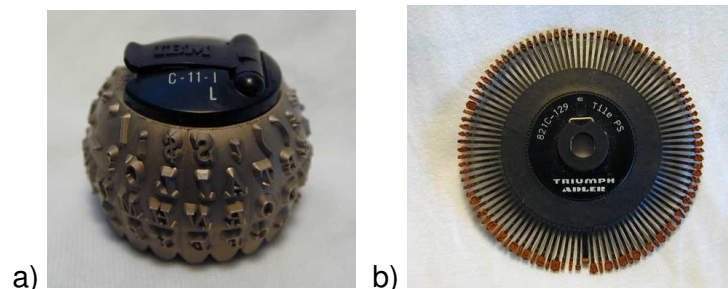


Fig. 14. Fotografias dos cabeçotes, a) Esfera *golf ball* da IBM. b) Disco *daisy wheel* (COMPUTER MUSEUM TONH, 2003).

No caso do cabeçote de disco, um sistema tipo martelo operado por um único solenóide golpeia as pétalas contra uma fita entintada a qual incide sobre o papel, imprimindo assim um caractere de cada vez.

As impressoras que utilizam o cabeçote de disco são mais rápidas que as de esfera devido a que, para posicionar o caractere requerido o cabeçote de disco realiza um só movimento (giro), já o cabeçote de esfera tem que realizar dois movimentos (um giro em torno ao seu eixo e outro em torno a um eixo perpendicular ao anterior) o que diminui a velocidade de impressão.

Ambos os cabeçotes realizam uma impressão de alta qualidade (carta), pode-se intercambiar o disco ou esfera para imprimir com outras fontes. Já foram utilizadas para imprimir figuras a partir da composição de caracteres, mas com uma apresentação muito particular.

Devido aos martelos estas impressoras são muito ruidosas e além disto são também lentas, imprimindo no máximo de 10 a 75 cps (WEBOPEDIA, 2004). Com a chegada das impressoras a LASER e jato de tinta para uso doméstico a preços competitivos em relação às matriciais e margarida, estas últimas tornaram-se obsoletas.

### 2.2.3 Impressora matricial

Esta impressora realiza a impressão denominada *raster* utilizando um cabeçote matricial. Utiliza o princípio de movimentação seqüencial e pode utilizar os dois tipos de concepção estrutural, rolo-cabeçote ou pórtico X-Y.

Os cabeçotes impressores são constituídos de solenóides que atuam sobre agulhas as quais são golpeadas contra uma fita de tinta, para cada acionamento da agulha se faz um ponto. Estas não possuem uma alta qualidade de apresentação. Porém, podem imprimir os documentos com cópia-carbono, impossível com as impressoras a LASER e jato de tinta.

A velocidade de impressão pode variar entre 50 a mais de 500 cps dependendo da qualidade desejada. A qualidade depende do número de agulhas, podendo variar entre 9 a 24 agulhas.

### 2.2.4 Impressora matricial de linha

Com um princípio de funcionamento similar à anterior, também de impacto, a principal característica desta impressora é o cabeçote impressor de linha utilizado. Estas impressoras são barulhentas e produzem uma qualidade de impressão muito baixa, na época dos anos 70 e 80 (COLUMBIA UNIVERSITY COMPUTING HISTORY, 2004) foram amplamente utilizadas para imprimir programas de computador a uma rapidez de impressão de 240 linhas por minuto.

### 2.2.5 Impressora a jato de tinta

É um tipo de impressora que utiliza o cabeçote impressor matricial, cabeçote que trabalha ejetando tinta em direção do papel para formar os pontos de impressão.



Impressoras de jato de tinta são capazes de produzir uma qualidade similar às impressoras a LASER, isto é resoluções de 300x300 dpi, embora alguns modelos ofereçam resoluções maiores (HP INVENT, 2003). Em geral, o preço das impressoras jato de tinta é menor que o de impressoras a LASER similares e requerem um tipo especial de tinta.

#### 2.2.6 Impressora a LASER, LCD & LED)

Neste tipo de impressoras, o cabeçote impressor é constituído de um cilindro e um sistema de luz LASER. O processo de impressão se inicia quando a luz do LASER mediante uma impressão *raster* incide a superfície do cilindro alterando sua carga elétrica nos pontos de incidência, nestes pontos, o toner se fixa quando o cilindro é rolado sobre o reservatório de tonalizador, finalmente estes pontos de toner sobre o cilindro com a distribuição da imagem a ser impressa é transferido ao papel por uma combinação de calor e pressão. Como estas impressoras são de não-impacto, acabam sendo muito silenciosas comparadas às outras impressoras.

Como uma página inteira é transmitida ao tambor, impressoras a LASER são também chamadas de impressoras de páginas (Fig. 8). Uma das principais características é sua resolução, que varia de 300 dpi como mínimo a 1.200 dpi, mas algumas impressoras alcançam resoluções ainda maiores chegando a qualidade fotográfica (WEBOPEDIA, 2004).

Além do padrão monocromático das impressoras a LASER que utilizam um único tonalizador, existem as impressoras que utilizam tonalizadores de 4 cores para impressão colorida.

Para imprimir textos é necessário que os tipos de letras estejam disponíveis na impressora, normalmente vem instalados um jogo básico, chamadas fontes internas ou residentes, mas podem-se adicionar outras a partir de memórias ROM ou incrementando a memória RAM da impressora para carregar novas fontes a partir do computador.

As impressoras a LASER são muito adequadas para imprimirem gráficos. Porém, para imprimir um gráfico com alta resolução é necessário dispor de memória suficiente na impressora. Para imprimir uma página com um gráfico a 300 dpi, por exemplo, necessita 1 MB (megabyte) de memória RAM. Para um gráfico com

resolução de 600 dpi necessita pelo menos de 4 MB de memória. Atualmente estas impressoras vêm com 16 MB de memória *standard* (expansível a 80 MB) e resoluções de 1200 dpi (HP INVENT, 2003). As velocidades de impressão variam entre 10 a 50 páginas de texto por minuto (ppm)

Há outros dois tipos de impressoras que estão incluídas na categoria das impressoras a LASER, embora não utilizem o LASER e sim LCD & LED. A única diferença é que para realizar a carga elétrica sobre o cilindro utilizam uma matriz de LED's ou LCD (WEBOPEDIA, 2004). Uma vez com o cilindro carregado eletricamente, o processo de impressão é semelhante às impressoras a LASER.

### 2.2.7 Impressora de transferência térmica

As impressoras térmicas são aquelas que utilizam o calor para transferir uma imagem à mídia. Há dois tipos de impressoras térmicas:

Por **transferência térmica** de cera. Nesta impressora a tinta que se adere no papel é à base de cera. O cabeçote térmico da impressora derrete a tinta à base de cera da fita de transferência sobre o papel. Quando esfriado, a cera fica permanente. Este tipo de impressora térmica utiliza uma "lâmina" de transferência para cada página a ser impressa, ainda que esta só tenha um caractere a ser impresso, e não pode ser reutilizada.

Impressoras monocromáticas tem uma "lâmina" preta para cada folha a ser impressa, enquanto impressoras a cores tem um dos dois sistemas (CMY ou CMYK, veja item "Modelos de cores" no sub-capítulo "2.4.2 A cor do objeto") de "lâminas de cores" para cada folha. Estas impressoras trabalham mediante a impressão *raster*, formam as imagens por pontos com uma boa qualidade, existem com resoluções padrão de 203 a 300 dpi, e as mais aprimoradas com 600 dpi. A maior vantagem destas impressoras é que não exigem mídia especial e são muito rápidas.

Estas impressoras especiais são utilizadas principalmente para imprimir etiquetas de rótulos de CD, DVD, embalagens, etc. Um exemplo poderia ser o da impressora Zebra 2746e que imprime etiquetas de 11,4 cm de largura a uma velocidade de 152 mm por segundo (ZEBRA, 2003).

Por **corrente térmica direta**. Neste caso se tem uma impressora barata, que trabalha empurrando agulhas quentes contra um papel sensível ao calor. Estas impressoras são extensamente usadas em calculadoras com papel e FAX's.

### 2.2.8 Tabela comparativa dos modelos de impressoras comerciais

Tabela 2. Resumo dos modelos de impressoras comerciais.

<b>Tipo</b>	<b>Tecnologia de impressão</b>	<b>Velocidade de impressão</b>	<b>Resolução dpi</b>
<i>Plotter</i>	Linha contínua	--	--
Esfera e margarida	Impacto sobre fita entintada	1,7 ppm	--
Matricial de caractere	Impacto sobre fita entintada	9 ppm	20 dpi
Matricial de linha	Impacto sobre fita entintada	22 ppm	20 dpi
Jato de tinta	Jato de tinta	8 to 26 ppm preto, 8 to 22 ppm colorido	300 a 600 dpi as melhores até 1200 x 600 dpi
LASER	Transferência de toner	50 ppm	300 a 1200
Impressoras de transferência térmica	Transferência de cera	152 mm linear por segundo	300

### 2.3 Dispositivos de impressão *raster* a jato de tinta

A tecnologia jato de tinta pode se classificar em processos de alta resolução (maior ou igual a 300 dpi) e os processos de baixa resolução (até 50 dpi).

#### 2.3.1 Dispositivo impressor piezo-elétrico

Este cabeçote trabalha acionado pela corrente enviada ao cristal piezo-elétrico o qual se expande ejetando a tinta para fora Fig. 15, sendo novamente o depósito

carregado de tinta no seu movimento de retorno. O cabeçote piezo-elétrico realiza impressões de alta resolução.

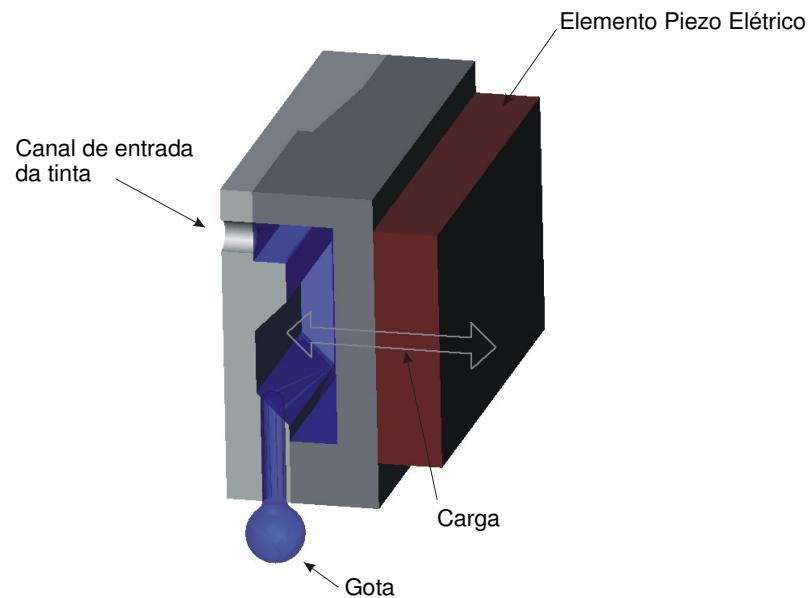


Fig. 15. Processo de funcionamento dos cabeçotes piezo-elétricos.

### 2.3.2 Dispositivo impressor térmico

Este cabeçote aquece gotas de tinta a alta frequência, como isto é muito rápido e difícil de imaginar, a Fig. 16 mostra a seqüência do processo (LALANDE, 2000).

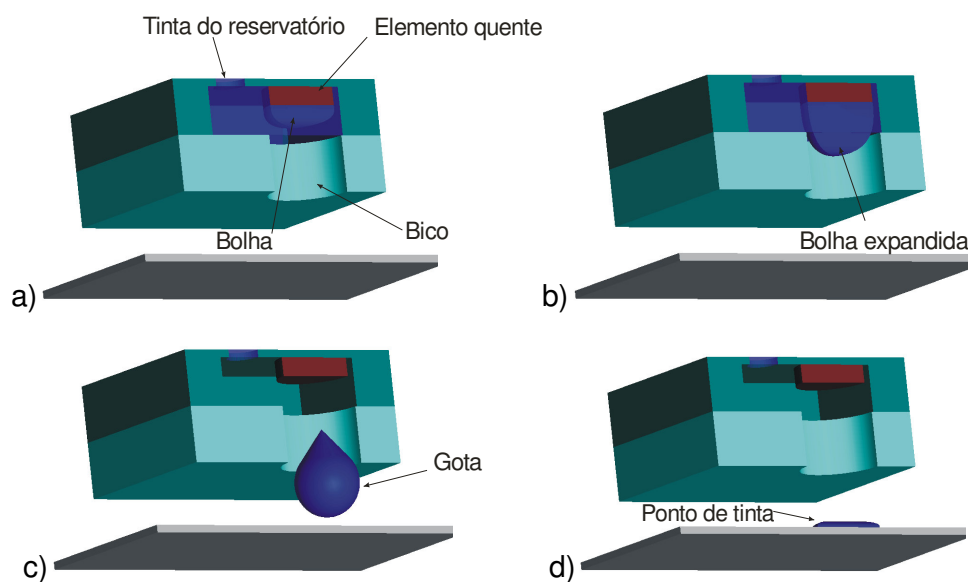


Fig. 16. Processo de funcionamento dos cabeçotes térmicos.

Depois de enchido o bico com a tinta Fig. 16 a), o elemento quente aquece a tinta, produzindo uma bolha que se expande até seu tamanho máximo Fig. 16 b), quando a bolha “estoura” surge a força para ejetar a tinta para fora do bico, formando uma gotinha como mostrada na Fig. 16 c). Depois de ejetada a gota, o bico torna a encher nova tinta para iniciar o processo novamente Fig. 16 d). O cabeçote térmico realiza impressões de alta resolução.

### 2.3.3 Micro-máquina de fluxo contínuo de tinta

Esta micro-máquina permite altíssima resolução (1200 dpi). O cabeçote de impressão é constituído por uma matriz de bicos, uma matriz de eletrodos de carga, uma matriz de eletrodos de deflexão e finalmente uma matriz de parede de desvio de tinta. O processo de funcionamento de um bico do cabeçote de fluxo contínuo é apresentado na Fig. 17.

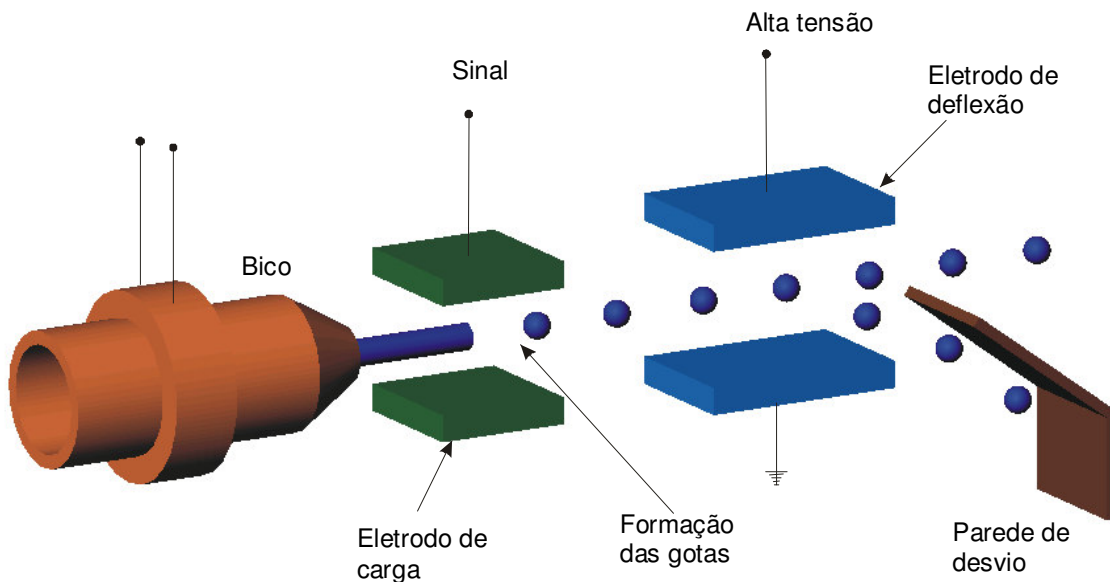


Fig. 17. Processo de funcionamento dos cabeçotes de fluxo contínuo de tinta.

O bico é constituído de um transdutor que, mediante uma agitação ultra-sônica, produz um fluxo contínuo de tinta, este fluxo é cortado mediante o eletrodo de carga produzindo uma série contínua de gotas, os eletrodos de deflexão tem a função de direcionar as gotas para o furo de saída ou para a parede de desvio segundo seja necessário (DIEPOLD, 1997). As gotas que são direcionadas para as paredes de desvio são novamente canalizadas ao recipiente principal de tinta.

Existem cabeçotes de impressão constituídos de um só bico utilizando o mesmo princípio. Estes cabeçotes apresentam um par a mais de eletrodos defletores Fig. 18, desta maneira podem direcionar a gota para qualquer posição X Y do plano de impressão. Este módulo funciona da mesma maneira que a deflexão do feixe de elétrons num tubo de raios catódicos de um osciloscópio, para apresentar a imagem na tela.

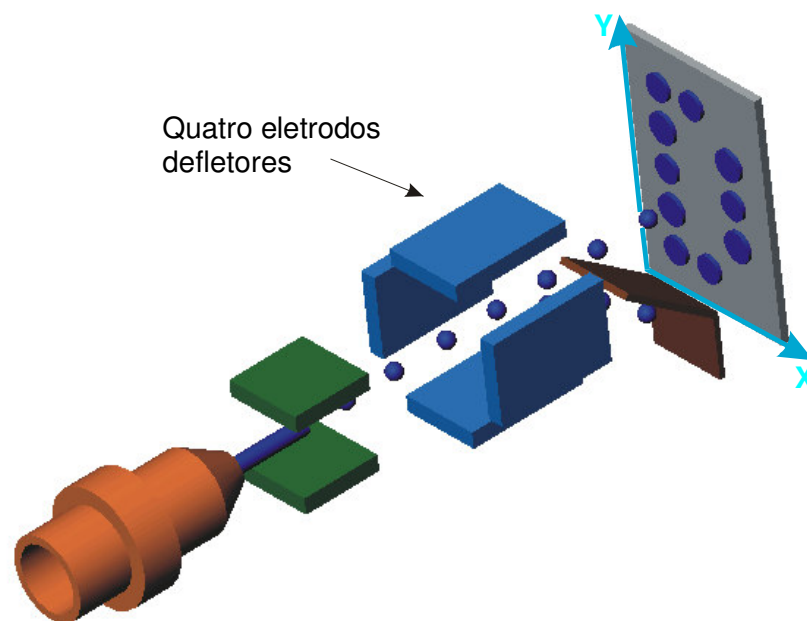


Fig. 18. Adaptação de um bico do “cabeçote de fluxo contínuo” para funcionar como cabeçote de impressão.

#### 2.3.4 Válvula integrada (I.V.)

Processo de impressão de baixa resolução, segundo o manual (DIAGRAPH, 2003) realiza pontos de até 24 dpi. Este sistema utiliza potentes solenóides para formação das gotas de tinta, dependendo da pressão que atua sobre o pistão, consegue controlar o diâmetro de cada gota permitindo uma maior definição da impressão e uma máxima economia de tinta.

O solenóide atua sobre o pistão que se encontra em contato com uma membrana de borracha (membrana que isola os mecanismos internos da tinta). Quando o solenóide é energizado, a tinta que se encontra no orifício é expelida formando a gota, Fig. 19. A tinta circula de forma totalmente independente das demais partes componentes do módulo, incluindo a eletrônica, resultando em maior vida útil e confiabilidade.

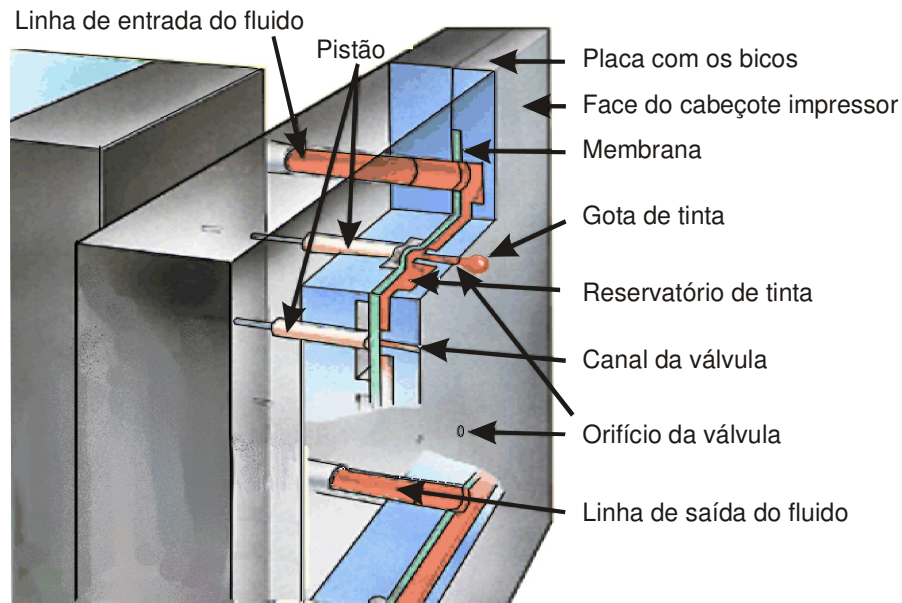


Fig. 19. Componentes da válvula integrada (DIAGRAPH, 2003).

### 2.3.5 Válvula-solenóide com tinta sob pressão

Este dispositivo impressor denominado válvula solenóide com tinta sob pressão funciona de maneira similar à válvula integrada (I.V.), mas neste caso, a gota é formada pelo movimento do eixo do solenóide que abre ou fecha a entrada da tinta. Este é um processo de impressão de baixa resolução, podendo-se obter até 15 dpi. O Cabeçote conta com sete micro válvulas que recebem a tinta de uma garrafa pressurizada, dispensando, assim o uso de ar comprimido, existe também a possibilidade de utilizar um reservatório maior (aproximadamente 20 litros) para alimentar o cabeçote.

Este dispositivo de impressão, como mostrado na Fig. 20, é formado por: um distribuidor / redutor de pressão que distribui a tinta para cada bico ejetor e baixa a pressão aos níveis de funcionamento do solenóide; um solenóide que tem a função de abrir ou fechar a passagem da tinta acionado mediante um sinal elétrico; e um bloco de 7 bicos ejetores alinhados num comprimento de 12 mm.

A velocidade de impressão de caracteres varia de 6 a 67 m/min (MARSH, 2003). Trabalha com tintas a base de água para superfícies absorventes (papel, papelão, madeira, etc.), como a base de álcool para superfícies não absorventes (plástico, vidro, metal, etc.). Não utiliza tintas a base de solventes como a acetona, já que o corpo e os bicos do solenóide são de PVC.

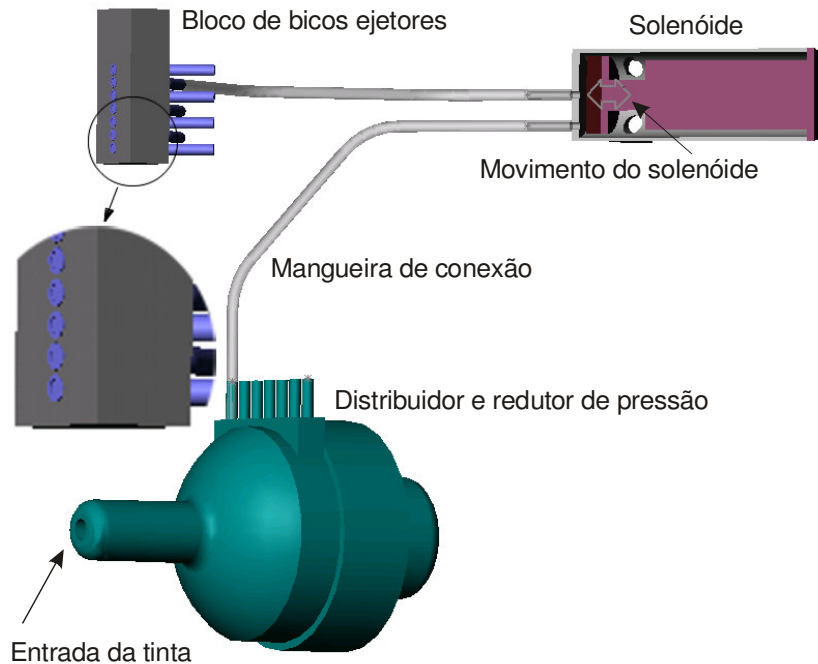


Fig. 20. Válvula solenóide com tinta sob pressão.

### 2.3.6 Aerógrafos adaptados para comando automático

Ainda se utiliza o processo convencional de pintura, que utiliza aerógrafo para confeccionar desenhos. A aerografia (como é denominada em português), é uma técnica de pintura que utiliza uma mini-pistola (aerógrafo) ligada a um compressor de ar para produzir jatos de tinta. Estes aerógrafos permitem realizar pontos e linhas contínuas de diferentes espessuras (podendo chegar até apenas 0,2 mm). As tintas utilizadas neste caso são desenvolvidas a base de acetona ou nitrocelulose (pintura automotiva) para suportar água, sol, raios ultra-violeta, contaminação, etc. permitindo pintar sobre uma ampla variedade de materiais laváveis, ou a base de água para ambientes internos.

Como apresentado na Fig. 21, existem dois tipos de aerógrafos quanto à mistura das tintas.

O aerógrafo de **mistura interna** é um tipo de pistola onde a pintura é atomizada dentro do bico do aerógrafo. A tinta e o ar se misturam dentro da pistola. Estes aerógrafos produzem um jato muito suave, a ponto de imitar a textura de fotografias, sendo hoje muito usados para acabamento fino.



Já o aerógrafo de **mistura externa** é um tipo de pistola onde a pintura é atomizada fora do bico do aerógrafo. A tinta e o ar se misturam fora da pistola. Aqui o resultado da pintura é mais grosseiro. Este aerógrafo é ideal para pulverizar grandes áreas e fundos.

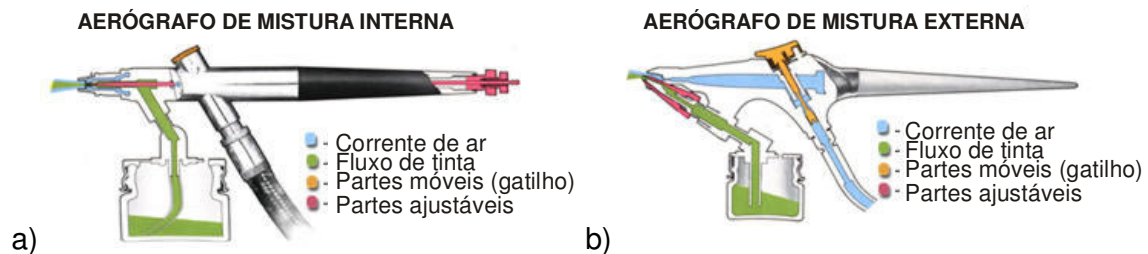


Fig. 21. a) Aerógrafo com mistura interna. b) Aerógrafo com mistura externa (AEROGRAFIA, 2004).

Os aerógrafos de mistura interna podem ser subdivididos de acordo com seu processo de ação em aerógrafos de dupla ação ou de ação simples. No aerógrafo de ação simples existe um gatilho que, quando apertado (único movimento possível), libera um jato de tinta de diâmetro pré-determinado, Fig. 22.

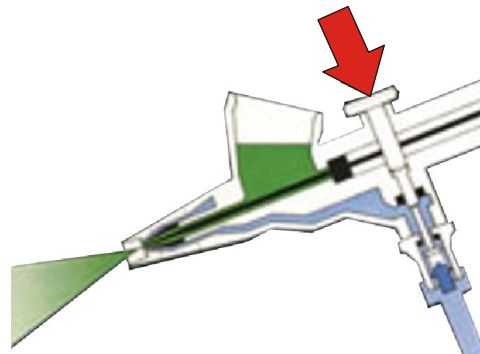


Fig. 22. Aerógrafo de ação simples (AEROGRAFIA, 2004).

Já no aerógrafo de dupla ação Fig. 23, o gatilho situado na parte superior do aerógrafo possui duas funções. A primeira função, quando apertado o gatilho abre a válvula que permite a saída do ar comprimido. A segunda função, à medida que se puxa o gatilho para trás (ainda mantendo-o apertado) é acionado o mecanismo que libera a saída da tinta e permite assim, controlar o diâmetro do jato. Quando o ar se mistura à tinta é formado o jato de tinta expelido pelo bico do aparelho como uma névoa que deve ser direcionada à base a ser pintada.

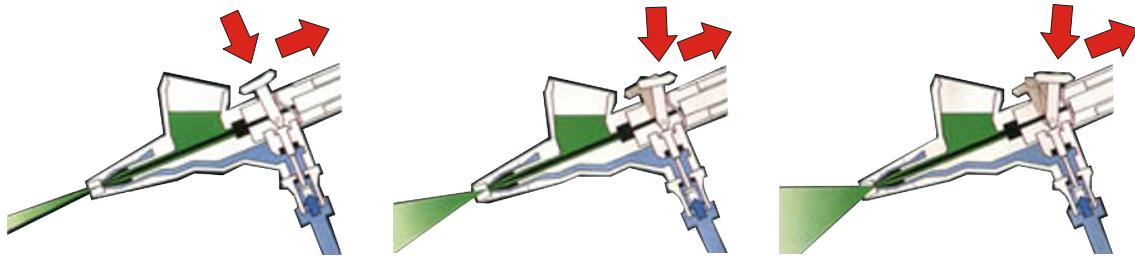


Fig. 23. Aerógrafo de dupla ação (AEROGRAFIA, 2004).

Para utilizar os aerógrafos como módulo ejetor da tinta no cabeçote de impressão, devem ser adaptados mecanismos que permitam seu funcionamento de forma automática, isto é, realizem um ponto de um determinado diâmetro ao receber um sinal elétrico de comando.

Existem duas maneiras de realizar este funcionamento:

- Através do **controle de tinta**, onde se adapta um módulo (solenóide) que aciona o mecanismo que libera a saída da tinta, mantendo-se o fluxo de ar constante.
- Através do **controle do ar**, onde se adiciona um módulo que controla a entrada de ar (eletro-válvula), mantendo-se o mecanismo que libera a saída da tinta, constante.

- **Adaptação do aerógrafo para controle de tinta**

O controle da saída da tinta num aerógrafo é realizado mediante o deslocamento da agulha (Fig. 24) que abre ou fecha o orifício de saída.

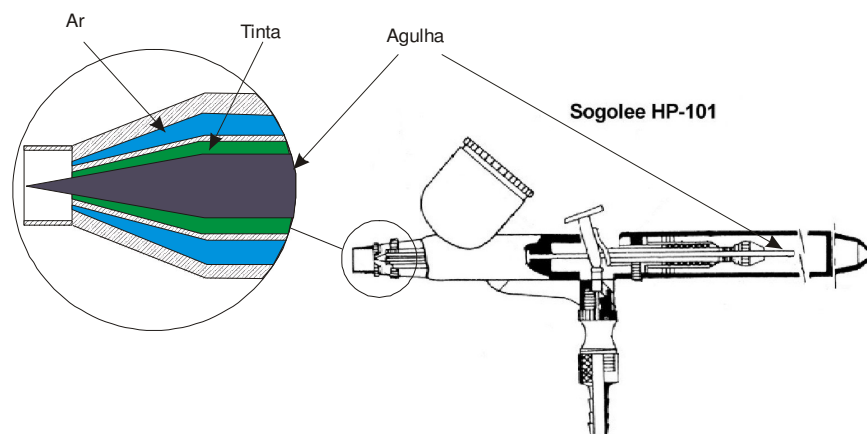


Fig. 24. Esquema do aerógrafo modelo HP-101 (SOGOLEE, 2001).

Para realizar este deslocamento de forma automática e em resposta a um sinal, é acoplado na parte posterior da agulha um mini solenóide, como mostra a Fig. 25.

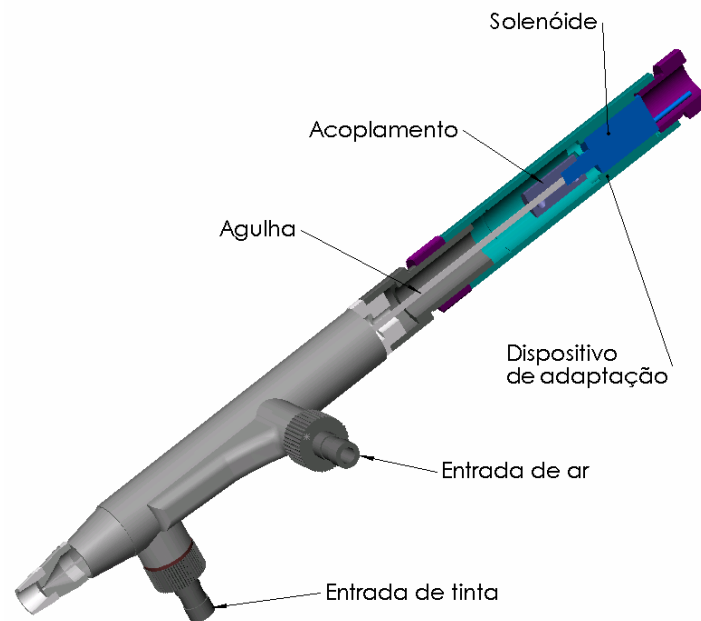


Fig. 25. Adaptação do solenóide para movimentar o mecanismo que libera a saída da tinta (agulha).

- **Adaptação do aerógrafo para controle do ar**

A utilização do aerógrafo com controle do ar é mais simples já que não necessita de nenhum dispositivo mecânico adicional. A adaptação é realizada instalando uma eletro-válvula na entrada do ar do aerógrafo, como se mostra na Fig. 26.

Nesta disposição, a posição da agulha determina o diâmetro do ponto. O jato de tinta para formar o ponto, é realizado ao acionar a eletro-válvula por um determinado tempo.

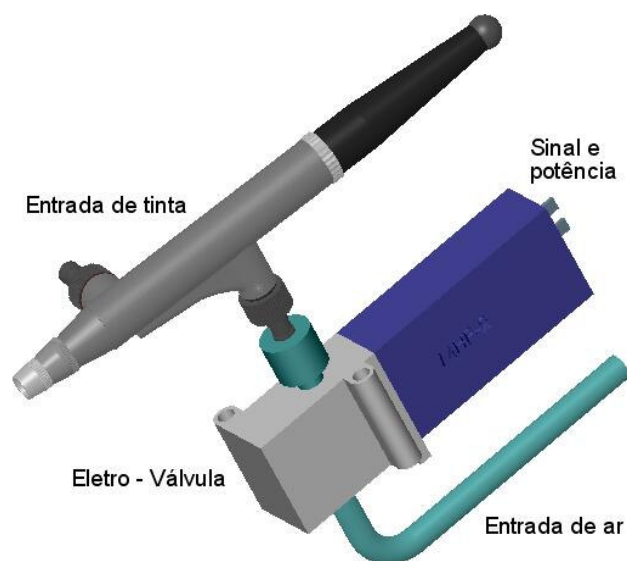


Fig. 26. Instalação da eletro-válvula para controle de ar no aerógrafo.

Para ensaiar o funcionamento do aerógrafo como bico ejetor utilizando os dois métodos de adaptação automática, foi construída no laboratório (GRUCON-LHW) uma bancada experimental de impressão (PIMENTEL, 2001).

### 2.3.7 Tabela comparativa dos dispositivos impressores a jato de tinta

Tabela 3. Resumo das características dos dispositivos impressores a jato de tinta.

<b>Tipo</b>	<b>Princípio de acionamento</b>	<b>Resolução dpi</b>
Dispositivo impressor piezo-elétrico	Mediante elemento Piezo-elétrico	300
Dispositivo impressor térmico	Mediante elemento de esquentamento	300
Micro-máquina de fluxo contínuo de tinta	Transdutor ultra-sônico	1200
Válvula integrada (I.V.)	Mediante solenóide	24
Válvula-solenóide com tinta sob-pressão	Mediante tinta sob-pressão	15
Aerógrafos adaptados para comando automático	Mediante ar comprimido	127

## 2.4 Teoria das cores, a visão e tecnologia de tintas

Como apresentado na Fig. 27, a sensação que se obtém com a avaliação visual de uma cor depende de três fatores fundamentais que são:

- A luz
- A cor do objeto
- A visão



Fig. 27. A avaliação visual de uma cor depende da luz, da cor do objeto e da visão do observador.

### 2.4.1 A luz

Segundo a teoria eletromagnética de Maxwell (WORDIQ, 2004) a luz se propaga pelo espaço na forma de uma onda eletromagnética seguindo uma lei harmônica. Esta onda eletromagnética é formada por dois campos: um elétrico (E) e outro magnético (M) que são perpendiculares entre si e ambos oscilam à direção de propagação da onda, Fig. 28. A velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo é a velocidade da luz ( $3 \times 10^8$  m/s).

O número de ciclos que passa por um ponto do espaço num determinado tempo define a frequência ( $\nu$ ) da radiação. A onda eletromagnética pode também ser caracterizada pelo comprimento de onda ( $\lambda$ ).

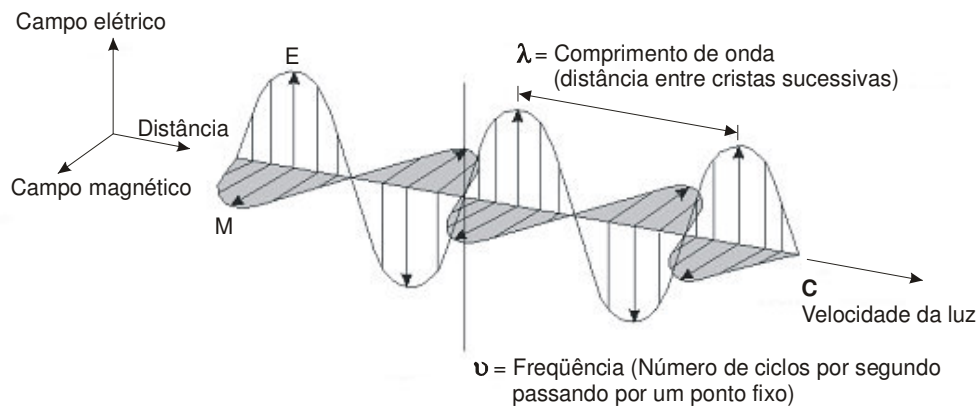


Fig. 28. Onda eletromagnética de propagação da luz (MOLECULAR EXPRESSIONS, 2002).

A radiação eletromagnética da luz excita o olho humano produzindo as sensações visuais. Como a luz se propaga em forma de ondas, o espectro visível se encontra em comprimentos que variam desde os 380 a 730 nm. Como a radiação visível entre 380 e 400 nm e entre 700 e 730 nm é desprezível se considera a faixa de 400 a 700 nm como o "espectro visível da luz" conforme apresentado na Fig. 29.

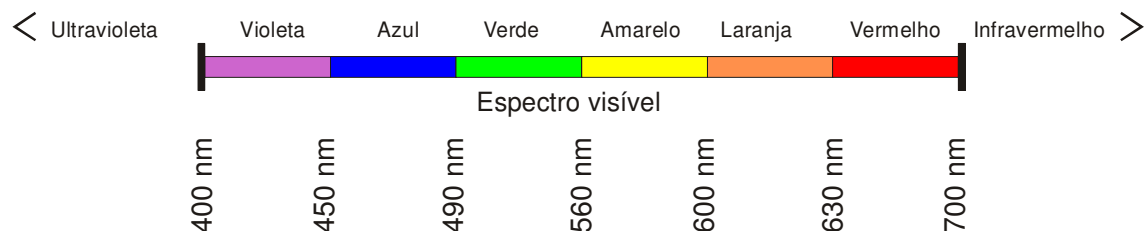


Fig. 29. Espectro visível da luz.

Entende-se a luz como a soma de ondas de distintos comprimentos. Este fenômeno foi descoberto por Isaac Newton em 1666, que observou que quando um feixe de luz branca ultrapassava por um prisma de cristal, dito feixe se dividia em um espectro de cores idêntico ao do arco íris, Fig. 30. Cada faixa de comprimento de onda da luz tem características particulares conhecida como cor e aproximadamente correspondem aos valores indicados na Fig. 30.

Assim, dependendo das características de uma fonte ela pode irradiar só alguns comprimentos de onda e carecer de outros, isto faz com que as cores dos objetos variem de acordo à luz com que esta sendo iluminado.

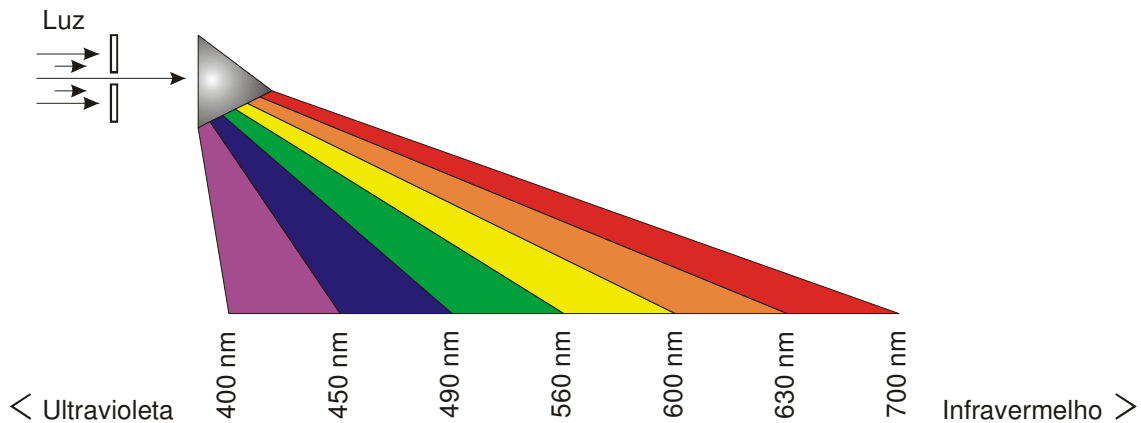


Fig. 30. Faixas de comprimentos de onda de cada cor.

#### 2.4.2 A cor do objeto

Considerando que, segundo Maxwell a luz se propaga em forma de onda eletromagnética divisível em diferentes faixas de comprimentos de onda (Fig. 30) e que toda superfície, exceto os meios transparentes, possui moléculas chamadas de pigmentos, que tem a faculdade de em maior ou menor medida, absorver e refletir determinadas ondas do espectro luminoso que incidem sobre ela (Fig. 31), a cor de um objeto pode ser definida de duas maneiras. Uma primeira como **cor própria ou cor pigmento** definida pelo seu poder de absorção da luz e uma segunda como **cor luminosa** composta pela composição espectral do feixe de luz refletida (INSTITUTO DE ARTES VISUALES, 2004).

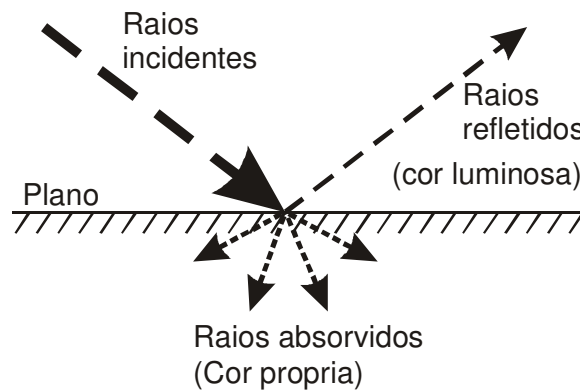


Fig. 31. Absorção de parte da luz que incide sobre uma superfície e reflexão do resto.

A parte refletida (cor luminosa) é normalmente conhecida como a cor do objeto. Por exemplo, vemos um objeto de cor vermelha porque, ao iluminá-lo, sua superfície absorve as ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda que vão do violeta ao laranja refletindo somente o vermelho. Se este mesmo objeto for iluminado com uma luz carente do componente vermelho não refletiria nada e o objeto se observaria preto.

### **Cores primárias**

A teoria das cores diz que por meio de cores básicas, ou primárias, qualquer cor pode ser formada. Dependendo da área de aplicação podem-se encontrar diferentes conjuntos de cores primárias (INSTITUTO DE ARTES VISUALES, 2004).

- O primeiro conjunto de primárias é o vermelho, verde e azul - RGB, conhecidas como **primárias aditivas**, se aplicam nos feixes de luz incidentes sobre o plano, Fig. 31 (cor própria). São os primários da luz e são utilizados no campo da ciência e tecnologia, como p/ex. na formação das imagens nos monitores de vídeo. A obtenção do resto das cores mediante superposição dos três primários se denomina **síntese aditiva**, se a superposição se realiza em proporções iguais se produz luz branca. Com este processo se obtém as cores secundárias: magenta (azul e vermelho), ciano (verde e azul) e amarelo (vermelho e verde). Como não se pode conseguir com estas primarias a cor elementar acromática, o preto, o conjunto de elementares aditivas está formado pelo preto, azul, verde e vermelho.



Fig. 32. Conjunto de cores primárias aditivas.

A síntese aditiva imita tecnologicamente o que faz o órgão da visão (ver também item "2.4.3 A visão"). Os bastões e cones do olho humano, estão organizados em grupos de três elementos sensíveis, cada um deles destinado a cada cor primária do espectro: azul, verde e vermelho da mesma maneira que numa tela de TV a cores. Quando se vê o vermelho é porque foi excitado o elemento sensível a este comprimento de onda. Ao se ver o amarelo é porque estão excitados ao mesmo tempo os elementos sensíveis do verde e do vermelho. As cores terciárias se obtêm mediante a adição de partes correspondentes das três fundamentais, sendo cada uma das somas de cores sempre mais luminosa que suas partes, o que explica que a mistura das três cores permite a obtenção do branco, que é por definição, a cor mais luminosa (cor luz).

- O segundo conjunto de primárias compõe-se de magenta, amarelo e ciano. Trata-se dos **primários subtrativos**, se aplicam nos feixes de luz refletidos sobre o plano, Fig. 31 (cor luminosa). Para este conjunto, obtém-se o resto das cores de impressão pela subtração de luz mediante filtros das primárias aditivas. A obtenção das cores mediante este processo se denomina **síntese subtrativa**, se os filtros de subtração atuam em partes iguais, impedindo a passagem das cores, se produz a ausência de cor o que resulta no preto. As quatro cores elementares subtrativas são o branco, amarelo, magenta e ciano.

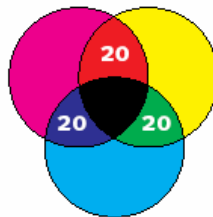


Fig. 33. Conjunto de cores primárias subtrativas.



Este conjunto de primários subtrativos são empregados principalmente nos cartuchos de impressoras e nas impressas.

A síntese subtrativa que é o efeito de três capas de filtros que combinam seus poderes de absorção relativamente ao branco, é o princípio de trabalho em fotografia a cores.

- Quando manipulamos cores na forma habitual não se utilizam luzes, e sim tintas, lápis ou marcadores. Neste caso se obtém as cores pela mistura de pigmentos, assim o terceiro conjunto de cores primárias é o utilizado pelos pintores, formado pelo vermelho, amarelo e azul, conhecidos como **pigmentos primários**. Quando da aplicação destes pigmentos sobre uma superfície a formação do resto das cores se realiza pelo processo de **síntese subtrativa** ao se misturar estes componentes. Neste conjunto de cores primárias é mais fácil prever a cor resultante, p/ex. o azul + amarelo originam o verde, o vermelho + amarelo originam o laranja. Uma mistura de partes iguais origina a ausência de cor: preto.



Fig. 34. Conjunto de cores primárias pigmento.

### Cores secundárias

As cores secundárias são aquelas originadas pela mistura de duas cores de qualquer um dos três conjuntos primários. A Fig. 35 apresenta por exemplo o conjunto de primárias pigmento e seu respectivo conjunto de secundárias.

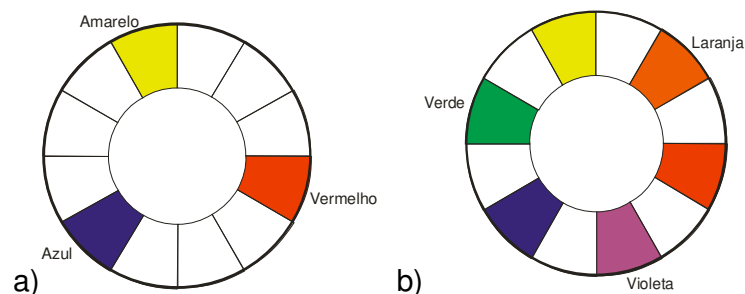


Fig. 35. a) Cores primárias pigmento. b) Cores secundárias pigmento.

### Cores terciárias

As cores terciárias se conseguem misturando uma cor primária com uma cor secundária correspondente, isto é, que a contenha. Por exemplo para cor pigmento, a combinação de amarelo (cor primária) com laranja (cor secundária) resulta um amarelo alaranjado, já misturando-se o vermelho (cor primária) com o laranja (cor secundária), chega-se ao vermelho alaranjado Fig. 36.

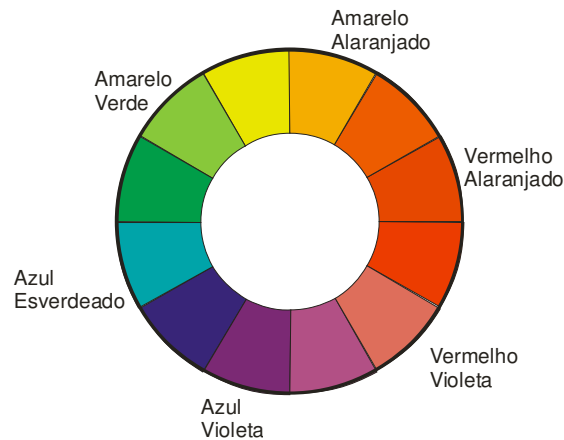


Fig. 36. Cores terciárias da cor pigmento.

A partir desta combinação de cores podemos definir o "círculo cromático" como aquele constituído pelo conjunto de cores que compõem o espectro visível da luz, Fig. 37.



Fig. 37. O círculo cromático.

### Cores complementares

São aquelas que estão em oposição no círculo cromático. Uma cor primária sempre tem uma cor secundária como complementar. A cor complementar do azul (cor primária) é o laranja (cor secundária). Cores análogas: são as que estão lado a lado no círculo cromático.

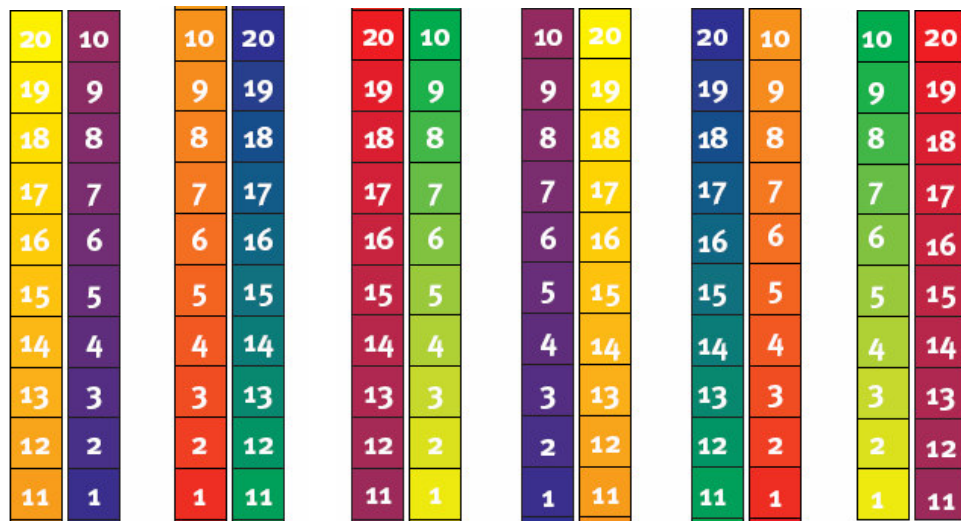


Fig. 38. Cores complementares.

**Propriedades de uma superfície**

**Tonalidade ou matiz:** Esta característica é resultante da proporção das cores componentes ou das agregadas. O Matiz, está relacionado com uma faixa de comprimento de onda da sua radiação. Matiz é a propriedade de uma cor que permite classificá-la por seu nome (Por exemplo, azul, verde e vermelho são todos matizes). A tonalidade é a qualidade de claro ou escuro. Por exemplo, o verde azulado e o verde amarelado são diferentes tonalidades do verde.



Fig. 39. Tonalidade do verde.

**Saturação (Chroma, intensity, vividness):** Como apresentado na Fig. 40, a saturação representa a pureza da cor, uma cor é pura quando está livre do cinza. Uma cor pode saturar ao branco até virar branco ou saturar ao preto até virar preto.

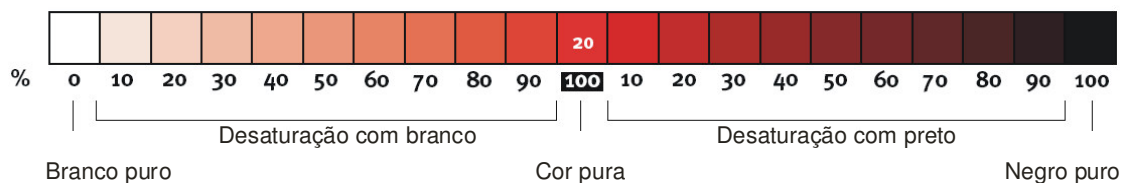


Fig. 40. Saturação da cor.

**Iluminação ou brilho (*Luminance, brightness, light*):** A iluminação é o aparente nível de luz emitida ou refletida por um objeto. A quantidade de brilho de uma imagem é medida a partir do escuro do preto ao brilhoso do branco. Alude à claridade ou obscuridade de um tom.

Como apresentado na Fig. 41, a luminosidade também tem a ver com a intensidade ou nível de energia, as cores que tem um valor mais luminoso, estão ao médio do espectro visível, vão desde o verde passando pelo amarelo chegando ao laranja e conseguem as melhores variantes claras, já as que tem um valor normalmente menos luminoso, estão aos extremos do espectro visível, vão do vermelho passando pelo violeta e chegando ao azul e oferecem as melhores variantes obscuras.



Fig. 41. Luminância das cores.

Em 1950 o Prof. Albert Münsell desenvolveu um sistema Fig. 42, mediante o qual localiza em forma precisa as cores num espaço tridimensional utilizando estes três atributos definidos para cada cor (modelo HSB, item "Modelos de cores" no sub-capítulo "2.4.2 A cor do objeto").

O matiz, a saturação e o brilho podem ser variados independentemente de maneira tal que absolutamente todas as cores podem ser localizados num espaço tridimensional. As cores neutras se localizam ao longo da linha vertical, chamada de eixo neutral com o preto na parte inferior, o branco na superior e a escala de cinza no meio. Os matizes se mostram em vários ângulos ao redor do eixo neutral. A escala de saturação com o branco é perpendicular ao eixo, localizando no extremo a cor pura.

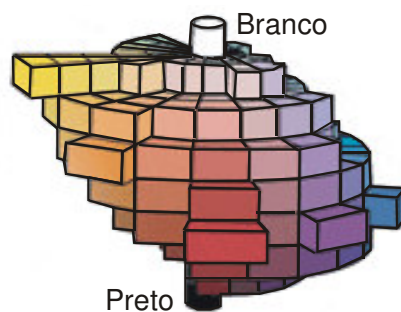


Fig. 42. Espaço de cor tridimensional Münsell (SINTEPLAST, 2004).

**Contraste:** A diferença de tonalidade entre as áreas escuras e claras de uma imagem. Valores de contraste maiores indicam maior diferença e menor gradação entre escuro e claro.

**Gama de cores:** A faixa de cores que podem ser reproduzidas ou percebidas por qualquer dispositivo. Por exemplo, um monitor exibe uma gama de cores diferente daquela produzida por uma impressora, criando a necessidade de gerenciar cores a partir das imagens originais para a saída final, isto nos leva à definição dos modelos de cores.

### **Modelos de cores**

Dependendo da necessidade há vários modelos de cores que podem ser escolhidos ao se criar um gráfico. Os modelos são descritos a seguir:

- Modelo **CMYK**: É um modelo pertencente ao conjunto de cores primárias subtrativas, este modelo utiliza o seguinte conjunto de cores.

- ciano
- magenta
- amarelo
- preto

- Modelo **RGB**: É um modelo pertencente ao conjunto de cores primárias aditivas, este modelo utiliza o seguinte conjunto de cores.

- vermelho
- verde
- azul

- Modelo **HSB**: Este modelo define as cores utilizando os seguintes componentes.

- matiz
- saturação
- brilho

O matiz descreve o pigmento de uma cor e é medido em graus de 0 a 359 (por exemplo utilizando o círculo cromático, 0 grau é vermelho; 60 graus, amarelo; 120 graus, verde; 180 graus, ciano; 240 graus, azul e 300 graus, magenta). A saturação descreve a vivacidade ou o esmaecimento de uma cor e é medida em porcentagem de 0 a 100 (quanto maior a porcentagem, maior a vivacidade da cor). O brilho

descreve a quantidade de branco que uma cor contém e é medido em porcentagem de 0 a 100. Por exemplo, um valor de brilho igual a 0 produz preto, e um valor de brilho igual a 100 produz branco.

Modelo **tons de cinza**: Este modelo define a cor usando apenas um componente, o brilho, e é medido em valores que variam de 0 a 100%. Cada cor em tons de cinza tem valores iguais de componentes vermelho, verde e azul do modelo de cor RGB.

### **As cores e os efeitos psicológicos**

Segundo a GFA Web Design (2004), as cores nos seres humanos têm uma influência direta, elas são capazes de proporcionar algumas sensações psicológicas conhecidas que se detalham a seguir.

#### **Sensações Acromáticas**

- Branco: inocência, paz, divindade, calma, harmonia, para os orientais pode significar morte, batismo, casamento, cisne, lírio, neve, ordem, simplicidade, limpeza, bem, pureza.
- Preto: sujeira, sombra, carvão, fumaça, miséria, pessimismo, melancolia, nobreza, seriedade. É expressivo e angustiante ao mesmo tempo. Alegre quando combinado com outras cores.
- Cinza: pó, chuva, neblina, tédio, tristeza, velhice, passado, seriedade. Posição intermediária entre luz e sombra.

#### **Sensações Cromáticas**

- Vermelho: guerra, sol, fogo, atenção, mulher, conquista, coragem, furor, vigor, glória, ira, emoção, paixão, ação, agressividade, perigo, dinamismo, baixa energia, revolta, calor, violência.
- Laranja: prazer, êxtase, dureza, euforia, outono, aurora, festa, luminosidade, tentação, senso de humor. Flamejar do fogo.
- Amarelo: egoísmo, ciúmes, inveja, prazer, conforto, alerta, esperança, flores grandes, verão, limão, calor da luz solar, iluminação, alerta, euforia.
- Verde: umidade, frescor, bosque, mar, verão, adolescência, bem-estar, paz, saúde (medicina), esperança, liberdade, paz repousante. Pode desencadear paixões.

- Azul: frio, mar, céu, horizonte, feminilidade, espaço, intelectualidade, paz, serenidade, fidelidade, confiança, harmonia, afeto, amizade, amor, viagem, verdade, advertência.
- Roxo: fantasia, mistério, egoísmo, espiritualidade, noite, aurora, sonho, igreja, justiça, misticismo, delicadeza, calma.
- Marrom: cordialidade, comportamento nobre, pensar, melancolia, terra, lama, outono, doença, desconforto, pesar, vigor.
- Púrpura: violência, furto, miséria, engano, calma, dignidade, estima.
- Violeta: calma, dignidade, estima, valor, miséria, roubo, afetividade, miséria, calma, violência, agressão, poder sonífero.
- Vermelho-alaranjado: sexualidade, agressão, competição, operacionalidade, desejo, excetabilidade, dominação.

### **Grandezas físicas da luz - fotometria**

As unidades fotométricas são concernentes à luz como é percebido pelo olho humano. Em quantidades fotométricas, cada comprimento de onda é avaliado de acordo a que tão visível é pelas pessoas. Por exemplo, a luz infravermelha é invisível ao olho, assim a radiação infravermelha não é incluída em nenhuma medida fotométrica. Um calefator gera um grande fluxo radiante de energia mas fornece pouca luz, isto devido que grande parte da energia está em infravermelho. (FACT INDEX, 2004)

#### **Watts (fluxo radiante) vs. Lumen (fluxo luminoso)**

O lumen é uma unidade fotométrica equivalente ao watt que é uma unidade de energia. As pessoas estão acostumadas a pensar nas lâmpadas em termos de watts. Mas os watts não são uma medida da quantidade de luz gerada, e sim uma medida da quantidade de energia consumida, p/ex. uma lâmpada incandescente de 60 watts fornece aproximadamente 900 lumens, que é equivalente a uma lâmpada fluorescente de 15 watts.

#### **Ângulo sólido**

É o ângulo que, visto desde o centro da esfera representa uma área da superfície com valor numericamente igual ao quadrado do raio da esfera.

O máximo ângulo sólido é  $\approx 12,57$  que corresponde a toda a área de uma esfera unitária, a qual é  $4\pi$ . Basicamente é a versão 3D do radiano (FACT INDEX, 2004).

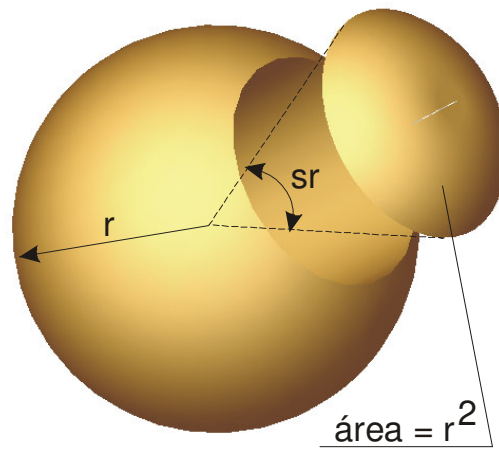


Fig. 43. Definição da unidade padrão do ângulo sólido, estereoradiano.

A unidade padrão do ângulo sólido é o estereoradiano (sr), que corresponde ao valor de uma área unitária para um raio unitário da esfera,  $r=1$ .

#### Intensidade luminosa

É o fluxo luminoso emitido por um ponto por unidade de ângulo sólido numa direção particular e é medida em candelas (cd). A intensidade luminosa é a unidade base oficial da luz definida na "CGPM, the 11th General Conference on Weights and Measures" em 1979 como segue:

A candela é a intensidade luminosa, numa direção dada, de uma fonte que emite radiação monocromática de frequência  $540 \times 10^{12}$  Hz e tem uma intensidade radiante nessa direção de  $1/683$  watt por estereoradiano (W/sr)

A frequência do espectro visível escolhida é um matiz do verde para a qual o olho humano é mais sensível (SCHORSCH, 2004).

#### Fluxo luminoso

O fluxo luminoso da luz é a unidade básica de medida do fluxo de energia de luz transmitida. A unidade padrão do fluxo luminoso é o lumen (lm).

Se um ponto uniforme de fonte de luz de 1 cd de intensidade luminosa é posicionada no centro de uma esfera de 1 m de raio, logo toda área de  $1 \text{ m}^2$  de dentro da esfera recebe um fluxo luminoso de 1 lm. Desde que a área total de uma esfera é  $4 \cdot \pi$  vezes o raio ao quadrado (por definição raio unitário ao quadrado é um



estereoradiano), um ponto uniforme de fonte de luz de 1 cd produz um total de 12,57 lm de fluxo luminoso (1cd = 12,57 lm, SCHORSCH, 2004).

O lumen é definido como uma candela vezes um estereoradiano; por outro lado como uma candela por definição tem uma intensidade radiante de 1/683 watts por estereoradiano. Desta forma se obtém que 1/683 watts de luz verde de 555 nanômetros de comprimento de onda proporciona 1 lumen (1lm = 1/683 watts a 555 nm de luz verde).

A relação entre watts e lumens não é um simples fator de escala, como já observado 60 watt de uma lâmpada incandescente e 15 watt de uma fluorescente fornecem ambas 900 lumes, a relação descrita só indica que 1 watt de luz verde pura de 555 nanômetros de comprimento de onda, proporciona 1 lumen. (FACT INDEX, 2004)

#### Iluminação (Illuminance)

É o coeficiente do fluxo luminoso incidente sobre a superfície iluminada. A unidade padrão é o lux (lx) o qual é igual ao lumes por metro quadrado (lm/m<sup>2</sup>).

Iluminação é a quantidade de luz visível de todas as direções que ilumina um ponto sobre uma superfície. Esta "superfície" pode ser física ou um plano imaginário. Um plano imaginário pode ser utilizado para calcular a iluminação em qualquer lugar do espaço, p/ex. para obter o coeficiente de fluxo luminoso do sol durante o dia.

Valores típicos de iluminação são (FACT INDEX, 2004):

- O sol durante o dia tem em média de 32.000 a 100.000 lux
- Um estúdio de TV tem uma iluminação de cerca a 1.000 lux
- O brilho de uma sala tem cerca a 400 lux de iluminação
- A luz da lua tem cerca a 1 lux

#### Luminosidade (Luminance)

É a relação da intensidade luminosa por unidade de área projetada de qualquer superfície, medida numa direção específica.

Luminosidade é a quantidade de luz visível que deixa um ponto de uma superfície numa direção específica. Esta "superfície" pode ser uma superfície física ou um plano imaginário, a luz que sai da superfície pode ser devido à reflexão, à transmissão, e/ou emissão. Medida física do brilho. A unidade padrão é a candela por metro quadrado (cd/m<sup>2</sup>).

## Energia lumínica

A energia lumínica é uma unidade fotométrica equivalente à energia radiante (joule). Utilizada usualmente para medir a emissão de luz de uma fonte por unidade de tempo. A unidade padrão é o lumen segundo (lm s).

### 2.4.3 A visão

O termo COR indica algo muito mais próximo da neurofisiologia do que da física. É algo que consiste mais no comportamento próprio de um indivíduo do que num fenômeno independente de validade universal. A palavra "cor" é empregada para referir-se à sensação consciente de um observador cuja retina se acha estimulada por energia radiante.

Entrando no estudo do observador propriamente dito deve-se falar primeiro do órgão humano capaz de perceber esta energia radiante que se chama de cor, o olho. Como apresentada na Fig. 44, um dos elementos constituintes do olho é a retina, com apenas 0,4 mm de espessura, representa a parte sensível. As células sensoriais da retina, que recebem estímulo luminoso transformando-os em impulsos nervosos são os cones e bastonetes, também chamados de fotorreceptores. Os bastonetes, bem mais numerosos que os cones, são os responsáveis pela visão em preto e branco. Já os cones permitem a percepção das cores no sistema RGB.

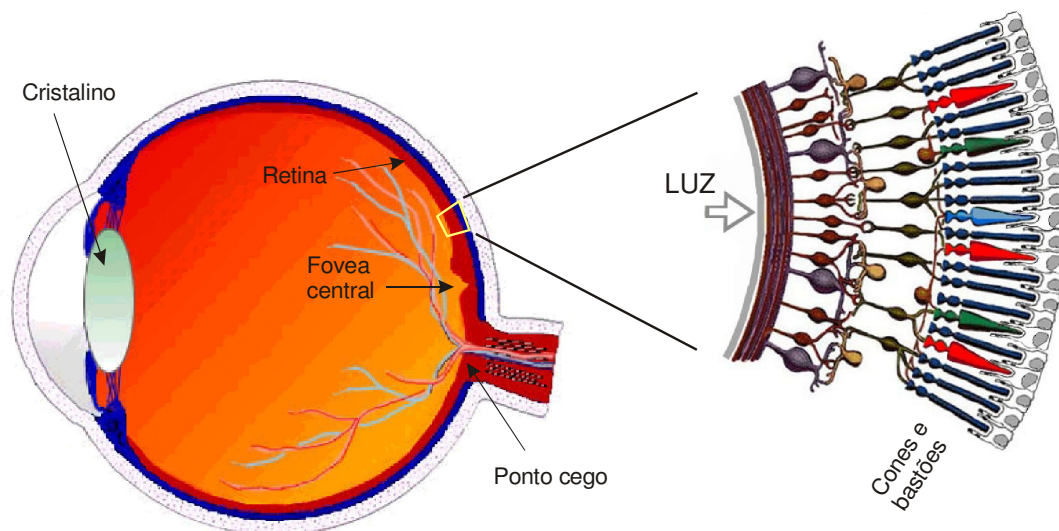


Fig. 44. a) A retina do olho. b) Bastões e cones constituintes da retina (CORTESE, 2004).

A distribuição não é homogênea, os bastonetes predominam na periferia e vão diminuindo em direção ao centro. O número de cones vai aumentando até chegar a um ponto central hipersensível, a fóvea central. A visão na fóvea é muito mais penetrante, restando ao resto da região circundante da retina a função de dar um aspecto geral do campo de visão. Em cada olho humano existem perto de 7 milhões de cones e 120 milhões de bastões (Newsartesvisuales, 2004), dependendo da quantidade e tipo de bastões e cones se tem uma maior sensibilidade a uma gama de cores ou a outra.

O olho humano pode distinguir entre 10.000 cores (CORTENSE, 2004). Podem-se ademais empregar as três dimensões físicas da cor para relacionar experiências de percepção com as propriedades dos materiais: saturação, tonalidade, luminância.

### **As cores primárias da visão**

O olho conta com três tipos de células visuais que permitem ter três tipos diferentes de sensações, estas correspondem às cores primárias aditivas RGB (INSTITUTO DE ARTES VISUALES, 2004).

A estes três componentes da vista lhe correspondem oito cores elementares, dois acromáticos (branco e preto) e seis cores elementares cromáticos (amarelo, magenta, ciano, azul violeta, verde, e vermelho laranja). Estas cores representam as sensações de cor extremas que o órgão da vista é capaz de perceber.

### **Imagem e resolução visual**

Segundo Moles (1997), a trama é um conjunto de pontos que constituem a imagem. O tramado é a operação de caráter estrutural que converte toda a imagem em um conjunto de pontos (dots) em preto e branco ou colorido que, mediante a justaposição do conjunto, criam sobre uma folha uma opacidade variável relacionada com sua densidade. O preto absoluto seria obtido se todos os pontos tivessem um tamanho tal que se sobrepusessem uns aos outros. O branco absoluto por sua vez seria alcançado reduzindo os pontos a zero.

De uma forma geral, poderia se dizer que o tramado é uma espécie de amostragem do mundo mediante pontos. Considerando sua finura, e levando ao limite o trama estrutural, poderia se dizer legitimamente que o conjunto do mundo visível está tramado, e o está, a priori como mínimo pelas células visíveis de nossa retina, sobre as quais a lente do olho projeta a realidade. Da mesma maneira, uma fotografia, de

forma microscópica, também tem uma trama em sua estrutura elementar devido aos grãos de prata distribuídos no filme.

A partir desta observação pode-se perceber a noção de trama perfeita e correlativamente de imagem perfeita, naquela imagem em que a trama escolhida para a operação de reprodução é mais fina que o poder separador do olho definido pelo número de cones e bastões da retina.

Na prática, a eleição da trama se efetua através de considerações simples: quanto mais fina é a trama, maior a amostragem, e mais oneroso resulta realizá-lo corretamente.

Para elaborar uma escala de densidades, distinguiremos cinco principais tipos de tramas (MOLES, 1997).

- Trama infralimiar, imperceptível pelo olho.
- Trama perto ao ponto de percepção, aquela em que o olho começa a captar a granulação da imagem.
- Trama superior, aquela em que o olho aceita que a imagem não é perfeita mas permite uma fácil compreensão.
- Trama grossa, na que o construtor efetua com seu leitor um jogo ciente de reconstrução de uma imagem vista através da grade da trama.
- Trama muito grossa, tão grossa que em realidade a forma representada, quantificada em quadrados ou círculos imediatamente visíveis, não emerge até a consciência a não ser pela vontade que esta põe em procurá-la. Exemplos são os vitrais ou as artes de Georges Rouault que podem ser observadas na galeria virtual SIMSREED (2003).

Por último, a trama pode ser regular ou irregular. A trama de uma tela da televisão é essencialmente regular, pois se trata de uma série de linhas recorridas regularmente. Mas é também possível obter tramas perfeitamente aleatórias, p/ex., os grãos fotográficos dispersos na camada sensível de um filme fotográfico.

A Fig. 45 apresenta cinco tramas de densidades diferentes, situadas por ordem crescente da esquerda para a direita, expressas em número de pontos por polegada linear (dpi).

A resolução visual ou acuidade visual é uma característica do sistema visual que define a possibilidade de poder visualizar os detalhes de um objeto ou trama de uma figura. Além de linhas ou grades, uma variedade de figuras, tipo letras Sneller, Landolt, ou Vernier (veja Fig. 46), podem ser empregadas nesta medida.

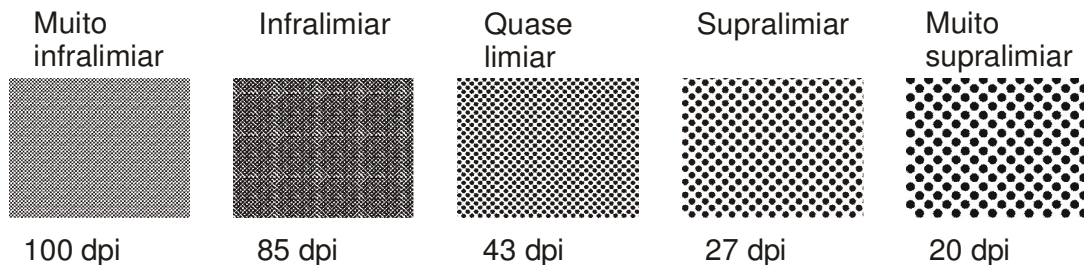
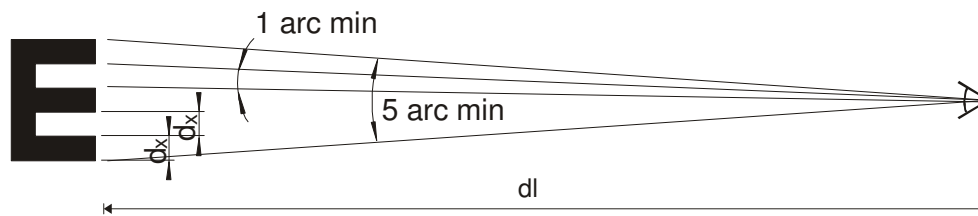


Fig. 45. Tramas de densidades diferentes (MOLES, 1997).

Segundo Grandjean Etienne (1998), a resolução visual está definida como a capacidade de distinguir dois pontos separados entre si de 1 (um) arco minuto, Fig. 47. Resolução visual pode ser expressa em termos de minutos de arco (arc min) ou em frações de Snellen (WILSON & CORLETT, 1998), p/ex. 6/6 (ou 20/20 em unidades inglesas). A fração é mais utilizada pelos clínicos onde o numerador é a distância visual em metros (ou pés) e o denominador é a distância de teste na qual os detalhes da figura (letra) representam um ângulo fixo de 1 arc min ao observador, Fig. 47. Sob ótimas condições a faixa de resolução visual normal é de 6/4 a 6/6 (ou 0,67 a 1,00 arc min). A redução da iluminação ou contraste pode resultar num decremento da resolução visual.



Fig. 46. Várias figuras que podem ser utilizadas na medida da resolução ou acuidade visual humana.

**Fração de Snellen**

$$\text{Resolução visual } (r_v) = \frac{\text{Distância visual } (d_v)}{\text{Distância para 1 arc min } (d_l)}$$

Fig. 47. Parâmetros da fração Sneller.

Segundo o estudo realizado pela divisão de avaliação e engenharia da montadora Toyota (TSUI, 2001), com o objetivo de adaptar o tamanho dos números dos painéis para as pessoas da terceira idade, foi realizado um estudo que mostra a relação entre a acuidade visual e a distância de teste, veja Fig. 48.

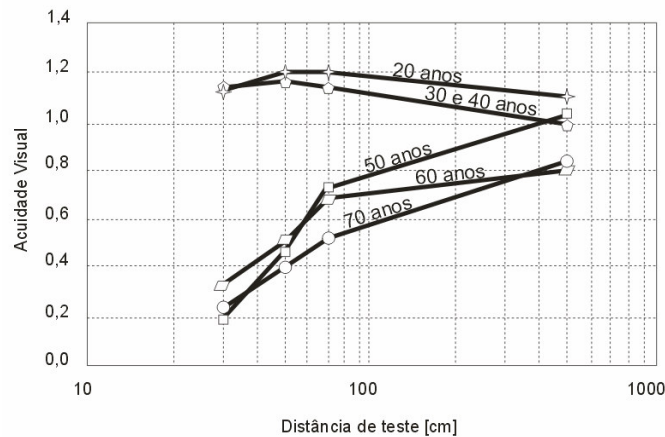


Fig. 48. Relação entre acuidade visual e a distância de teste, (Takayuki 2001).

Mediante este gráfico, pode-se conhecer a resolução visual das pessoas em função da sua faixa etária. Com esta informação e as frações de Snellen (Fig. 47) pode-se determinar a mínima espessura de linha ( $d_x$ ) que o olho humano pode distinguir. A partir deste gráfico pode-se p/ex. determinar que para o teste de cinco metros de distância, uma pessoa de vinte anos tem uma resolução visual ( $r_v$ ) de 1,1.

$$r_v = \frac{d_v}{d_l}$$

$$d_v = r_v * d_l$$

$$d_v = 1,1 * 5$$

$$\mathbf{d_v = 5,5 m}$$

isto significa que a 5,5 m pode ver os detalhes da letra separados a distância  $d_x$  de:

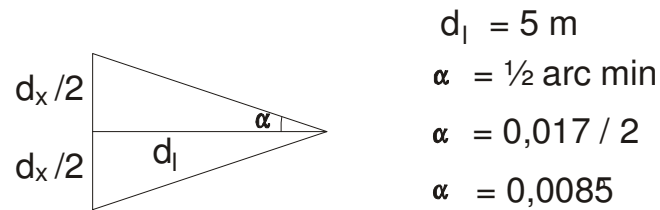


Fig. 49. Triângulo formado na fração Sneller.

$$\text{tg}\alpha = \frac{d_x / 2}{d_l}$$

$$d_x = 2 * d_l * \text{tg}\alpha$$

$$d_x = 2 * 5 * \text{tg}(0,0085)$$

$$d_x = 1,48\text{E-}3\text{m}$$

$$\mathbf{d_x = 1,48 \text{ mm}}$$

O que corresponde a

$$\frac{25,4}{1,48} = 17\text{dpi}$$

A Tabela 4 e a Fig. 50, trazem o resultado deste cálculo para todos os dados da Fig. 48. Assim, apresenta-se um resumo das máximas distâncias em que as pessoas podem visualizar os detalhes dos objetos (em dpi), do ensaio de resolução visual.

Tabela 4. Máximas distâncias (m) em que podem ser visualizados os detalhes dos objetos (em dpi) do ensaio de resolução visual, pelas diferentes faixas etárias.

idade	Distância em m				
	17 dpi	28 dpi	85 dpi	122 dpi	285 dpi
20 anos	5,50	3,60	1,18	0,84	0,34
30 - 40 anos	5,00	3,12	1,12	0,81	0,34
50 anos	5,15	2,79	0,79	0,46	-
60 anos	3,95	2,25	0,71	0,46	-
70 anos	4,10	2,10	0,59	0,35	-

Distribuindo os pontos desta tabela obtemos o gráfico da Fig. 50. Considerando que os testes foram realizados nas melhores condições de iluminação e contraste (P&B), as pessoas da faixa etária dos 20 anos que são os que melhores resoluções visuais apresentam, têm como limite visual 14 dpi (ponto com diâmetro de 1,8 mm) à distância de 6 m, isto significa que pontos realizados com resoluções maiores não serão mais diferenciados, obtendo assim o parâmetro do valor da mínima resolução necessária para o projeto do sistema impressor *raster* proposto e solicitado no item "1.4 Requisitos de projeto".

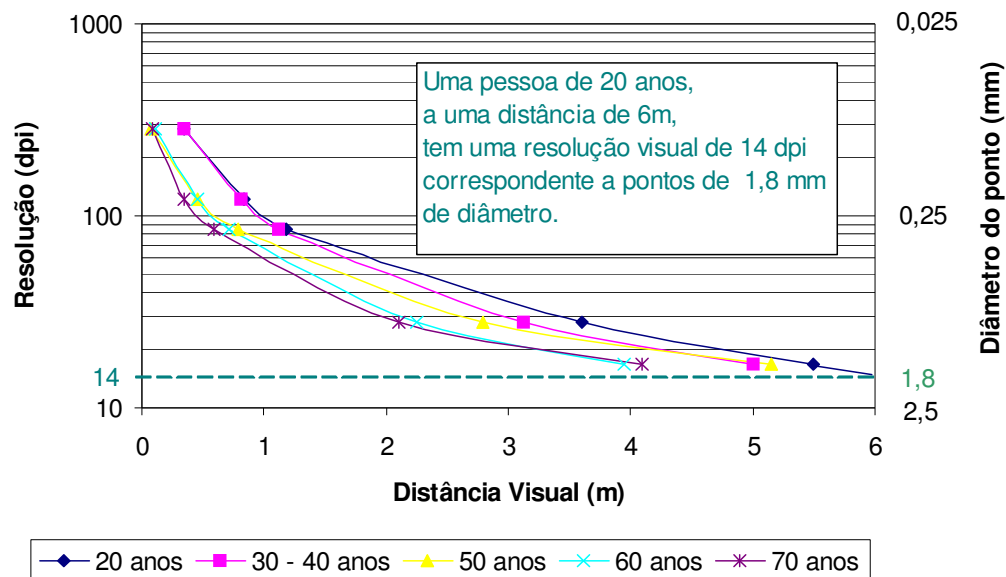


Fig. 50. Relação entre a distância visual e a máxima resolução que pode ser visualizada, para as diferentes faixas etárias.

#### 2.4.4 Pinturas

Basicamente uma pintura é composta por duas fases, uma líquida e outra sólida.

- A fase líquida da pintura é constituída pelo chamado "veículo" e os aditivos, os quais fornecem à pintura as características de secagem requeridas, homogeneização dos componentes na preparação, conservação e estabilidade no tempo, junto a estes componentes se encontra o dissolvente que é o encarregado de proporcionar ao produto o grau de fluidez necessário na elaboração e aplicação.



- A fase sólida é denominada de forma genérica de pigmento, mas está constituído além do pigmento propriamente dito (que tem como função conferir a cor) de umas partículas chamadas de cargas que não aportam cor mas são as encarregadas de trabalhar principalmente sobre o brilho e a consistência da pintura.

Para definir genericamente um pigmento Fig. 51, pode-se dizer que são sólidos finamente triturados que tem a particular capacidade de absorver "seletivamente" uma gama de comprimentos de onda refletindo o resto o que dá origem a uma cor.

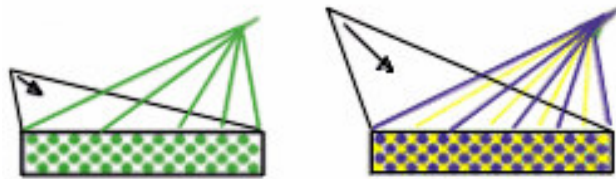


Fig. 51. Pigmentos que absorvem "seletivamente" uma gama de comprimentos de onda refletindo o resto.

Entre os pigmentos pode-se encontrar tipos distintos que se dividem em duas grandes famílias, os orgânicos e os inorgânicos.

O primeiro grupo é obtido mediante síntese química de produtos derivados do petróleo nos quais podem-se encontrar os azuis e verdes, amarelos vermelhos, laranjas e bordô, etc.

Os inorgânicos são geralmente óxidos ou sais complexos de metais p/ex. os dióxidos de titânio (brancos), óxidos de ferro (vermelhos e amarelos), etc.

Para ter um máximo de aproveitamento das propriedades dos pigmentos é muito importante que as partículas sejam muito finas e estejam homogeneamente divididas. Além disso uma vez aplicada a pintura, é necessário que se mantenham em suspensão e se distribuam de forma parelha em toda a superfície.

Para ter uma determinada cor pode-se utilizar o pigmento respectivo ou mesclar dois ou mais pigmentos onde a soma dos efeitos de absorção e reflexão reproduzem a mesma cor, p/ex. pode-se utilizar um pigmento verde ou a soma dos pigmentos amarelo e azul.

A partir da possibilidade de poder obter a mesma cor mediante a mescla de distintos pigmentos se entende que a sensação de cor pode ser produzida por infinitas

combinações de distribuições espectrais. Devido a esta possibilidade ocorre algo muito comum na pintura que é o fenômeno chamado de metamerismo. Este fenômeno é produzido precisamente porque se bem o resultado obtido são duas cores aparentemente iguais, isto é só a um tipo de luz, já que como os comprimentos de onda que reflete não são as mesmas ao iluminá-los com luzes que possuam diferentes tipos de radiações o resultado varia notavelmente podendo chegar a ser percebido pelo olho humano em alguns casos como se fossem cores completamente distintas.

### **Tintas Ultravioleta - UV**

A utilização da tecnologia UV no Brasil está em franco crescimento. Observa-se que o mercado brasileiro está, aos poucos, absorvendo essa tecnologia. Por isso segundo a revista SILK-SCREEN (2003) á necessidade de conhecer destas tintas, suas características, vantagens e seu comportamento em contato com as curadoras UV, como se explicara a continuação.

### **Características**

Entre as principais características das tintas ultravioleta estão:

- Secagem: Uma das principais características das tintas UV é que estas necessitam da luz ultra-violeta para secar, já uma tinta convencional não.
- Nível de brilho: em geral todas as tintas UV possuem alto nível de brilho. Para superfícies sem brilho, há uma variedade de tintas especiais.
- Transparência: a melhor e mais simples maneira de se fazer a cura UV é em vernizes não pigmentados, porque neste caso a radiação UV não é obstruída pelos pigmentos. Isto significa dizer que a mistura de pigmentos é limitada por razões referentes à velocidade de cura.

### **Aplicações**

A tinta UV pode ser aplicada sobre quase qualquer superfície, desde que corretamente tratada. Por exemplo, substratos porosos, como papel, devem receber um primer (pintura base) para que a tinta não penetre no substrato, já que esta seca com a incidência da luz e se penetra dificilmente vai secar.

Para aplicar sobre substratos plásticos estes devem ter uma tensão superficial mínima para que a tinta se adira na superfície. Esta tensão pode ser obtida através de tratamentos, que de modo simples, “desengorduram” a superfície tornando-a

mais receptível à tinta. Alguns plásticos têm a tensão necessária intrínseca, por exemplo, substratos à base de vinil. Porém, outros tais como o polipropileno e polietileno precisam ser tratados. O tratamento normalmente é feito pelo fabricante do substrato, porém o tratamento tem prazo e precisa ser sempre verificado.

### **Vantagens**

As tintas UV possuem diversas vantagens em relação ao processo convencional de impressão.

A tinta não seca nos bicos e assim, não é necessário parar a produção para realizar o procedimento de limpeza. Há ainda a questão de um ambiente saudável. Como a tinta é composta de extratos secos, não se está jogando nada na atmosfera. A tinta solvente, por exemplo, que seca por evaporação, elimina um gás prejudicial à saúde dos operadores.

As tintas UV proporcionam um alto brilho ao trabalho final, aliado a uma elevada resistência mecânica e química.

### **Curadoras**

Em relação à cura UV, relacionaremos primeiramente os componentes básicos de um equipamento UV, e seus itens correlatos:

1. Fonte de luz: é uma lâmpada UV constituída de um gás inerte (argônio, neônio) e mercúrio vaporizado, contidos num tubo de quartzo selado sob pressão.
2. Uma fonte de tensão: necessária para energizar a lâmpada.
3. Refletores: parabólico, elíptico ou facetado para focar ou espelhar a luz.
4. Refrigeração: mantém a temperatura nominal de trabalho da lâmpada UV.
5. Exaustão : remove o ozônio gerado pela lâmpadas UV.
6. Esteira transportadora do material curado.

A unidade de cura UV é um sistema multifuncional. O sistema de secagem é capaz de curar camadas de tinta finas e espessas, monocromáticas ou com policromia.

Além do espectro desejado, como o processo UV só gera uma pequena quantidade de calor isto permite realizar impressões sobre substratos finos e sensíveis ao calor.

### **Processamento da cura**

Tintas e vernizes curáveis por radiação são componentes líquidos, reativos compostos por resinas, diluentes (monômeros) e aditivos. Esses componentes,

quando submetidos à radiação ultravioleta sofrem reações de polimerização e reticulação, formando um filme polimérico sólido, sem a evaporação de solventes.

De acordo com a fábrica de tintas ultravioleta, COATES SCREEN (2004), todos os componentes contidos nos produtos com secagem por luz ultravioleta são acrilados, ou seja, contêm dois átomos de carbono unidos por uma dupla ligação em suas extremidades ou ao longo do composto.

Ao incidir luz UV (normalmente na região de 200-400nm do espectro eletromagnético) nos produtos ultravioleta, o componente sensível à luz chamado de fotoiniciador inicia uma reação de polimerização, isto é, uma reação química espontânea desmembrando-se em partículas altamente instáveis, ou seja, reativas, chamadas de radicais livres. Estes radicais livres, por sua vez, quebram as duplas ligações contidas nos demais componentes UV, unindo-se umas as outras até não haver mais duplas ligações ou fotoiniciadores inteiros, formando um filme altamente entrelaçado, coeso e rígido.

Como todos os componentes da formulação participam da reação, tudo o que é depositado sobre o substrato continua sobre o mesmo, após a secagem. Este processo ocorre em décimos de segundo sem sobra de resíduos ou evaporação de solventes orgânicos voláteis, motivo pelo qual é considerado o processo químico mais ecológico (GRAFICASONLINE, 2003).

### **Velocidade de cura**

A velocidade de reação de uma tinta UV no processo de cura depende da sua formulação. Os componentes mais importantes de uma tinta serigráfica UV são:

- Prepolímeros/oligômeros (resina sintética viscosa): Formam a base da tinta UV e determinam importantes qualidades da tinta, tais como aderência, durabilidade e flexibilidade;
- Monômeros: influenciam a velocidade de cura e transmitem a viscosidade requerida à tinta para imprimir. Sua funcionalidade determina e controla o endurecimento da tinta;
- Fotoiniciadores ou radicais-livres: absorvem a luz UV incidente e iniciam o processo de cura.

### **Custo-benefício da tecnologia**

Primeiro há um ganho de espaço, pois o material pode ser empilhado logo após a cura, que é imediata. Esta característica de secagem rápida faz com que a produção se torne imbatível. Um outro fator importante é que a tinta que sobra é re-adequada. Finalmente deve-se considerar que se usa menos energia para secar um produto UV.

A tecnologia UV está comprovadamente sendo mais e mais usada segundo a revista QUÍMICA E DERIVADOS (2004) há um crescimento no Brasil de 12% ano do uso da técnica, o que demonstra que o mercado absorve a cada vez mais tanto na produção como na compra dos produtos derivados e produzidos pela tecnologia UV. A não-geração de poluentes do ar, assim como de resíduos produzidos por métodos tradicionais de cura, além do baixo consumo de energia e a alta produtividade fazem da tecnologia UV uma escolha acertada para impressão.

### **2.5 Análise de elementos para máquinas de formatos grandes**

Neste capítulo serão estudados os grupos funcionais de componentes eletro-eletrônicos e mecânicos de relevância para o desenvolvimento de máquinas de formatos grandes e os tipos construtivos de maior importância.

Para o desenvolvimento de uma máquina os principais componentes a serem considerados são:

- A estrutura mecânica que servirá de chassi para a máquina.
- Para as partes móveis do sistema serão requeridos:
  - Acionamentos para movimentação.
  - Guias para deslocamento linear.
  - Sistemas de medição de deslocamento para determinação da posição.
- Dispositivos eletrônicos de comando e controle de movimento.
- Um software gerenciador para integrar todos estes elementos.

#### **2.5.1 Estrutura de sustentação mecânica**

A estrutura mecânica do pórtico X-Y do sistema pode ser de perfis de aço ou perfis padronizados de alumínio. Os perfis de Al apresentam características de baixo peso, dispõem de reforços e conexões prontas, acessórios e unidades para

posicionamento de precisão e transporte de cargas, como apresentado no APÊNDICE 3 Perfis e unidades de acionamento em alumínio.

### 2.5.2 Acionamento dos eixos

Os acionamentos podem ser lineares ou rotativos. Ambos acionamentos atendem as necessidades de posicionamento, torque, força e suavidade de movimento. A escolha do acionamento estará principalmente sujeita ao custo final de cada uma das soluções.

Se a escolha for um motor rotativo, a opção por um módulo de conversão / transmissão de movimento (rotativo – translativo) deve ser implementado. Existem várias maneiras de converter um movimento rotativo em translativo, entre elas podemos citar, fuso com castanha, pinhão e cremalheira, correntes e polias.

O sistema de transmissão deve considerar as características do pórtico posicionador proposto, isto é, um deslocamento no eixo longitudinal de 10 m. Como em sistemas posicionadores a inércia deve ser tão baixa como possível, para conseguir elevada frequência natural (MARTIN, 1999), o sistema de transmissão por fuso com castanhas foi desconsiderado devido à elevada inércia do fuso. O fuso requerido para ter a rigidez necessária num comprimento de 10 m deve ter um diâmetro de 100 mm (NSK NIPPON SEIKO, 1998 e THK LM SYSTEMS, 1996), da mesma maneira, foi desconsiderado o sistema pinhão e cremalheira por ser um sistema que apresenta diversas não linearidades, principalmente no que diz respeito às folgas, já que em maior ou menor quantidade sempre está presente em engrenamentos (MARTIN, 1999).

Assim, o sistema de transmissão mais adequado ao projeto são polias com cabos de aço ou correias sincronizadoras dentadas Fig. 52, para o comprimento requerido (10 m) existe a solução de correia dentada fixa (APÊNDICE 3 Perfis e unidades de acionamento em alumínio).

As correias sincronizadoras em comparação dos cabos de aço apresentam características de suavidade de transmissão e amortecimento de vibrações, mas apresentam uma deformação nos dentes de borracha como mostrado no detalhe da Fig. 52 b), já a opção de cabo de aço apresenta este problema em níveis desconsideráveis mas requer de uma maior manutenção.

Mas como já mencionado, a influência da deformação dos dentes, assim como, todas as folgas do sistema de transmissão são contornadas ao utilizar um sistema de leitura da posição translativa de forma direta.

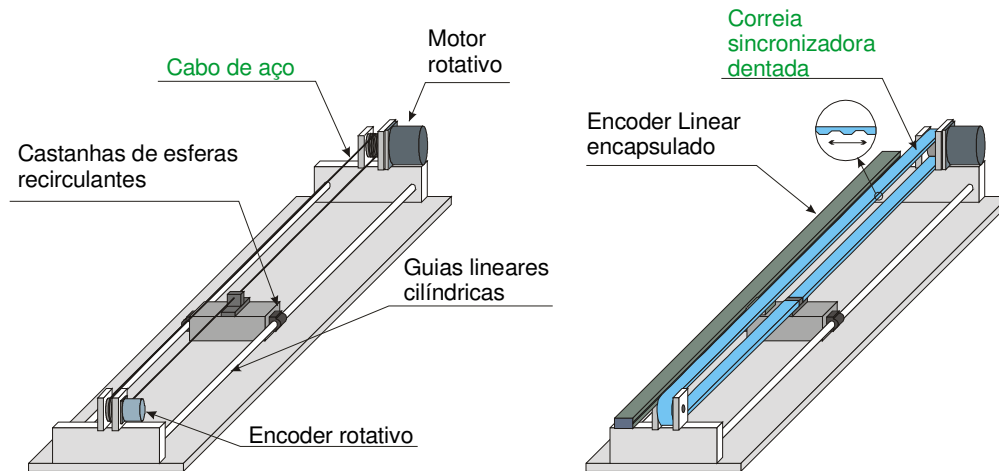


Fig. 52. Módulos de transmissão a) Cabo de aço b) Correia sincronizadora dentada.

### 2.5.3 Guias para deslocamento translativo

As guias para movimentar cargas translativamente podem ser de deslizamento ou de rolamento. As guias de deslizamento são utilizadas para transporte de elevadíssimas cargas (dezenas de Tnf, THK LM SYSTEM, 2000) com alta rigidez, mas dependendo da velocidade podem apresentar o efeito *stick slip* devido ao atrito dinâmico. Em decorrência do surgimento deste efeito o movimento em baixas velocidades é irregular, com oscilações, praticamente inviabilizando posicionamentos de precisão (MARTIN, 1999). Por outro lado as guias lineares cilíndricas com castanha de esferas recirculantes *standard* são projetadas para transportar cargas medianas (dezenas a milhares de kgf, THK LM SYSTEM, 2000) em sistemas de precisão, possuem baixo coeficiente de atrito, alta dinâmica e especialmente não apresentam o efeito *stick slip*.

Para longos comprimentos existem guias tipo *slide pack low cost*, que permitem que as guias sejam acopladas no comprimento requerido e fixadas na estrutura do Sistema, Fig. 53.

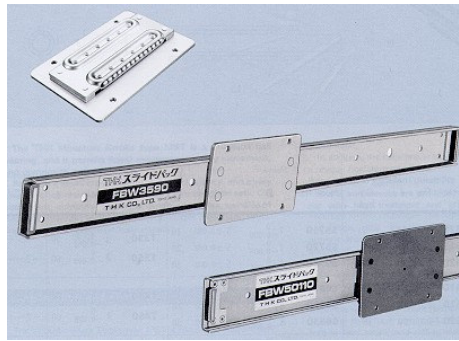


Fig. 53. Guias *slide pack* com esferas recirculantes (THK LM SYSTEM, 2000).

#### 2.5.4 Sistema de medição de deslocamento translativo

Para medir o deslocamento translativo, podem-se utilizar transdutores análogos ou digitais. Os transdutores análogos apresentam um sinal de saída que varia de forma contínua com a variação da grandeza a medir. Já os transdutores digitais apresentam um sinal de saída discreto relativo à grandeza a medir, p/ex., um pulso por unidade de deslocamento.

Os transdutores de medição de deslocamento do tipo análogo, podem ter diversos princípios de funcionamento p/ex., resistivo, indutivo, capacitivo, etc., mas estes são principalmente utilizados em pequenos deslocamentos. Já os transdutores digitais podem atender deslocamentos maiores.

Os transdutores digitais ou *encoders* podem ser translativos ou rotativos. O *encoder* rotativo é de menor custo em comparação ao *encoder* translativo. Para realizar uma medida de posição translativa, o *encoder* rotativo é acoplado ao eixo do motor, realizando-se a medição de maneira “indireta”, isto é, obtém-se o deslocamento a partir do número de rotações do *encoder*. Nesta forma de medição, a causa das folgas e deformações do sistema de transmissão (polia/correia), se introduzem erros no valor da medida em relação à posição real. Já com um *encoder* translativo, a medida da posição é realizada de maneira “direta”, eliminando a influência da transmissão.

Como a concepção do Sistema requer módulos de medição na faixa dos metros, os *encoders* translativos encapsulados não atendem estas necessidades, mas existem sistemas de medição modulares, seguindo o mesmo princípio de funcionamento,



para longos percursos. Estes sistemas possuem resoluções na faixa do  $\mu\text{m}$ , e são detalhados a seguir.

### **Encoder translativo óptico aberto sem contato**

Os *encoders* sem contato ópticos apresentam dois elementos claramente identificáveis, o cabeçote leitor e a escala reflexiva. Como mostra a Fig. 54, o cabeçote leitor funciona mediante o princípio reflexivo, envia um sinal através da fonte de luz LED o qual é refletido ou não pela escala e detectado pelas células fotovoltaicas do cabeçote, (HEIDENHAIN, 2004 e PIMENTEL, 1996).

Por ser incremental a distância percorrida é proporcional ao número total de sinais refletidos. O *encoder* modelo RGH22 da RENISHAW (1998) apresenta resoluções entre 0,1 a 5  $\mu\text{m}$ , com escala reflexiva em comprimentos de até 70 m que é fixada na estrutura mediante uma cola industrial que vem aderida na face oposta.

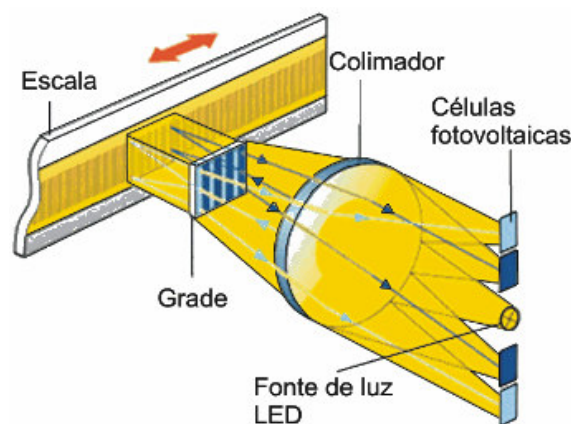


Fig. 54. Princípio de funcionamento do *encoder* translativo óptico utilizando o método reflexivo (HEIDENHAIN, 2004).

### **Encoder translativo indutivo aberto sem contato**

O princípio de funcionamento destes *encoders* é diferente, mas a configuração mecânica é igual aos *encoders* ópticos, apresentam resoluções em quadratura de 5 a 50  $\mu\text{m}$ , e no máximo comprimentos de 30 m na escala indutiva (DYNAPAR, 2000).

Como apresentado na Fig. 55, os *encoders* translativos indutivos utilizam a relutância variável inserida na escala indutiva para alterar o campo magnético produzido pelo cabeçote leitor (Fig. 56).

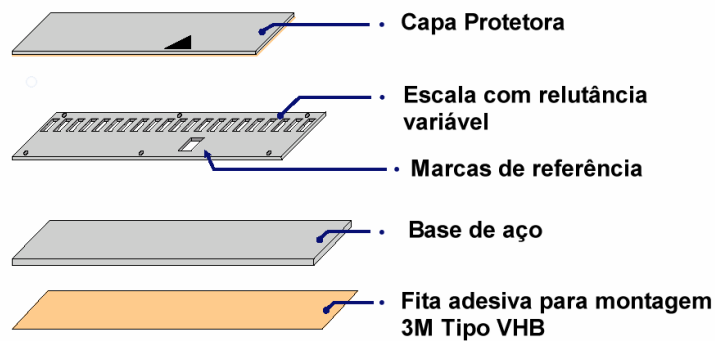


Fig. 55. Constituição da escala indutiva (DYNAPAR, 2000).

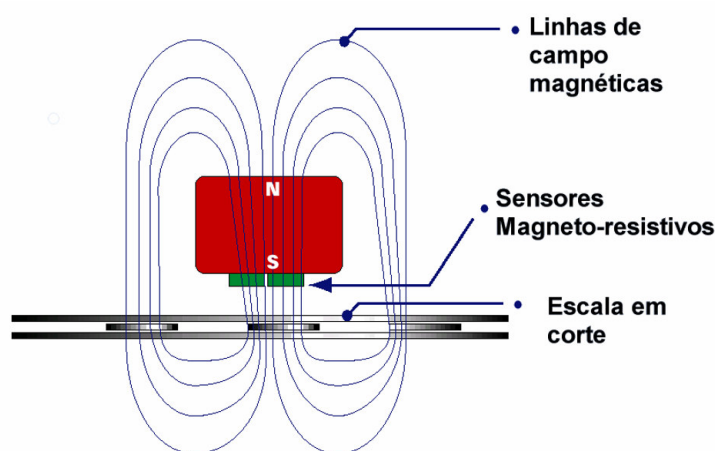


Fig. 56. Princípio de funcionamento dos *encoders* indutivos abertos sem contato (DYNAPAR, 2000).

Quando o cabeçote se desloca sobre a escala indutiva, sensores magneto-resistivos detectam a variação do campo magnético e um circuito eletrônico produz uma distorção no sinal de saída senoidal. Os sensores estão dispostos  $\frac{1}{4}$  de ciclo defasados para produzir sinais de saída seno e cosseno. Um outro sensor detecta a variação da separação entre o cabeçote leitor e a escala indutiva ajustando o ganho do circuito para estabilizar a amplitude do sinal. Interpolação eletrônica interna opcional converte os sinais de saída em sinais de onda quadrada em quadratura, de alta resolução.

### 2.5.5 Comando / controle de movimento e sinais digitais

Este módulo é o encarregado de realizar o controle dos acionamentos para realizar os movimentos requeridos do sistema e comandar os dispositivos digitais requeridos, pode ser de arquitetura modular ou por controlador de arquitetura aberta.

### **Arquitetura aberta**

No controlador de arquitetura aberta utiliza-se um PC ao qual é adicionado um módulo de controle de movimento (placa PCI). Desta maneira pode-se fornecer mais abertura para customizar as funções em qualquer parte do Sistema (MÁQUINAS E METAIS, 1997).

### **Arquitetura modular**

Um controlador de arquitetura modular já vem com funções e procedimentos definidos e não permite a possibilidade de serem modificadas e customizados pelos usuários como no caso dos controladores de arquitetura aberta.

#### 2.5.6 Gerenciamento do sistema

Os ambientes de programação existentes na atualidade se encontram projetados para atender os conceitos e técnicas definidas na engenharia do *software*, tais como programação Orientada a Objetos (O.O.) utilizada pela técnica de programação O.M.T. - *Object Model Technique*, (RUMBAUGH, 1994).

Este ambiente de programação geralmente tem duas partes claramente definidas: uma primeira onde é realizado o **código do programa** e uma segunda que é a **interface com o usuário**, também chamada de painel frontal.

### **Programação em ambiente gráfico**

No ambiente de programação gráfico, o **código do programa** é realizado graficamente mediante a construção de blocos, chamados de Instrumentos Virtuais (VI), a ligação dos VI se realiza de maneira intuitiva utilizando uma notação natural de engenheiros, p/ex. o ambiente de programação LabVIEW.

O LabVIEW devido às propriedades de modularidade e hierarquia, permite realizar o protótipo, desenho e modificação de um programa de aquisição de dados e controle de sistemas, num curto espaço de tempo. À forte integração deste ambiente com o *hardware* utilizado facilita um rápido desenvolvimento na aquisição e controle, análise e apresentação de resultados, possui funções compiladas de análise de medidas e apresentação de gráficos próprias dos sistemas de automação.

O LabVIEW tem livrarias disponíveis para condicionadores de sinal, comunicação serial, GPIB, VXI, PXI, aquisição de imagem e controle de movimento. Para

aplicações que requerem de uma performance em tempo real, existe o LabVIEW Real-time para funcionar com um *hardware* dedicado operando em tempo-real independente do sistema operacional.

No painel frontal ou **interface com o usuário**, podem-se colocar controles e mostradores para o sistema mediante a seleção de objetos tais como displays numéricos, medidores, relógios, termômetros, tanques, LEDs, texto, e gráficos.

### **Programação no modo texto**

Neste ambiente de desenvolvimento o **código do programa** é realizado no modo texto mediante a escrita dos códigos próprios da linguagem utilizada e a **interface com o usuário** mediante uma interface visual orientada a objetos, esta interface tem por finalidade permitir o desenvolvimento rápido das aplicações *windows* com o mínimo de codificação manual, p/ex. o ambiente de programação C++ *Builder*.

Segundo a BORLAND (2003) o C++ *Builder* disponibiliza uma extensa biblioteca de classes chamada VCL reutilizáveis. Inclui também uma completa coleção de ferramentas RAD (*Rapid Application Development* - Desenvolvimento Rápido de Aplicativos).

Quando se inicia este programa, se é imediatamente colocado com o ambiente de programação visual. É com este ambiente que o C++ *Builder* disponibiliza todas as ferramentas que se necessita para criar, desenvolver, testar, e *debugar* as aplicações.

## CAPÍTULO 3 CONCEPÇÃO DO PROTÓTIPO

### 3.1 Princípio de funcionamento

#### 3.1.1 Módulos propostos

Na literatura pesquisada foi possível encontrar informação específica sobre os diversos elementos constituintes de máquinas para grandes formatos (2.5 Análise de elementos para máquinas de formatos grandes), mas não foi possível encontrar informação detalhada sobre a forma em que a informação transmitida à impressora é processada para logo ser convertida em sinais de acionamento dos servomotores e bicos ejetores do cartucho de impressão.

Neste sentido o princípio de funcionamento da impressora de formato extra-largo foi concebido integralmente no âmbito deste projeto. A primeira etapa deste processo como apresentado na Fig. 57, foi a sub-divisão do projeto em três módulos:

- Módulo de pós-processamento
- Conjunto impressor
- Cabeçote impressor

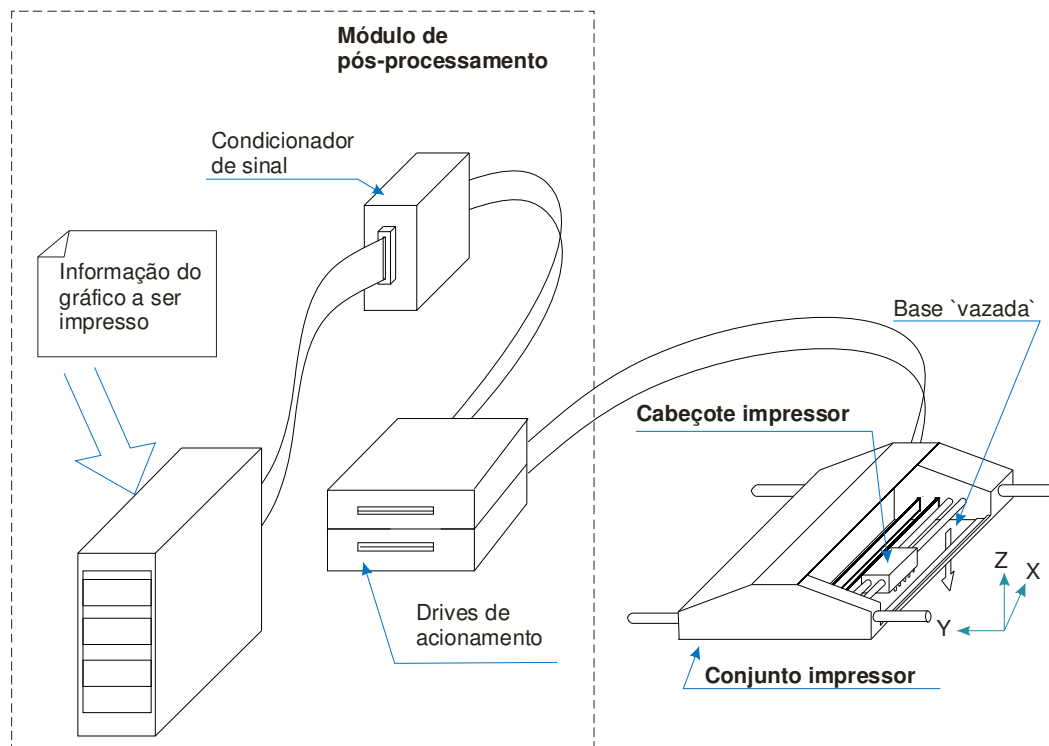


Fig. 57. Esquema do sistema impressor *raster* de formato extra-largo.

### **Módulo de pós-processamento**

O módulo de pós-processamento é encarregado de realizar várias tarefas no sistema impressor proposto, através de um *software* gerenciador implementado no computador hospedeiro (veja, "APÊNDICE 5 Principais algoritmos do *software* gerenciador"), este módulo deve inicialmente obter a informação de impressão do gráfico a ser produzido, processar este elevado fluxo de informações gráficas-geométricas e gerar uma matriz de posicionamento X-Y do cabeçote impressor para cada bico ejetor a ser utilizado.

Para cada elemento desta tabela o *software* gerenciador deverá determinar mediante algoritmos apropriados os sinais de controle necessários para que os acionamentos posicionem o cabeçote impressor nas coordenadas estabelecidas. Os sinais de controle gerados no computador hospedeiro para funcionamento dos acionamentos e bicos ejetores são amplificados nos seus respectivos *drives* para níveis adequados ao seu funcionamento.

- Obtenção da informação de impressão

A informação de impressão que existe nos arquivos de gráficos são as características que definem a imagem nela armazenada. Existem dois tipos de arquivos gráficos, um do tipo *bitmap* onde a imagem é formada pela composição de pontos e outro do tipo vetor onde a imagem é formada pela composição de figuras geométricas.

Os arquivos gráficos do tipo vetor mais comuns são os chamados PDL (*Page Description Language*). Estes arquivos descrevem as características da imagem a ser impressa com base em objetos geométricos tais como linhas, arcos e círculos em enunciados de séries matemáticas. O maior benefício é que estes arquivos permitem que os *softwares* aplicativos sejam independentes do dispositivo físico impressor, em oposição ao caso comum, em que rotinas específicas devem ser escritas para cada dispositivo. Entre as principais PDL estão a PCL, HPGL e *PostScript*.

Os arquivos gráficos do tipo *bitmap* descrevem as características da imagem a ser impressa a partir de uma especificação da cor de cada ponto e sua posição x,y no gráfico.

A informação de impressão do tipo *bitmap* é a utilizada pelas impressoras do tipo *raster* como é o caso do projeto proposto, já a informação do tipo vetor é a utilizada pelos *plotters*. Neste sentido serão estudados neste projeto os arquivos gráficos do tipo *bitmap*. Para obter esta informação existem dois métodos:

O primeiro, é uma **aquisição via software** onde se obtém esta informação diretamente do arquivo a ser impresso. Neste método é necessário decifrar o código binário hexadecimal do arquivo correspondente. Neste arquivo são encontradas todas as informações referentes ao gráfico, isto é o tamanho do gráfico em pixels, número de filas e colunas, para cada ponto sua cor e sua posição x,y, e dependendo do modelo de cor, o matiz, a saturação, o brilho, etc. Para validar este método foi desenvolvido no sistema impressor proposto um programa que efetua a decodificação de figuras em formato BMP realizadas no modo de cores "preto e branco de 1 bit". (ver APÊNDICE 2 Exemplo de decodificação do código binário).

Neste método quando terminada a decodificação de um gráfico colorido, ainda é requerido uma transformação do sistema de cores RGB que utiliza a tela do computador, para o sistema CMY que utiliza a impressora, p/ex. se no gráfico apresentado na tela do computador temos uma figura em vermelho, na impressora deverão ser acionados o magenta e o amarelo para obter o vermelho requerido.

Como toda a informação sobre o gráfico a ser produzido é repassada à impressora enquanto está imprimindo, o segundo método utilizado é a aquisição da informação de impressão **via hardware** em tempo real diretamente da impressora, com este objetivo é utilizada uma interface de aquisição (Fig. 60e Fig. 132, APÊNDICE 4 Fotos dos componentes do sistema impressor *raster*) que é inserida numa impressora comercial de mesa para folhas *letter / A4* aqui chamada de "impressora fonte". Os sinais adquiridos são transformados no condicionador de sinal em níveis apropriados para serem processados pela placa de aquisição digital I/O instalada no computador hospedeiro.

Este segundo método é independente do sistema operacional utilizado e do programa gráfico empregado na confecção da figura, sendo somente necessário que a impressora fonte esteja corretamente instalada no computador. Pode-se observar que nestas condições o sistema impressor proposto não depende de nenhum *driver* (*software*) de impressão instalado, nem de nenhum programa graficador específico,

isto significa que o usuário pode empregar todos os programas que normalmente utiliza para realizar uma impressão em formato extra-largo no sistema proposto. Só há necessidade de um trabalho adicional prévio de preparação e execução de uma pré-impressão para leitura dos dados.

Em comparação com o método via *software* neste segundo método não é necessário nenhum tipo de transformação de sistemas de cores (do RGB da tela do computador para CMY da impressora).

### **Conjunto impressor**

No sistema impressor *raster* proposto, o conjunto impressor como mostrado na Fig. 57 se movimenta ao longo do eixo Y, e o cabeçote impressor ao longo do eixo X. O conjunto impressor é constituído pela estrutura do protótipo onde estão dispostos os acionamentos e transmissão de ambos os eixos e o cabeçote impressor com suas guias de deslocamento e sistema de realimentação translativo.

Os sistemas de movimento do tipo pórtico X-Y aplicados a impressores *raster* possuem um princípio de funcionamento especial. A impressão dos pontos é *on the fly*, isto significa que os bicos ejetores são acionados ao alcançar a posição no eixo X estabelecida para realizar o ponto de impressão, sem a necessidade de parar o cabeçote impressor no local. Durante a impressão de uma linha da mídia, o eixo X se encontra em movimento com o cabeçote impressor funcionando, enquanto o eixo Y está bloqueado. Quando o eixo X termina sua trajetória este retorna, finalizando seu ciclo e o eixo Y é novamente acionado posicionando-se para próxima linha de impressão.

A partir deste princípio de funcionamento, pode-se verificar que:

- o eixo Y funciona como um posicionador ponto-a-ponto incremental e
- o eixo X atua como um movimentador ponto-a-ponto do cabeçote impressor enquanto este realiza a impressão *on the fly*.

### **Cabeçote impressor**

Este módulo realiza a impressão propriamente dita. É constituído de bicos ejetores de tinta acionados por comando de um sinal elétrico. Uma vez posicionado pelo conjunto impressor na linha de impressão, o cabeçote impressor é transportado ao



longo do eixo X recebendo do módulo de pós-processamento os sinais de impressão *on the fly*.

A impressão *on the fly* pode ser realizada pelo cabeçote mediante dois princípios de funcionamento:

- A primeira, onde é iniciado o processo de impressão quando o cabeçote entra em regime permanente de velocidade, momento no qual são enviados à frequência constante os comandos aos bicos ejetores para aplicação da tinta sobre a superfície a ser impressa. Este tipo de impressão só é possível com controle realimentado de velocidade. Com este tipo de funcionamento, a boca de impressão diminui, já que é necessária uma distância de aceleração. Para que este princípio de funcionamento seja adequado e atenda as especificações realizadas no item "1.4 Requisitos de projeto", é necessário que o controle de velocidade não permita oscilações tais que os pontos realizados se juntem ou afastem entre si mais do que um diâmetro de ponto (veja Fig. 115).
- A segunda maneira de impressão é quando o comando dos bicos ejetores é sincronizado com a informação da distância percorrida do cabeçote impressor, independentemente da sua velocidade. Para isto é necessário medir permanentemente a posição do cabeçote impressor, caracterizando assim um sistema em malha fechada de posição. Este tipo de funcionamento permite utilizar toda a boca de impressão do conjunto impressor.

### 3.1.2 Definição das funções do sistema e escolha da melhor opção de realização

Com base nos módulos propostos para o protótipo do sistema impressor foram estabelecidas as seguintes funções constituintes do sistema.

1. Função obtenção da informação a ser impressa  
Dedicada a obter a informação de impressão (cor, coordenadas x-y no gráfico) da mídia a ser impressa.
2. Função comando / controle de movimento e sinais digitais I/O  
Dedicada a controlar o movimento dos servomotores dos dois eixos do sistema impressor e o comando dos bicos ejetores de tinta do cabeçote impressor.
3. Função gerenciamento do sistema  
Dedicada a gerenciar (via *software*) quando e como devem ser realizados os movimentos dos eixos e o acionamento dos bicos do cabeçote impressor.

4. Função medição de deslocamento translativo  
Dedicada a realizar a medição do deslocamento translativo em cada um dos eixos.
5. Função acionamento dos eixos  
Dedicada a movimentar os dois eixos do sistema quando requeridos.
6. Função deslocamento translativo  
Dedicada a permitir o deslocamento dos eixos de uma maneira precisa e com um mínimo de folga.
7. Função estrutura de sustentação  
Dedicada a proporcionar uma estrutura de sustentação de todas as partes constituintes do sistema proposto.
8. Função concepção estrutural  
Função que definirá o tipo de projeto estrutural que será implementado no protótipo.
9. Função impressão digital  
Dedicada a realizar a deposição da tinta mediante os bicos ejetores do cabeçote impressor.

Considerando estas funções definidas para o sistema impressor e a pesquisa realizado no CAPÍTULO 2 ESTADO DA ARTE e no item 2.5 Análise de elementos para máquinas de formatos grandes, a Tabela 5 apresenta a matriz morfológica do Sistema (BACK, 1993), na qual são apresentadas as diversas soluções para cada uma das funções do produto, sendo que, cada combinação destas funções poderia representar uma possível concepção do Sistema.

Para o protótipo do sistema impressor proposto, mediante uma análise técnica e financeira, foram escolhidas as seguintes soluções para cada função.

#### **Função obtenção da informação a ser impressa**

Nesta primeira versão do protótipo de sistema impressor desenvolvido, esta função será realizada mediante os dois métodos descritos, via *software* que é mais rápido quando o arquivo a ser impresso está em preto e branco e via *hardware* quando a impressão é colorida.

### Função comando / controle de movimento e sinais digitais I/O

Seguindo as últimas tendências nos projetos de controladores CNC a função de aquisição e controle de movimento do sistema impressor utilizará placas do tipo PCI de arquitetura aberta baseada em PC, como já foi comentado no item 2.5.5 Comando / controle de movimento e sinais digitais, pela abertura proporcionada por esta configuração para desenvolver e customizar as funções específicas requeridas.

Tabela 5. Matriz morfológica do Sistema.

FUNÇÃO	SOLUÇÃO			
<b>1. Obtenção da Inf. a ser impressa</b>	<i>Software</i>	<i>Hardware</i>		
<b>2. Comando/ctrl de movimentos e I/O</b>	Arquitetura modular	Arquitetura aberta		
<b>3. Gerenciamento do sistema</b>	Programação mediante ambiente texto, p/ex. C++	Programação mediante ambiente gráfico, p/ex. LabVIEW		
<b>4. Medição de deslocamento translativo</b>	<i>Encoder rotativo</i>	<i>Encoder translativo óptico encapsulado</i>	<i>Encoder translativo óptico sem contato</i>	<i>Encoder translativo indutivo sem contato</i>
<b>5. Acionamento dos eixos</b>	Servomotor linear	Servomotor rotativo + transmissão (Correia sincronizadora dentada ou Cabo de aço)		
<b>6. Deslocamento translativo</b>	Guias de deslizamento	Guias cilíndricas de rolamento com esferas recirculantes	Guias <i>Slide Pack</i> de rolamento com esferas recirculantes	
<b>7. Estrutura de sustentação</b>	Perfis de Aço	Perfis de Alumínio		
<b>8. Concepção estrutural</b>	Rolo Cabeçote	Pórtico X-Y		
<b>9. Impressão digital</b>	Jato de tinta Piezo-Elétrico	Jato de tinta Térmico	Válvulas Integradas	Adaptação de aerógrafos

### **Função gerenciamento do sistema**

O *software* gerenciador do módulo de pós-processamento, será implementado num ambiente de programação gráfico devido principalmente à forte integração com o *hardware* utilizado e as múltiplas funções já existentes e disponibilizadas na Internet para monitoramento e controle de processos industriais (veja item 2.5.6 Gerenciamento do sistema)

### **Função medição de deslocamento translativo**

Para esta função foram escolhidas as escalas digitais de medição de deslocamento por permitir medir maiores distâncias em comparação aos transdutores analógicos (FLESCHE, 1993).

Para o módulo de medição da posição linear do sistema impressor foi estabelecida a utilização de um *encoder* translativo porque este sistema permite obter o valor do deslocamento de forma direta, evitando assim, os erros causados pelo sistema de transmissão (ver item, 2.5.4 Sistema de medição de deslocamento ).

Entre os *encoders* translativos foram desconsiderados, o *encoder* translativo óptico encapsulado, já que este não é construído para os comprimentos solicitados e o *encoder* translativo óptico sem contato devido a que o sistema funciona principalmente com jatos de tinta o que eventualmente poderia sujar a escala reflexiva causando uma má leitura do cabeçote. Assim, o dispositivo definido para esta medição é um *encoder* translativo indutivo sem contato, mas inicialmente, a primeira versão do protótipo desenvolvido utiliza o *encoder* rotativo acoplado na parte traseira do servomotor para realizar esta medida.

### **Função acionamento dos eixos**

Inicialmente, considerando que o comprimento do sistema impressor no eixo Y (Fig. 57) é de 9 m, um servomotor linear destas dimensões resultará de um custo muito elevado, já um acionamento rotativo com um sistema de transmissão será mais adequado, e atende as necessidades do projeto (suavidade de movimento, alta dinâmica, etc.) motivo pelo qual foi escolhido para ser implementado em ambos os eixos do sistema impressor.

Como o sistema impressor utilizará um *encoder* translativo para realizar a realimentação da posição, a deformação dos dentes das correias sincronizadoras

não influenciaram no posicionamento do sistema (ver item, 2.5.2 Acionamento dos eixos). Assim, serão utilizadas para a transmissão do movimento, correias sincronizadoras em ambos os eixos do sistema impressor.

### **Função deslocamento translativo**

As guias a serem utilizadas serão de rolamentos com esferas recirculantes de precisão já que a carga a ser transportada está na ordem das dezenas de kgf, e deve ser realizada com alta dinâmica, além destes requerimentos estas guias como já mencionado (item, 2.5.3 Guias para deslocamento ) proporcionam um movimento contínuo, suave, com baixo coeficiente de atrito e elevada precisão.

### **Função estrutura de sustentação mecânica**

A estrutura do sistema impressor será realizada com perfis de alumínio por serem mais leves que os perfis de aço, e principalmente por dispor de unidades e acessórios prontos para posicionamento de precisão e transporte de cargas como apresentado no APÊNDICE 3 Perfis e unidades de acionamento em alumínio.

### **Função concepção estrutural**

O projeto estrutural do sistema impressor pode ser do tipo rolo-cabeçote ou pórtico X-Y como apresentados no item "2.1.3 Concepção estrutural".

A concepção estrutural a ser escolhida deve permitir realizar a impressão diretamente sobre a superfície final fixa que pode ser rígida (p/ex. baús de caminhão, chapas de aço, acrílico) ou flexível (p/ex. papel, plástico, lona, etc.).

De esta maneira, o projeto rolo-cabeçote ilustrado na Fig. 11 a) que só permite a impressão sobre superfícies flexíveis foi o primeiro a ser desconsiderado.

Os projetos, rolo-cabeçote apresentado na Fig. 11 b) e pórtico X-Y apresentado na Fig. 12, permitem a impressão sobre superfícies tanto flexíveis como rígidas. Mas só o projeto pórtico X-Y permite a impressão diretamente sobre a superfície final fixa devido a que nesta concepção não é necessário movimentar a mídia a ser impressa. É por estes motivos que a concepção estrutural a ser implementada no protótipo do sistema impressor será do tipo pórtico X-Y.

### **Função impressão digital**

O projeto proposto utilizará a tecnologia jato de tinta ou similar como dispositivo impressor por ser um sistema de impressão presente no mercado nas mais diversas aplicações, permitindo assim, um fácil acesso a esta tecnologia e seus insumos.

Comparando os dispositivos impressores apresentados na Tabela 3, os dispositivos de alta resolução são desconsiderados, primeiro, por custar de 8 a 10 vezes mais do que os de baixa resolução e segundo, por apresentar uma resolução acima da estipulada nos requerimentos do mercado a ser atendido.

Assim, a função impressão digital, considerará duas alternativas, a primeira com o cabeçote válvula-solenóide com tinta sob-pressão por ser de funcionamento mais simples o que facilitará sua utilização e uma segunda com aerógrafos adaptados para funcionamento automático. Isto principalmente porque os aerógrafos permitem uma maior flexibilidade na utilização de diversos tipos de tinta, o que não acontece com o primeiro que utiliza somente as tintas fornecidas pelo fabricante.

Para realizar a função de impressão *raster* no sistema impressor, foi selecionado entre as diferentes tecnologias de impressão de baixa resolução o cabeçote, válvula-solenóide com tinta sob-pressão, por apresentar uma disposição individual para acionamento de cada bico e não na forma de um mono bloco como o caso do processo de impressão, válvula integrada (I.V.). Esta característica permitirá uma maior flexibilidade na adaptação e localização da válvula-solenóide no cabeçote de impressão.

#### 3.1.3 Definição preliminar da solução proposta

Escolhidas as soluções para cada função o protótipo do sistema impressor proposto estará constituído no **módulo de pós-processamento** de controladores CNC do tipo PCI de arquitetura aberta baseada em PC, o programa gerenciador será realizado em ambiente gráfico de programação e obterá a informação de impressão mediante os dois métodos descritos (via *software* e via *hardware*).

O **conjunto impressor**, Fig. 58, estará constituído de acionamentos com servomotores rotativos em ambos os eixos e correias sincronizadoras dentadas com polias como módulo de transmissão. A realimentação da posição translativa será

mediante *encoder* translativo indutivo aberto sem contato. A concepção estrutural do conjunto impressor será do tipo pórtico X-Y utilizando perfis padronizados de alumínio. Os componentes móveis do conjunto impressor estarão dotados de castanhas de esferas recirculantes que apoiados sobre guias cilíndricas de precisão realizarão seu movimento.

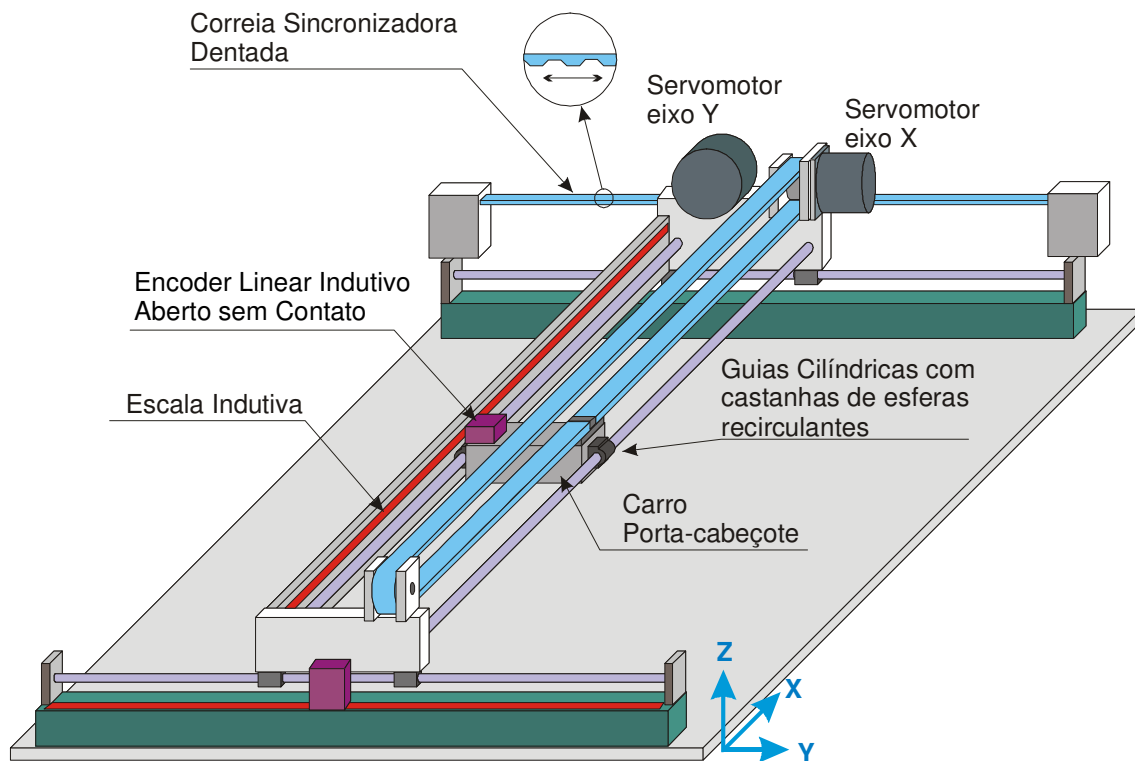


Fig. 58. Esquema dos componentes mecânicos definidos para o conjunto impressor.

Finalmente o **cabeçote impressor** estará constituído do sistema de impressão a jato de tinta "válvula solenóide com tinta sob-pressão", que acionará a cada sinal do módulo de pós-processamento o bico selecionado.

### 3.2 Detalhamento do protótipo

Definidas as soluções para cada função do protótipo do sistema impressor, neste capítulo será realizado o detalhamento do *hardware* requerido para construção do protótipo do sistema impressor proposto.

### 3.2.1 Cabeçote impressor

#### **Cabeçote de válvulas-solenóide**

O dispositivo de impressão do tipo válvula-solenóide escolhido para a **função impressão digital** é o modelo Unicorn da marca MARSH (2003), sua velocidade de impressão de caracteres varia de 6 a 67 m/min, com tensões de trabalho de 90 a 240 volts. Seu redutor de pressão (Fig. 20) baixa a pressão aproximadamente a 3 PSI que é a pressão de trabalho do solenóide. O valor da tensão necessária para acionamento do solenóide é de 12 V com uma corrente de 3,4 A (para os 7 bicos).

Segundo o representante destes cabeçotes (MASCAGNI, 2001) ao variar o tempo de acionamento do solenóide, numa faixa de 0,5 ms (2000 Hz) a 0,7 ms (1428 Hz), podem-se conseguir diferentes diâmetros de pontos como verificado nos testes de impressão apresentados na Fig. 113. Nestes ensaios o diâmetro do ponto requerido, de 1,8 mm é obtido a uma freqüência de acionamento dos bicos ejetores de 1900 Hz, sendo este diâmetro de ponto requerido foi deduzido a partir da análise da Fig. 50 realizada no item "Imagem e resolução visual" do sub-capítulo "2.4.3 A visão".

Com este dispositivo de impressão, a seguir serão realizados os cálculos da velocidade de impressão do sistema impressor em metros quadrados por hora e a máxima freqüência de acionamento dos bicos ejetores.

#### **Cálculo da velocidade de impressão**

Considerando que a máxima velocidade de impressão do módulo válvula-solenóide com tinta sob-pressão, é de 67 m/min ( $v_x=1,12$  m/s), e estabelecendo que esta velocidade deve ser atingida em no máximo 4 % (0,14 m) do comprimento efetivo de deslocamento do cabeçote (3500 mm), o tempo total de deslocamento no eixo X é de  $t_x=3,4$  s, como calculado no "APÊNDICE 1 Determinação dos acionamentos do sistema impresso".

Uma vez impressa uma linha em 3,4 s, o conjunto impressor deve-se deslocar 12 mm no eixo Y para posicionar o cabeçote impressor na próxima linha (ver item, 2.3.5 Válvula-solenóide com tinta sob-pressão), considerando um tempo mínimo para este posicionamento igual a 10 % do tempo total utilizado pelo eixo X,  $t_y=0,34$  s o tempo total de impressão ( $t_i$ ) de uma linha será

$$t_i = t_x + t_y$$

$$t_i = 3,38 + 0,34$$

$$\mathbf{t_i = 3,72 s}$$



$t_i$ : tempo total de impressão de uma passada do Conjunto Impressor, s

$t_y$  : tempo de deslocamento do eixo Y por linha de impressão, s

Assim, a velocidade de impressão em área será:

$$A_p = l_x * l_y$$

$$A_p = 3,5 * 0,012$$

$$\mathbf{A_p = 0,042 \text{ m}^2}$$

$$v_i = \frac{A_p}{t_i}$$

$$v_i = \frac{0,042}{3,72} * \frac{3600}{1}$$

$$\mathbf{v_i \approx 40 \text{ m}^2/\text{h}}$$

$A_p$ : área impressa numa passada do cabeçote impressor,  $\text{m}^2$

$v_i$ : velocidade de impressão do sistema impressor,  $\text{m}^2/\text{h}$

$l_y$  : deslocamento do eixo Y por linha de impressão, 0,012 m

### Projeto mecânico do cabeçote de válvulas-solenóides

Como foi mostrado na Fig. 20, os principais componentes deste sistema de impressão são o bloco constituído dos bicos ejetores, os solenóides e o distribuidor/reductor de pressão de tinta. Com esta configuração, para cada cor serão necessários um bloco de bicos que emprega sete ejetores e um distribuidor / reductor. A Fig. 59 apresenta o projeto do cabeçote para o preto e as três cores básicas do sistema RGB (vermelho, verde, azul).

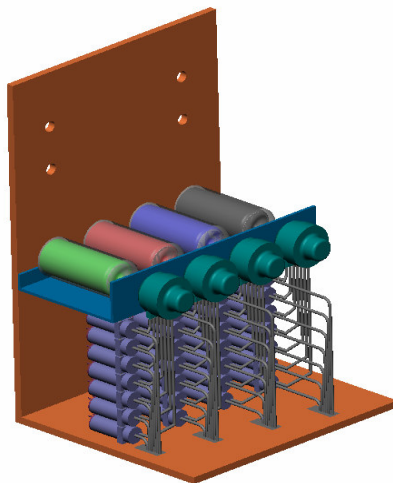


Fig. 59. Cabeçote de Impressão utilizando válvulas solenóide como dispositivos de impressão.

### 3.2.2 Módulo de pós-processamento

A **função obtenção da informação a ser impressa** deste módulo tem duas alternativas, uma delas é a aquisição via *hardware*, Fig. 60, onde os sinais monitorados da impressora fonte, pela interface de aquisição, são transformados no condicionador de sinal, a níveis apropriados para serem adquiridos pela placa de aquisição digital I/O do computador hospedeiro (veja APÊNDICE 6 Principais esquemas eletro-eletrônicos).

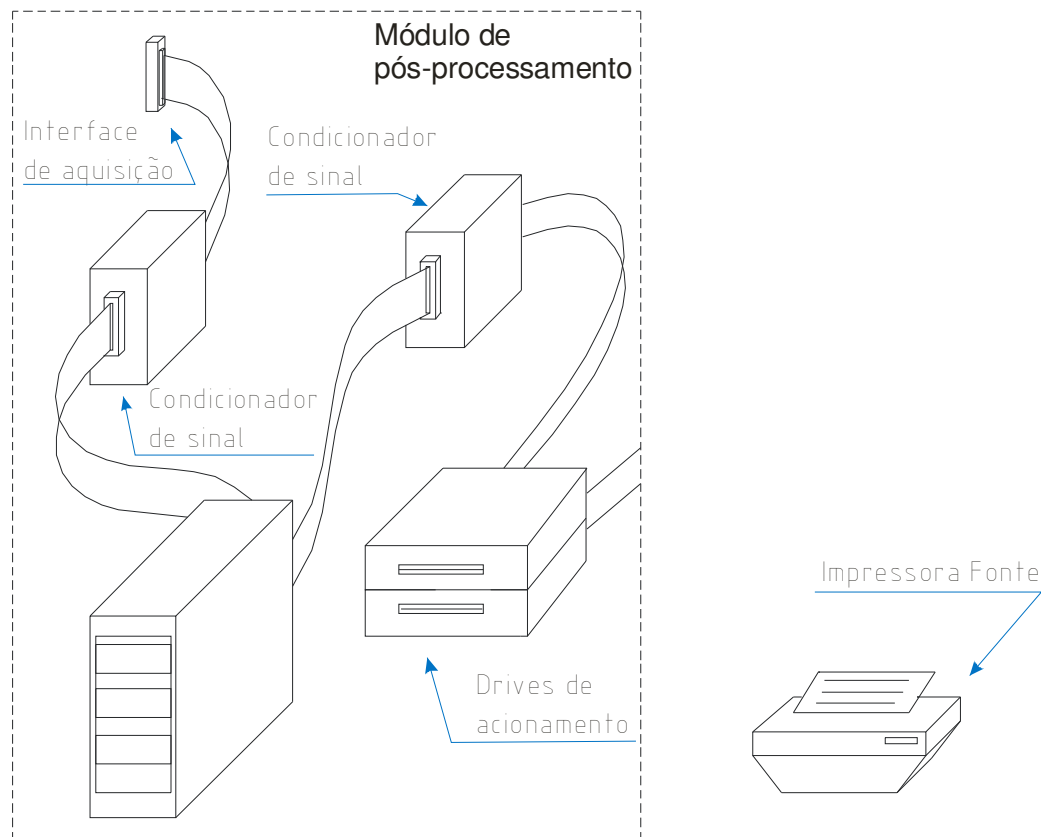


Fig. 60. Aquisição da informação de impressão via *hardware*.

Por tanto para especificar a placa I/O deste método, foi necessário conhecer a máxima freqüência com que os sinais da impressora fonte trabalham. Estas informações foram inicialmente obtidas mediante a sua medição com um osciloscópio como mostra a Fig. 61, onde os dois primeiros gráficos representam os dois canais em quadratura do *encoder* e os dois sinais seguintes de impressão.

A partir deste gráfico determinou-se que o mínimo período de sinal na impressora fonte está na ordem dos 20  $\mu$ s o que corresponde a 50 kHz (1/0,020 ms).

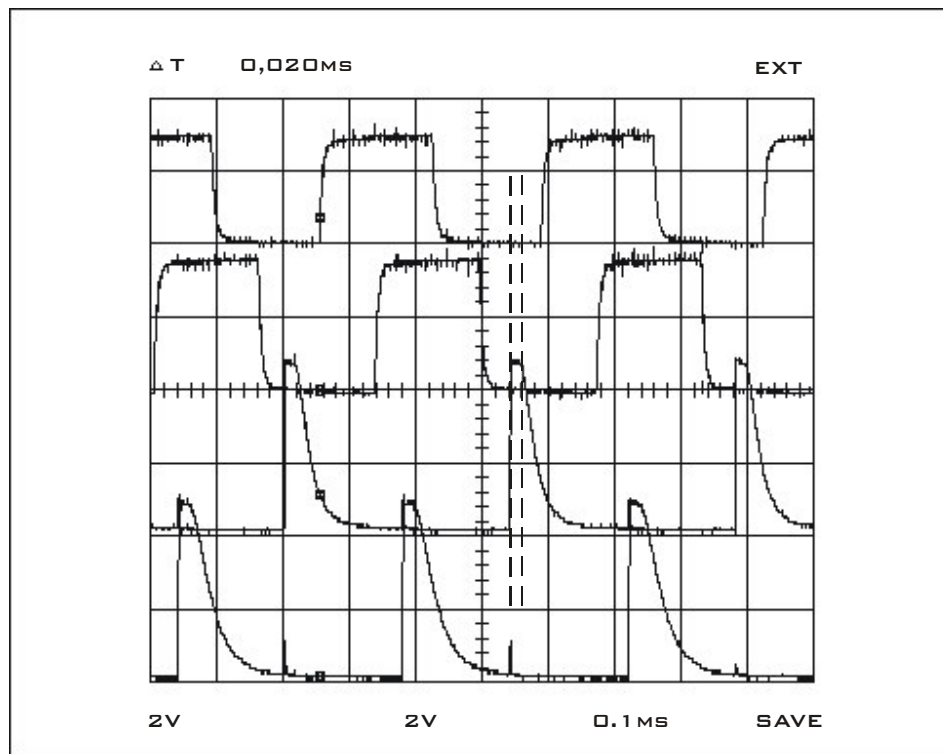


Fig. 61. Frequência dos sinais na impressora fonte, tela do osciloscópio.

Com a informação das máximas freqüências com que o protótipo do sistema impressor proposto trabalha, pode-se especificar a placa digital que será instalada no barramento do computador hospedeiro para a **função comando / controle de movimento e sinais digitais I/O**.

Como a placa digital I/O deve realizar dois trabalhos, um de aquisição dos sinais da impressora fonte e a de acionamento dos bicos do cabeçote impressor, com freqüências de 50kHz e 700 Hz respectivamente, a placa especificada para este trabalho deve ser de 10 a 50 vezes mais rápida (FLESCH, 2003) que a máxima freqüência (50 kHz) isto significa ter como mínimo uma taxa de amostragem de 2,5 MSamples/s (MS/s).

A placa digital I/O escolhida para esta função é da National Instruments modelo PCI-DIO-32HS, que tem uma taxa de amostragem de 3,33 MS/s para operação em 32 bits. Possui 32 linhas I/O, pode iniciar e parar a aquisição mediante *trigger* externo, adquirir dados com freqüência definida ou quando alguma das linhas muda de estado.

A especificação da placa de controle de movimento da **função comando / controle de movimento e sinais digitais I/O**, teve em consideração principalmente o número

de eixos do sistema proposto (dois, X e Y) e o sistema de leitura de re-alimentação da posição (sinais digitais).

A placa escolhida é da National Instruments modelo PCI-7344, que pode controlar até 4 eixos (servomotores ou motores de passo) independentes ou coordenados mediante sinais analógicos de comando na faixa de  $\pm 10$  V. A realimentação da posição pode ser digital ou analógica. A máxima taxa de aquisição de sinais digitais (*encoder*) na realimentação é de 20 MHz. Possui linhas digitais dedicadas para monitoração dos fins de curso entre outras funções.

Como apresentado na Fig. 62, para que ambas as placas se comuniquem com os sensores e acionamentos da planta eletro-mecânica é necessário um condicionador de sinais para levar todos os níveis de tensão aos apropriados para seu funcionamento.

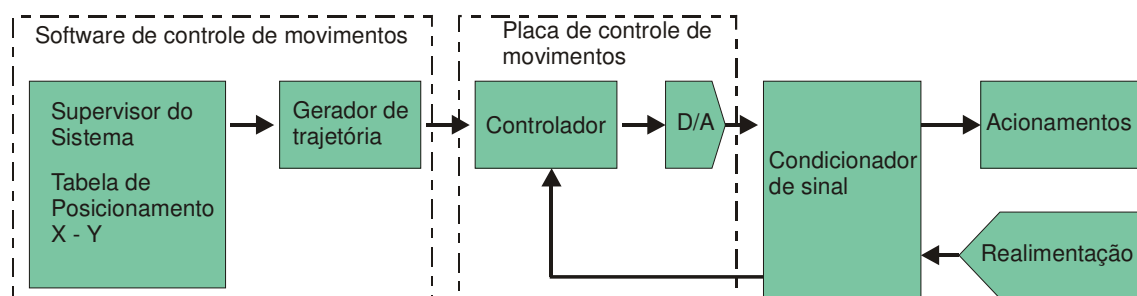


Fig. 62. Diagrama de blocos do controlador de movimento.

Esta placa em conjunto com o *software* de controle de movimento e a realimentação da posição em ambos os eixos, realiza os movimentos definidos no módulo “gerador de trajetória” a partir dos dados armazenados no “supervisor do sistema” Fig. 62, isto é, p/ex., geração de um posicionamento instantâneo, posicionamento trapezoidal ponto a ponto, controle de partida, parada, aceleração, desaceleração, velocidade de cruzeiro, etc.

A eletrônica do condicionador de sinal apresentado na Fig. 133 do "APÊNDICE 4 Fotos dos componentes do sistema impressor *raster*", foi integralmente desenvolvida para o projeto do sistema impressor proposto (veja, APÊNDICE 6 Principais esquemas eletro-eletrônicos).

A tela de interface com o usuário do *software* de controle desenvolvido para gerenciar o funcionamento do sistema impressor, ler o gráfico a ser impresso, definir parâmetros e iniciar a impressão das figuras em formato extra-largo é apresentada na Fig. 63, em maior detalhe este programa é apresentado no "APÊNDICE 5 Principais algoritmos do *software* gerenciador".

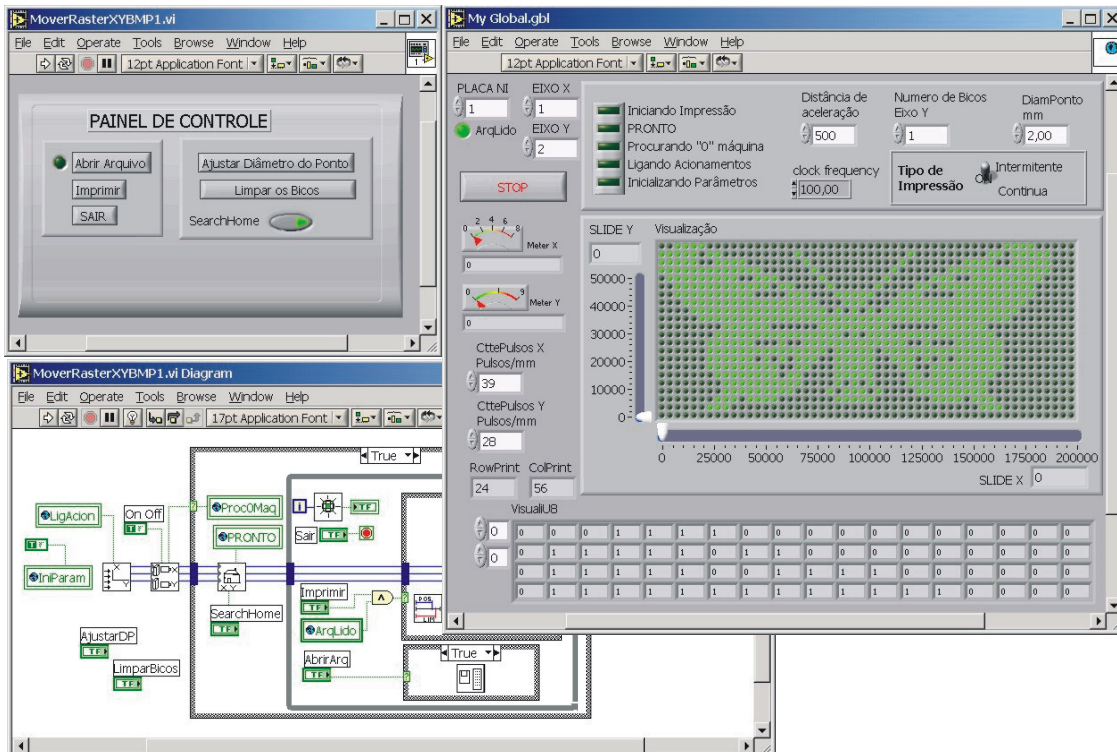


Fig. 63. Tela de interface com o usuário do *software* gerenciador do sistema e programa principal em código gráfico.

### 3.2.3 Conjunto impressor

O modelo preliminar realizado do conjunto impressor utilizará para a **função estrutura de sustentação**, os perfis padronizados de Al com unidades e acessórios disponíveis para posicionamento e transporte de carga, da marca SCHÜCO DESIGN. Estes perfis de alumínio devido à forma da sua seção são resistentes a curvaturas e torções permitindo assim projetá-los para longos comprimentos sem suportes intermediários. A concepção e fabricação deste módulo foram realizadas considerando este dispositivo mecânico como um sistema de precisão enquadrado na mecânica fina.

Mediante o *software* CAD SolidWorks foi realizado o projeto completo da estrutura mecânica do sistema impressor como apresentado na Fig. 64. O protótipo em execução é para 3,5x2,0 m, mas está prevista sua ampliação para ser do comprimento solicitado 3,5x9m.

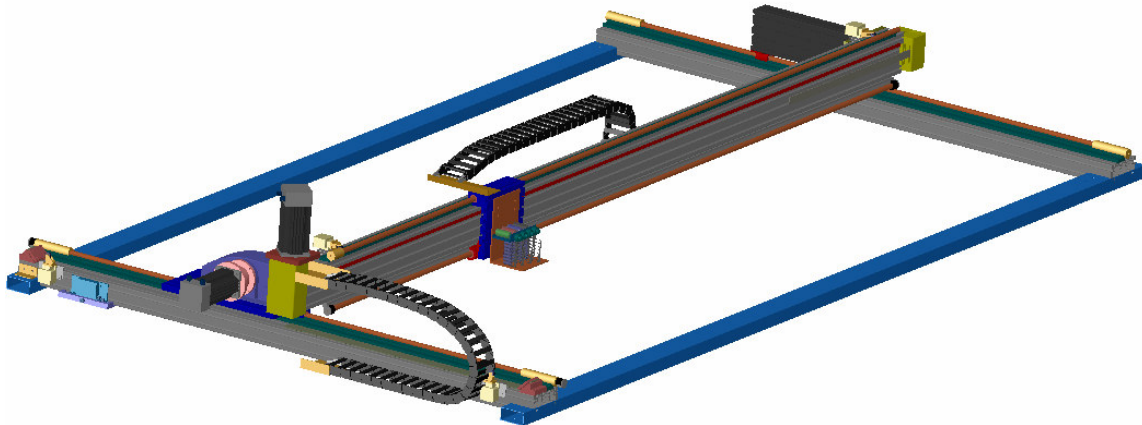


Fig. 64. Estrutura mecânica do protótipo do conjunto impressor.

As figuras a seguir mostram detalhes do projeto mecânico.

Fig. 65 a) mostra a disposição do perfil base do eixo Y onde foi montado a guia de precisão e a ancoragem da correia fixa.

Fig. 65 b) mostra o dispositivo de movimentação do eixo Y com o servomotor acoplado e a segunda ancoragem da correia fixa.

Fig. 65 c) mostra a disposição do perfil no eixo X, a fixação das guias, o fim de curso mecânico e a unidade de desvio da correia.

Fig. 65 d) apresenta a montagem do cabeçote impressor no eixo X do sistema.

Já a Fig. 134 do "APÊNDICE 4 Fotos dos componentes do sistema impressor *raster*" apresenta a foto do protótipo do conjunto impressor construído a partir do projeto CAD.

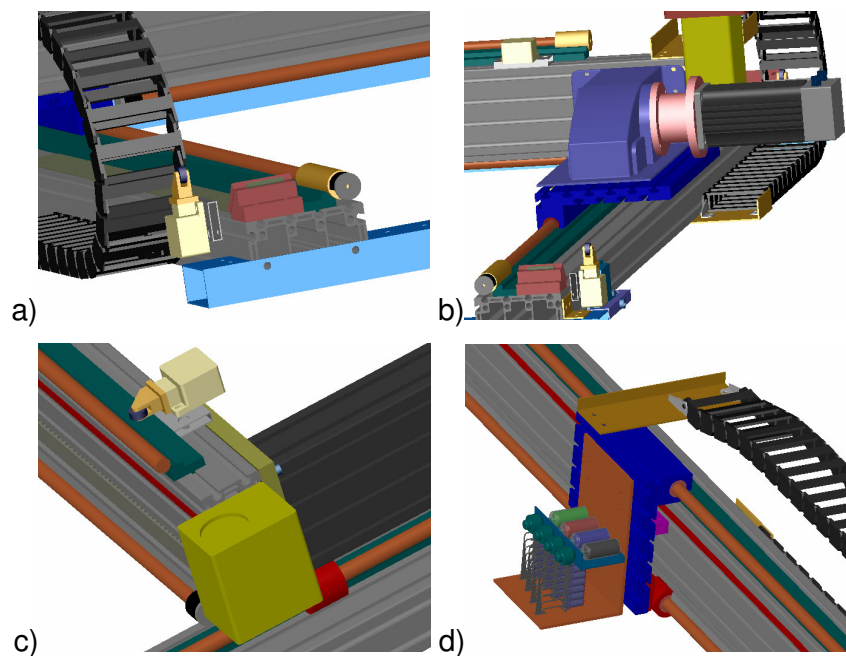


Fig. 65. Detalhes do projeto mecânico do protótipo do sistema impressor.

A **função medição de deslocamento translativo** para realimentação da posição será implementada mediante o *encoder* translativo indutivo, marca Dynapar. Cabeçote LR005ND3 e escala indutiva LS032NR050 com resolução de 50  $\mu\text{m}$  (0,05 mm) e incerteza de  $\pm 0,025$  mm.

Considerando que o cabeçote impressor utilizado neste primeiro protótipo realiza pontos de 1,8 mm de diâmetro (14 dpi) o erro de posicionamento requerido é 0,18 mm (1/10 do diâmetro do ponto, veja item "1.4 Requisitos de projeto"), como o sistema de medição escolhido tem uma incerteza de 0,025 mm significa que este é sete vezes melhor que o requerido. Como explicado na Fig. 66, com este *encoder* translativo é possível imprimir pontos com um erro de 1,39 % no posicionamento devido a incerteza.

$$\begin{aligned} \phi_{\text{ponto}} &= \frac{25,4 \text{ mm}}{\text{dpi}} \\ \phi_{\text{ponto}} &= \frac{25,4 \text{ mm}}{14} \\ \phi_{\text{ponto}} &= 1,80 \text{ mm} \end{aligned}$$

Incerteza  
0,025 mm

1,80

$$\text{Erro} = \frac{0,025 \cdot 100}{1,80}$$

**Erro=1,39 %**

Fig. 66. Erro de posicionamento na realização dos pontos de impressão.

### Determinação da freqüência de sinais gerados pelo *encoder*

Como a velocidade do cabeçote de impressão é de 1,12 m/s e o sistema de medição escolhido tem uma resolução de 50  $\mu\text{m}$  (0,05 mm = 5E-5 m), a freqüência de pulsos gerada a esta velocidade será de:

$r_e$ : Resolução do *encoder*, 5E-5 m

$t_{si}$ : Período dos sinais do *encoder*, s

$f_e$ : Freqüência dos sinais do *encoder*, Hz

$$t_{si} = \frac{r_e}{v_x}$$

$$t_{si} = \frac{5E-5}{1,12}$$

$$t_{si} = 4,46E-5 \text{ s}$$

$$f_e = \frac{1}{t_{si}}$$

$$f_e = \frac{1}{4,46E-5}$$

$$f_e = 22,4$$

$$f_e \approx 22 \text{ kHz}$$

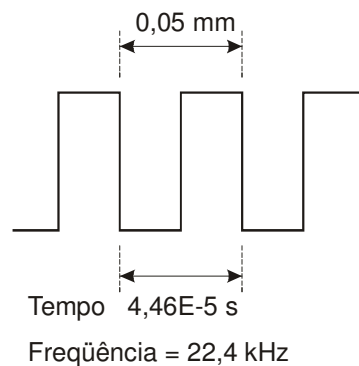


Fig. 67. Freqüência dos sinais gerados pelo *encoder* indutivo translativo.

Como a taxa máxima de aquisição de sinais do *encoder* da placa de controle de movimento é de 20 MHz e a freqüência gerada pelo *encoder* translativo é 22 kHz, a placa de controle de movimento conseguirá perfeitamente ler o trem de pulsos gerados pelo *encoder*.

A **função deslocamento translativo** será realizada com guias de precisão de 20 mm de diâmetro que permitem movimentar cargas medianas e proporcionar



posicionamentos precisos. Estas guias contam com acessórios próprios que facilitam sua montagem nos perfis de alumínio da estrutura de sustentação (Fig. 131 do "APÊNDICE 3 Perfis e unidades de acionamento em alumínio"). As unidades de deslocamento, como o carro porta-cabeçote da Fig. 135 do "APÊNDICE 4 Fotos dos componentes do sistema impressor *raster*", conta com castanhas de esferas recirculantes que se apóiam sobre as guias e garantem um movimento silencioso e com baixo atrito. Segundo o manual técnico do fabricante (SCHÜCO DESIGN, 2003) esta unidade de deslocamento permite movimentar a carga até uma velocidade de 180 m/min.

O *drive* e servomotor escolhido para o eixo X da **função acionamento dos eixos** foi considerando uma distância máxima de aceleração ( $l_{ax}$ ) correspondente a 4% (0,14 m) da distância total de deslocamento (3,5 m).

Já no eixo Y como seu deslocamento é de 12 em 12 mm que corresponde a uma linha de impressão, o servomotor e *drive* do eixo Y da **função acionamento dos eixos** foi escolhido para atender uma aceleração tal que, consiga realizar este deslocamento em 10 % do tempo total utilizado pelo eixo X durante seu movimento ( $t_y=0,34$  s).

A partir destes critérios foram determinados os acionamentos para os dois eixos como apresentado no "APÊNDICE 1 Determinação dos acionamentos do sistema impresso".

Os *drives* e servomotores selecionados são da marca WEG de industria nacional.

- Para o eixo Y, foi definido o Servomotor SWA 56.2,5-60 com o *drive* SCA 04.8/16 e o redutor da PARKER modelo PEN 090-032 S7 M000 000 000.
- Para o eixo X, o Servomotor SWA 56.2,5-60 funcionando com um *drive* igual ao do eixo Y o SCA 04.8/16.

O *drive* SWA 56.2,5-60 tem três modos de funcionamento:

1. Modo posição. Onde o sinal de referência é proporcional a uma determinada posição angular do eixo do servomotor.
2. Modo velocidade. Onde o sinal de referência é proporcional à velocidade angular do eixo do servomotor.
3. Modo torque. Onde o sinal de referência é proporcional ao torque fornecido no eixo do servomotor.

### 3.2.4 Protótipo do sistema impressor proposto

Com todas as funções do sistema detalhadas e escolhidas as soluções para cada uma delas, foi montado o protótipo do sistema impressor de formato extra-largo proposto nos ambientes do laboratório de *hardware* - LHW, como apresentado na Fig. 68. Nesta foto podem-se observar os *drives* dos servomotores de ambos os eixos, o condicionador de sinal encarregado de modificar os sinais em níveis que as placas CN do computador hospedeiro podem adquirir e o conjunto impressor contendo o cabeçote impressor.

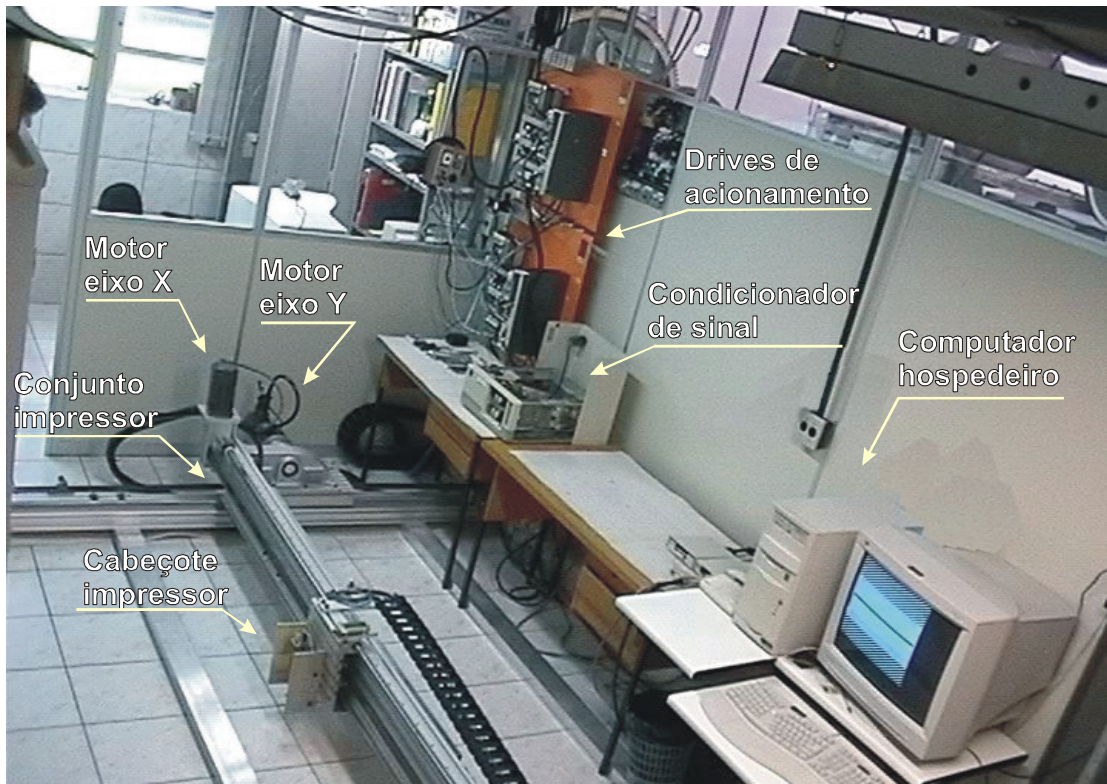


Fig. 68. Protótipo do sistema impressor de formato extra-largo.

## CAPÍTULO 4 MODELAGEM QUALITATIVA DO SISTEMA PROPOSTO

### 4.1 Introdução

Os modelos dinâmicos apresentados neste capítulo correspondem aos sistemas de movimento do tipo pórtico X-Y do "Conjunto impressor" apresentado no item "3.1.1 Módulos propostos". Cabe ressaltar que os resultados, que serão obtidos nesta análise, têm como principal objetivo ajudar a compreender melhor o comportamento dos eixos do sistema impressor de maneira qualitativa, já que:

- Os valores de vários parâmetros dos modelos tiveram que ser obtidos em exaustivo trabalho experimental uma vez que os fornecedores dos componentes utilizados informaram apenas os dados mais básicos. Nos experimentos realizados, os valores obtidos garantem apenas a ordem de grandeza dos mesmos.

- Os modelos considerarão apenas a não-linearidade devida ao atrito estático no início do movimento mediante a adição, no modelo, da força e torque necessários para por em movimento o eixo, valores obtidos durante o trabalho experimental na obtenção dos parâmetros dos modelos. Os parâmetros lineares são considerados invariantes no tempo e concentrados.

- Nos modelos sugeridos, embora estejam considerando os elementos funcionais individuais de cada componente físico do sistema (p/ex. a elasticidade da correia), seus parâmetros serão considerados invariantes em função de grandezas como posição e velocidade, diferente do que ocorre no caso real.

- Os modelos foram realizados em tempo contínuo, quando na prática estão implementados sistemas que funcionam em tempo discreto.

Entretanto este estudo tem sua maior utilidade para prever a partir das simulações, como os eixos poderão comportar-se na realidade. Este conhecimento proporciona mais facilidade para realizar o ajuste dos parâmetros do controlador e colocar em operação satisfatória o protótipo do sistema impressor.

No modelamento do sistema, especial atenção deve ser dada ao fato das dimensões do pórtico serem da ordem de metros (3,5x9,0 m) o que representa uma elevada massa incrementando consideravelmente a inércia do sistema. Uma elevada inércia afeta diretamente a qualidade de posicionamento. Dimensões avantajadas também favorecem de sobre maneira a redução de rigidez, tanto do sistema de guias quanto das transmissões.

Como a movimentação no sistema impressor proposto é do tipo seqüencial para cabeçotes *raster* (veja item "2.1.2 Tipos de movimentação do cabeçote") ambos os eixos não requerem reversão de movimentos. Devido a esta característica o erro de posicionamento por eventual histerese a causa das folgas não é relevante no funcionamento deste sistema.

O erro de posicionamento devido à histerese ocorre quando, na reversão, as folgas mecânicas (e elásticas) existentes na cadeia de transmissão, ocasionam que o servomotor gire de um determinado ângulo antes de estabelecer novamente o movimento do sistema. De acordo com Martin (1999) também não é necessário considerar nos modelos o efeito *Stick Slip* já que o sistema impressor utiliza guias com esferas recirculantes para sua movimentação e a resolução de posicionamento é apenas de 0,05 mm.

O eixo X funciona como um movimentador ponto a ponto do cabeçote impressor, a distância percorrida é determinada pelo *software* gerenciador do sistema, em função do desenho a ser impresso. Este eixo é o que apresenta uma melhor dinâmica no sistema impressor já que a carga a ser transportada é aproximadamente 1/8 da carga do eixo Y.

O acionamento do eixo X, conforme apresentado no croqui da Fig. 69 é implementado usando um *drive* para servomotor *brushless*, uma polia dentada acoplada diretamente ao eixo e envolta a ela uma correia sincronizadora com dentes de borracha e alma de aço. Esta correia é guiada por uma segunda polia na unidade de desvio, no outro extremo da guia. No trecho de movimento translativo da correia está fixado o carro porta-cabeçote impressor apoiado em guias cilíndricas com esferas recirculantes. Para realizar o controle da velocidade deste módulo eletromecânico, há uma placa de controle de movimento do tipo de arquitetura aberta, inserida no computador hospedeiro, que atua de acordo à realimentação fornecida pelo *encoder* do eixo X em sistema de medição indireta.

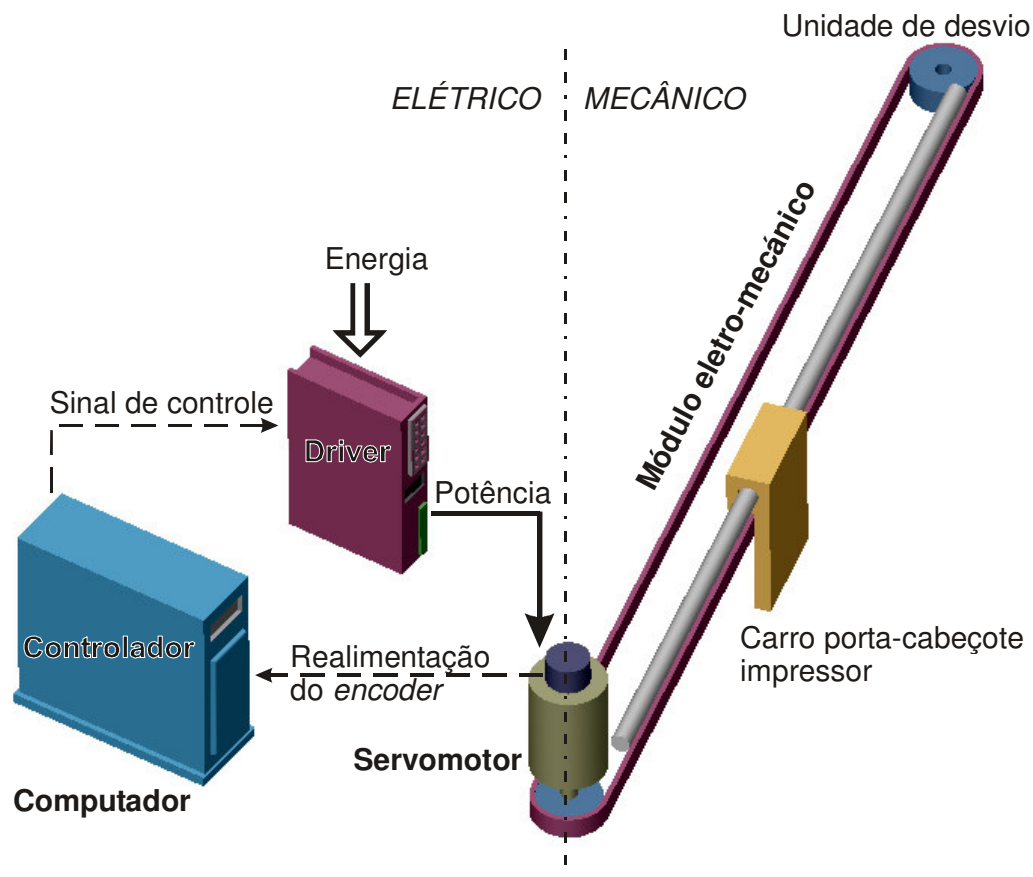


Fig. 69. Croqui dos componentes do eixo X do sistema impressor.

O eixo Y do conjunto impressor funciona como um posicionador ponto-a-ponto do módulo eletro-mecânico do eixo X, na direção Y, como pode ser observado no esquema da Fig. 58, neste esquema também pode-se notar que a elevada inércia deste eixo se deve a que a massa total a movimentar corresponde à massa total do eixo X, mais a massa do sistema de transmissão Y e o seu servomotor (118 kg, Tabela 9). Por outro lado, o deslocamento neste eixo para cada faixa a ser impressa, é na ordem dos milímetros e é definido pelo dispositivo impressor escolhido, veja Fig. 10.

O acionamento do eixo Y, conforme apresentado no croqui da Fig. 70, é formado por um *drive*, um servomotor *brushless*, um sistema de transmissão de movimento constituído por três polias, duas das quais são auxiliares e a terceira localizada no meio do sistema é acoplada diretamente ao eixo do servomotor. Neste croqui pode ser observado que o sistema de acionamento do eixo Y apresenta uma concepção diferente de transmissão de movimento em que a correia se encontra fixa nos extremos e o servomotor é disposto sobre a estrutura do eixo Y. O carro móvel do

eixo Y desloca-se sobre guias mediante castanhas de esferas recirculantes. O controle de velocidade deste módulo eletro-mecânico é realizado pela mesma placa de controle de movimento do eixo X (que pode controlar simultaneamente até 4 eixos).

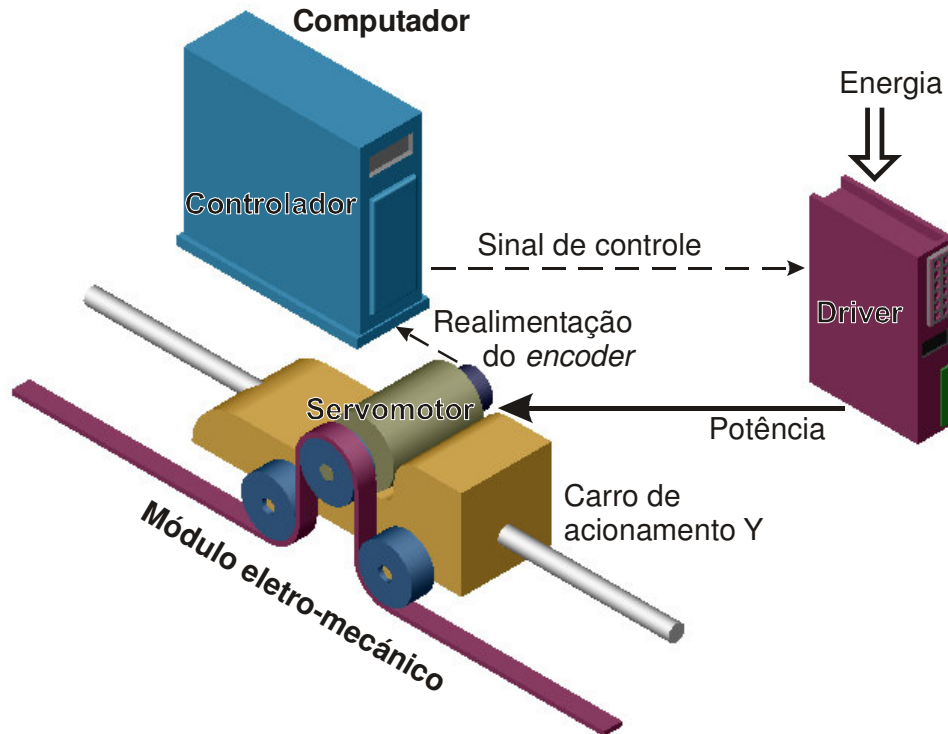


Fig. 70. Croqui dos componentes do eixo Y do sistema impressor.

Os croquis de ambos os eixos (Fig. 69 e Fig. 70) podem então ser transformados em fluxogramas de sinal básico, como apresentado na Fig. 71 (GROSS, 1983).

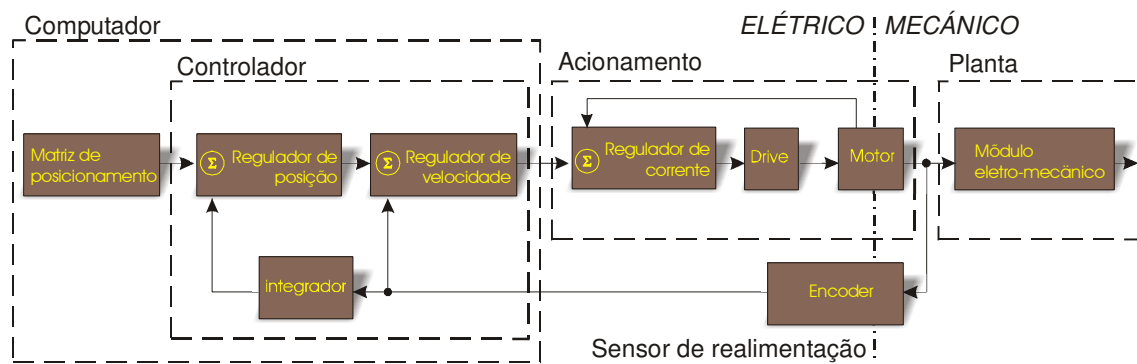


Fig. 71. Fluxograma do modelo dinâmico do sistema de controle para ambos os eixos do sistema impressor.

A Fig. 71 apresenta os principais blocos funcionais e as principais malhas de controle existentes no conjunto impressor, entre eles a matriz de informação de posicionamento que é quem fornece os valores de referência ao algoritmo do controlador (implementado na placa de controle de movimento), o acionamento e o módulo eletromecânico a ser acionado. Assim, no decorrer do trabalho, serão apresentados modelos dinâmicos qualitativos para cada um destes componentes e finalmente um modelo dinâmico diferenciado para cada eixo de acionamento.

Este sistema de controle, mediante uma realimentação em malha fechada fornece sinal de comando para o acionamento, para levar o eixo do servomotor até a posição angular desejada. Para realizá-lo é necessário que o *drive* do servomotor seja operado no modo torque (veja os modos de operação do *drive* no item "3.2.3 Conjunto impressor"). Como o eixo do servomotor do acionamento se encontra rigidamente acoplado ao módulo eletromecânico do sistema, o desempenho dinâmico do posicionamento dependerá diretamente das características da planta e do acionamento em conjunto.

As características de desempenho dinâmico podem ser especificadas simplesmente em termos da resposta transitória no domínio do tempo para uma entrada em degrau unitário (OGATA, 1993).

Para o sistema impressor os valores destas características foram especificadas no item "1.4 Requisitos de projeto" sendo como:

Para o eixo de movimento do cabeçote impressor (eixo X) a sobre-passagem da resposta a um degrau de posição deve ser no máximo de 1%, o tempo de resposta deve ser de 0,25 s (aceleração em 4 % do comprimento total, veja "APÊNDICE 1 Determinação dos acionamentos do sistema impressor"). Já no eixo de movimentação do conjunto impressor (eixo Y) a sobre-passagem da resposta a um degrau de posição deve ser no máximo de 15%, com um tempo de resposta de 0,34 s (10 % do tempo total do eixo X, veja "APÊNDICE 1 Determinação dos acionamentos do sistema impressor"), ambos eixos com um mínimo erro de seguimento no regime permanente da velocidade.

## 4.2 Modelos dinâmicos dos sistemas de movimentação

Os modelos dinâmicos são obtidos baseado na metodologia de elementos de circuitos apresentados nas referências MARTIN, 1993 e HANS, 1983. Um resumo destes elementos é apresentado no "APÊNDICE 8 Lista de elementos de circuito".

### 4.2.1 Modelo dinâmico do módulo eletro-mecânico do eixo X

No modelamento realizado a partir do croqui apresentado na Fig. 72, se assume que a polia que traciona a correia se encontra "rigidamente" acoplada ao eixo do servomotor, neste sentido a inércia e o coeficiente de atrito viscoso deste elemento são somados aos parâmetros correspondentes do servomotor.

O modelo em elementos de circuito que representa a planta do eixo X inicia convencionalmente com uma fonte de corrente fornecendo uma corrente  $i_a$  e uma tensão  $e_a$  à armadura do servomotor. A parte elétrica do servomotor é representada pela indutância  $L_a$  e resistência  $R_a$  do enrolamento da armadura. A corrente e tensão aplicadas são transformadas em torque e velocidade angular (pelas constantes de torque  $K_{tx}$  e tensão  $K_{ex}$  respectivamente), esta potência fornecida é aplicada para movimentar a carga do eixo X representada pelas parcelas devido à inércia, ao atrito viscoso e para esticar a correia sincronizadora com constante de elasticidade  $k_x$ .

Na unidade tracionadora o movimento rotativo é transformado em translativo pelo sistema de transmissão/conversão (correia sincronizadora - polia). A força transmitida serve para esticar a correia  $k_x$ , acelerar a massa do cabeçote impressor  $m_x$  e vencer o atrito viscoso em seu sistema de guias  $b_3$ . Como a correia se encontra envolta de uma segunda polia na unidade de desvio, o movimento translativo é novamente transformado em rotativo fornecendo um torque para acelerar a inércia  $j_2$  da polia e vencer o atrito viscoso  $b_2$  do seu mancal.

Nos elementos de circuito do modelo básico da planta do eixo X (Fig. 72) a indutância  $L_a$  e resistência  $R_a$  do enrolamento da armadura do servomotor se encontram em serie devido que no transiente a tensão não é a mesma para ambos elementos e existe uma variação no valor da tensão sobre cada um deles, já na parte mecânica a inércia e o atrito viscoso se encontram em paralelo porque ambos elementos tem a mesma velocidade rotacional. No circuito a correia se encontra conectada em serie porque existe uma variação no valor da velocidade entre os extremos.



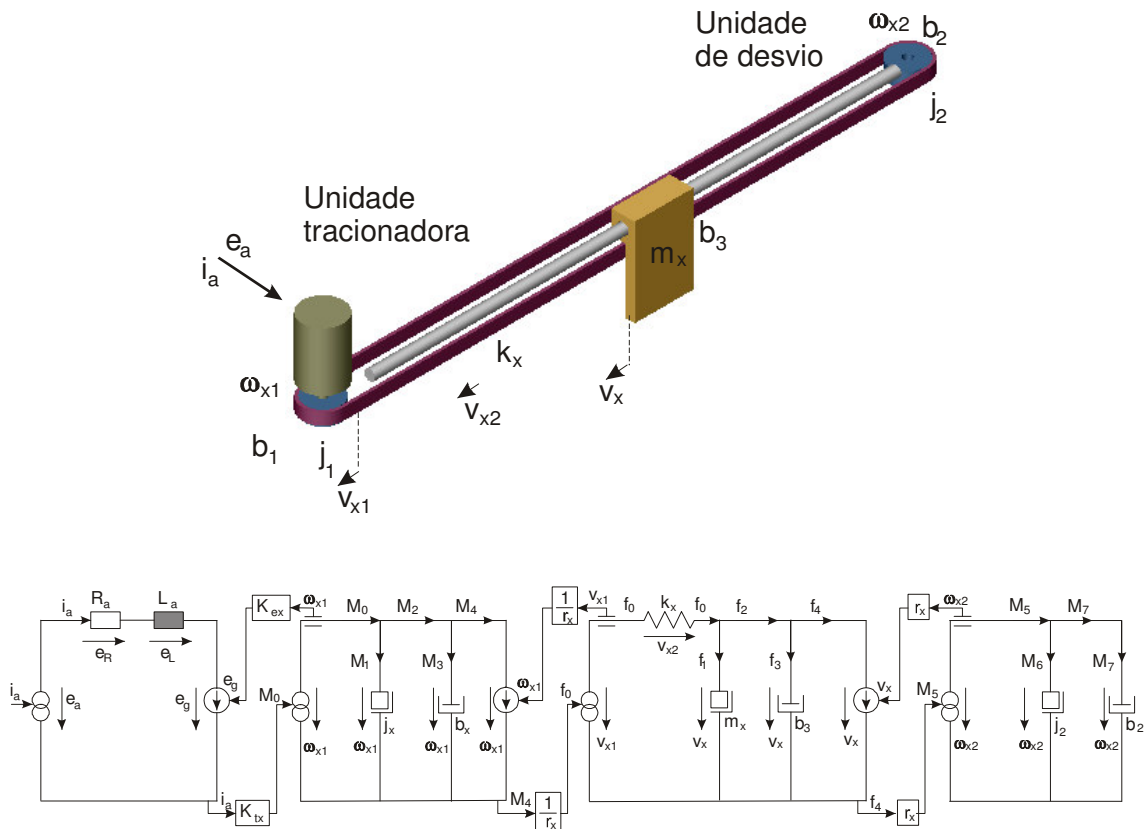


Fig. 72. Modelo básico da planta do eixo X baseado em elementos de circuito.

Onde:

$L_a$ : Indutância do enrolamento da armadura, H

$R_a$ : Resistência do enrolamento da armadura,  $\Omega$

$i_a$ : Corrente de alimentação no enrolamento da armadura, A

$e_a$ : Tensão aplicada na armadura do servomotor, V

$e_R$ : Tensão sobre  $R_a$

$e_L$ : Tensão sobre  $L_a$

$e_g$ : Tensão da força contra eletro-motriz, V

$K_{ex}$ : Constante (de tensão) da força contra-eletromotriz no eixo X, V/rad/s

$K_{tx}$ : Constante de torque do servomotor no eixo X, Nm/A

$j_x$ : Momento de inércia total aplicado no eixo do servomotor X,  $\text{kg m}^2$

$b_x$ : Coeficiente de atrito viscoso total aplicado no eixo do servomotor X, Nm/rad/s

$\omega_{x1}$ : Velocidade angular da polia acoplada ao eixo do servomotor, rad/s

$M_0$ : Torque eletromecânico do servomotor, Nm

$M_1$ : Torque para vencer a inércia total aplicada no eixo do servomotor, Nm

$M_3$ : Torque para vencer o atrito viscoso total aplicado no eixo do servomotor, Nm

- $M_4$ : Torque disponível para movimentar a carga, Nm  
 $r_x$ : Raio da polia acoplada ao servomotor do eixo X, m  
 $v_{x1}$ : Velocidade da correia tangente à polia acoplada ao servomotor, m/s  
 $v_{x2}$ : Variação da velocidade ao longo da correia considerada como mola, m/s  
 $v_x$ : Velocidade do dispositivo de impressão no eixo X, m/s  
 $k_x$ : Constante de elasticidade da correia sincronizadora no eixo X, N/m  
 $m_x$ : Massa total sobre as guias do eixo X, kg  
 $b_3$ : Coeficiente de atrito viscoso nas castanhas de esferas recirculantes sobre as guias lineares, Nm/rad/s  
 $f_0$ : Força total aplicada na correia do eixo X, N  
 $f_1$ : Força para movimentar a massa total a ser transportada no eixo X, N  
 $f_3$ : Força para vencer o atrito viscoso das castanhas nas guias no eixo X, N  
 $f_4$ : Força aplicada na polia da unidade de desvio, N  
 $\omega_{x2}$ : Velocidade angular da polia da unidade de desvio, rad/s  
 $b_2$ : Coeficiente de atrito viscoso na polia na unidade de desvio do eixo X, Nm/rad/s  
 $j_2$ : Inércia da polia da unidade de desvio do eixo X, kg m<sup>2</sup>  
 $M_5$ : Torque para mover a polia da unidade de desvio, Nm  
 $M_6$ : Torque para vencer a inércia da polia da unidade de desvio, Nm  
 $M_7$ : Torque para vencer o atrito viscoso da polia da unidade de desvio, Nm

A partir da representação do eixo da Fig. 72 os elementos funcionais individuais foram transformados em suas respectivas funções de transferência constituintes e as malhas e os nós transformados nos seus respectivos somadores de sinal, Fig. 73.

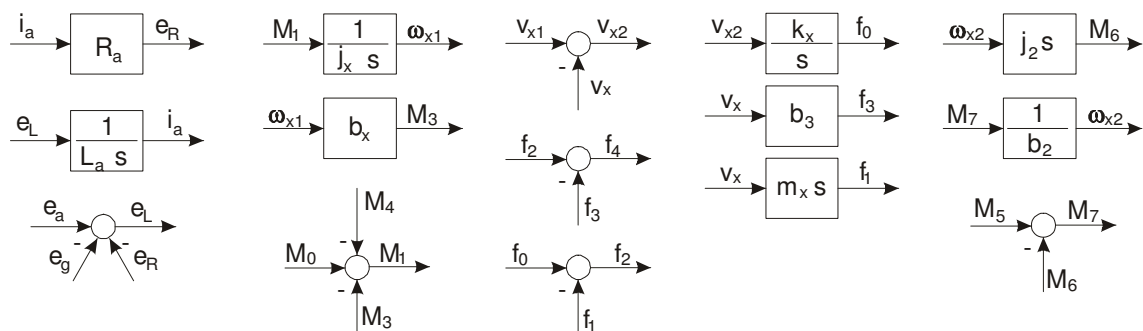


Fig. 73. Somadores e funções de transferência dos elementos funcionais constituintes do eixo X.

Com estes, compôs-se o modelo dinâmico apresentado na Fig. 74 correspondente ao módulo eletro-mecânico do eixo X.

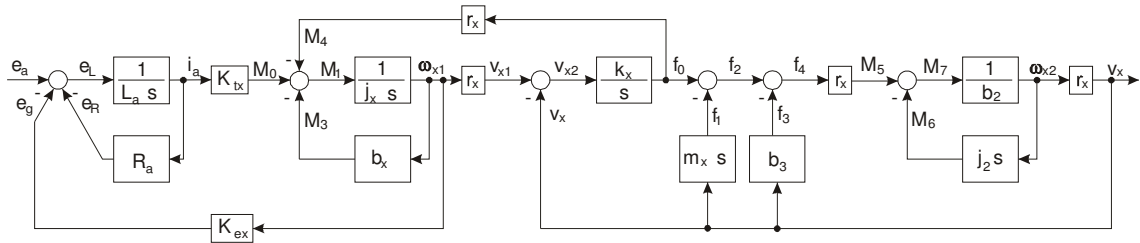


Fig. 74. Modelo dinâmico para a planta do eixo X.

Segundo SCIAVICCO (1996), o *drive* de um servomotor pode ser representado simplificada pelo modelo dinâmico da Fig. 75. Este descreve a relação entre a tensão aplicada à armadura do servomotor  $e_a$  e o sinal de comando  $e_c$ .

Fig. 75. Modelo dinâmico simples do *drive* do servomotor (SCIAVICCO, 1996).

Onde:

$e_a$ : Tensão aplicada na armadura do servomotor, V

$e_c$ : Tensão de comando aplicada ao *drive*, V

$G_v$ : Ganho do *drive*

$T_v$ : Constante de tempo do *drive*, s

No modelo dinâmico do *drive* a constante de tempo  $T_v$  pode ser desprezada considerando que as constantes de tempo de sistemas eletromecânicos são maiores que a constante de tempo do *drive*, segundo SCIAVICCO (1996) estão na ordem de 10  $\mu$ s e 100  $\mu$ s para uma modulação PWM de 10 a 100 kHz, respectivamente.

O mesmo autor traz o diagrama de blocos reproduzido na Fig. 76, de modelo dinâmico genérico para um conjunto *drive/servomotor*. Segundo este autor desde o ponto de vista do modelamento, um motor com ímãs permanentes e modulo de comutação e um motor brushless com sensores de posição podem ser descritos pela mesma equação diferencial.

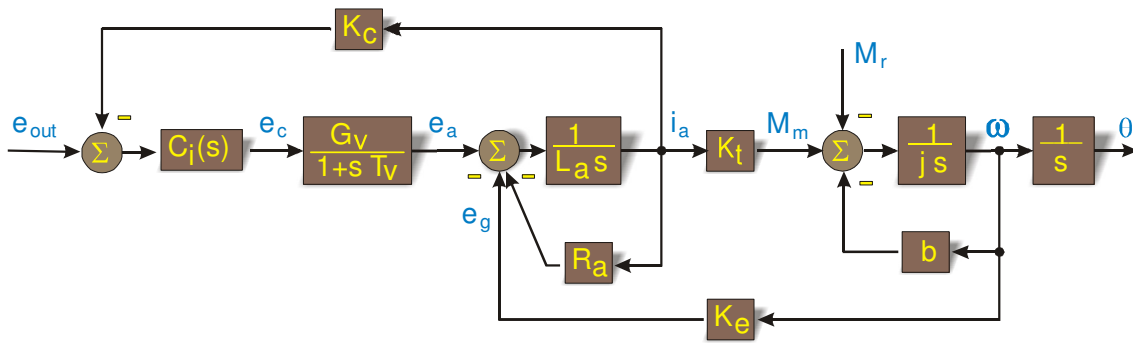


Fig. 76. Modelo dinâmico em diagrama de blocos de um servomotor com seu *drive*.

Neste modelo dinâmico (Fig. 76), acima do bloco correspondente ao *drive*, encontra-se a malha de realimentação de corrente entre o enrolamento da armadura do servomotor e o *drive*. Esta realimentação de corrente é realizada pelo transdutor  $k_c$ . O modelo mostra também o controlador de corrente  $C_i(s)$  como sendo um elemento com característica (saturação) não linear. A escolha do controlador  $C_i(s)$  da malha de corrente permitirá obter um comportamento de controle de velocidade ou controle de torque do conjunto *drive/servomotor*, dependendo dos valores definidos no ganho da malha. Segundo SCIAVICCO (1996), este modelo (Fig. 76) pode ser reduzido ao modelo apresentado na Fig. 77 para um funcionamento do *drive* no modo torque.

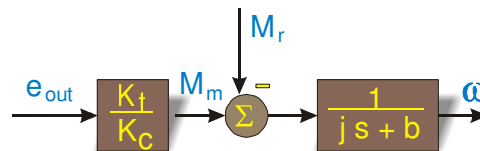


Fig. 77. Modelo dinâmico em diagrama de blocos de um servo servomotor com *drive* em modo torque.

Onde:

$e_{out}$ : Sinal de tensão de comando do *drive*, V.

$K_t$ : Constante de torque do servomotor, Nm/A

$K_c$ : Transdutor da corrente de alimentação à armadura, V/A

$M_m$ : Torque eletromecânico do servomotor, Nm

$M_r$ : Torque resistente da carga, Nm

$j$ : Momento de inércia total aplicado no eixo do servomotor, kg m<sup>2</sup>

$b$ : Coeficiente de atrito viscoso total aplicado no eixo do servomotor, Nm/rad/s

$\omega$ : Velocidade angular instantânea do eixo do servomotor, rad/s

Pode-se observar que os bloco diagramas correspondentes ao servomotor dos modelos dinâmicos da Fig. 74 e da Fig. 76 são iguais, faltando no modelo dinâmico da planta X (Fig. 74) somente o *drive* de acionamento com sua realimentação de corrente. Por tanto como apresentado na Fig. 78, acoplando os diagramas de blocos do *drive* obtemos o modelo dinâmico completo da planta do eixo X.

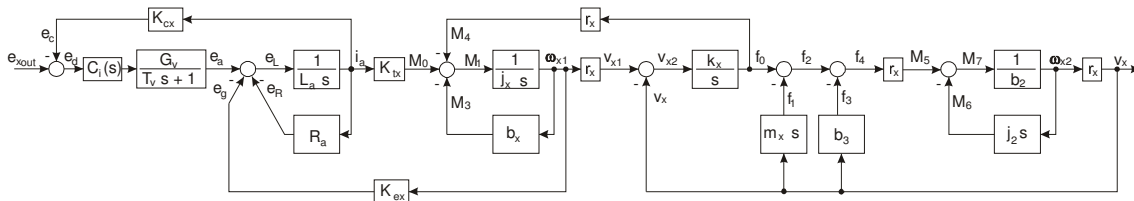


Fig. 78. Modelo dinâmico completo do acionamento em conjunto com a planta do eixo X.

Onde:

$e_{xout}$ : Sinal de tensão de comando no *drive* do servomotor do eixo X, V.

$K_{cx}$ : Ganho do transdutor da corrente de alimentação à armadura do eixo X, V/A

Para realizar as simulações da planta do eixo X e determinar seu comportamento, utiliza-se o modelo dinâmico do *drive* do servomotor no modo torque apresentado na Fig. 77. Desta maneira, o modelo dinâmico reduzido do acionamento em conjunto com a planta do eixo X é o apresentado na Fig. 79.

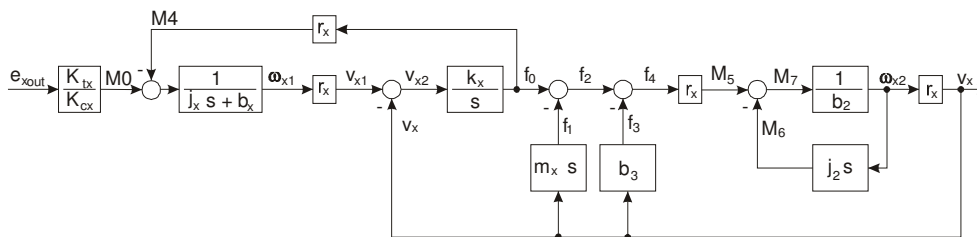


Fig. 79. Modelo dinâmico reduzido do acionamento em conjunto com a planta do eixo X.

Neste modelo, a massa total a ser transportada no eixo X ( $m_x$ ), é constituída das massas do cabeçote impressor, da correia e do carro porta-cabeçote.

$m_c$ : Massa do cabeçote impressor, 10 kg

$m_{co}$ : Massa da correia (0,2 kg/m\*8,5m), 1,7 kg

$m_{ca}$ : Massa do carro porta-cabeçote, 4,3 kg

$$m_x = m_c + m_{co} + m_{ca}$$

$$m_x = 10,0 + 1,7 + 4,3$$

$$m_x = 16,00 \text{ kg}$$

A inércia ( $j_x$ ) e o coeficiente de atrito viscoso ( $b_x$ ) correspondem à soma dos respectivos elementos do servomotor e às da polia acoplada.

$j_{mx}$ : Momento de inércia do eixo do servomotor X (SWA 56-2,5-60), 0,00022 kg m<sup>2</sup>

$j_1$ : Momento de inércia da polia e acoplamento (fixado no servomotor), 6,6e-4 kg m<sup>2</sup>

$b_{mx}$ : Coeficiente de atrito viscoso no servomotor (SWA 56-2,5-60), 6,68e-5 Nm/rad/s

$b_1$ : Coeficiente de atrito viscoso na polia acoplada ao servomotor, 0,01168 Nm/rad/s

$$j_x = j_{mx} + j_1$$

$$j_x = 0,00022 + 0,00066$$

$$j_x = 0,00088 \text{ kgm}^2$$

$$b_x = b_{mx} + b_1$$

$$b_x = 6,68 \text{ e-}5 + 0,01168$$

$$b_x = 0,01175 \text{ Nm/rad/s}$$

Tabela 6. Variáveis e valores dos coeficientes requeridos no modelo do eixo X.

Coeficiente	Valor	Unidade
ktx	0,33	Nm/A
kcx	1,33	V/A
$j_x$	0,00088	kg m <sup>2</sup>
$b_x$	0,01175	Nm/rad/s
$r_x$	0,0331	m
$k_x$	120.897	N/m
$b_2$	0,02708	Nm/rad/s
$m_x$	16,00	kg
$b_3$	12,98	N/m/s
$j_2$	0,00017	kg m <sup>2</sup>

A Tabela 6 apresenta os valores dos diferentes coeficientes introduzidos no modelo do eixo X (Fig. 79). Estes valores foram obtidos mediante ensaios realizados no sistema mecânico e a partir de dados de manuais dos componentes constituintes do eixo X.

Como apresentado na Fig. 80, os valores da não-linearidade devido ao atrito estático no início do movimento são considerados na simulação dos modelos como sendo dois degraus constantes que se somam aos sinais de força e torque respectivamente. Os valores obtidos são 7,05 N para as castanhas de esferas recirculantes do carro porta-cabeçote e 0,44 Nm das polias das unidades de desvio e acoplamento do servomotor.

Como apresentado na Fig. 80 foi implementado para simulação no programa computacional matemático SimuLink - MatLab do pacote MathWorks, um modelo equivalente ao da Fig. 79.

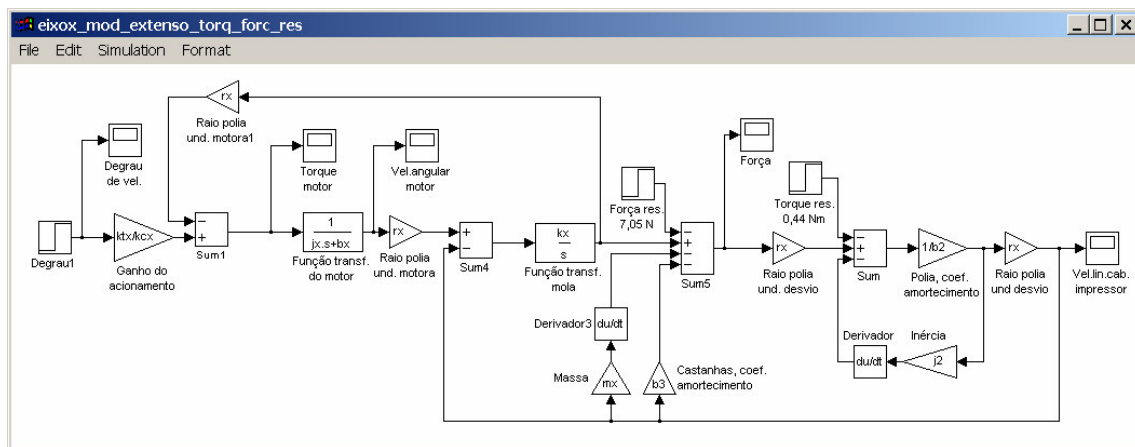


Fig. 80. Modelo dinâmico do eixo X implementado como diagrama de programação para Simulink do MatLab.

Com este modelo matemático simples implementado, foi realizada uma simulação em malha aberta com um sinal de entrada em degrau de 10 V aplicado ao *drive* do servomotor, utilizando os parâmetros definidos na Tabela 6. Os resultados obtidos são os apresentados na Fig. 81.

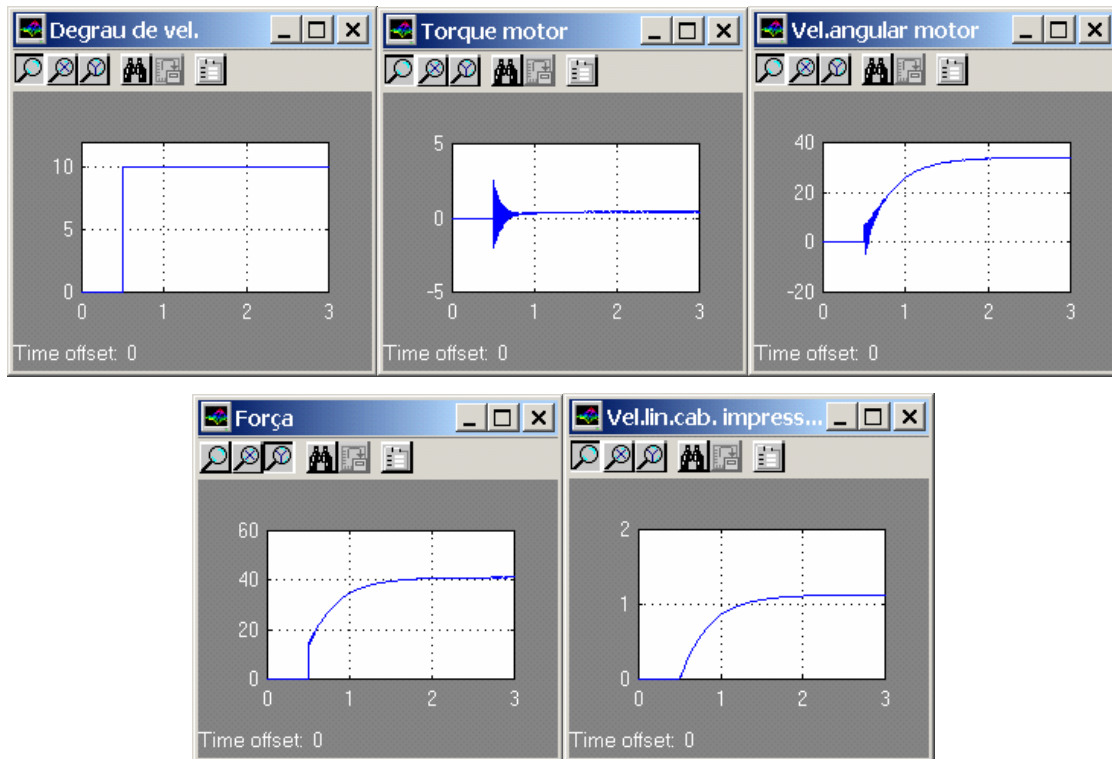


Fig. 81. Resultados da simulação do modelo matemático do eixo X a uma entrada em degrau de 10 V de sinal ao *drive* do servomotor.

Como pode ser observado no terceiro gráfico da Fig. 81, a velocidade angular do servomotor apresenta oscilações em alta frequência no início do movimento, e a velocidade translativa do carro porta-cabeçote tem um tempo de acomodação de aproximadamente 2 s (quinto gráfico), comportamento que deverá ser melhorado com a ação de um controlador (Fig. 71), que é discutido no item "4.2.4 Algoritmo do controlador de movimentos". Antes segue a análise do eixo Y.

#### 4.2.2 Modelo dinâmico do módulo eletro-mecânico do eixo Y

Na representação do eixo Y mediante elementos de circuito a inércia e o coeficiente de atrito viscoso do conjunto de polias acopladas ao eixo do servomotor, são consideradas como partes integrantes associadas ao eixo do próprio servomotor (elementos  $j_y$  e  $b_y$  da Fig. 82).



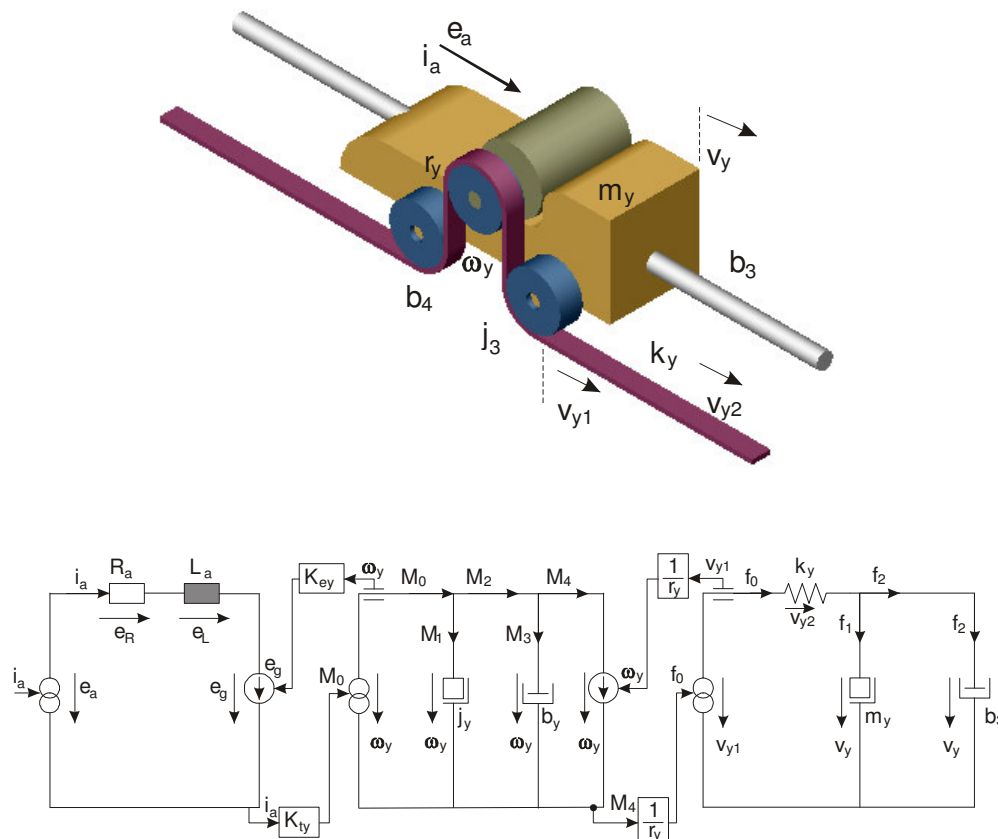


Fig. 82. Modelo básico da planta do eixo Y baseado em elementos de circuito.

O modelo em elementos de circuito que representa a planta do eixo Y inicia como no caso do eixo X, com uma fonte de corrente fornecendo corrente ( $i_a$ ) e tensão ( $e_a$ ) à armadura do servomotor. O movimento rotativo é transformado em translativo pelo conjunto de polias, que se encontram unidas pela a correia instalada no carro com o acionamento Y (Fig. 82). A correia de acionamento é considerada como uma elasticidade com constante  $k_y$ . O torque aplicado pelo servomotor acarreta, inicialmente, a deformação da correia considerada elástica, sendo aí transformada em força para movimentar a massa  $m_y$  e vencer o atrito viscoso das guias  $b_3$ .

Onde:

$K_{ey}$ : Constante (de tensão) da força contra-eletromotriz no eixo Y, V/rad/s

$K_{ty}$ : Constante de torque do servomotor no eixo Y, Nm/A

$j_y$ : Momento de inércia total aplicado no eixo do servomotor, kg m<sup>2</sup>

$b_y$ : Coeficiente de atrito viscoso total aplicado no eixo do servomotor Y, Nm/rad/s

$\omega_y$ : Velocidade angular do servomotor do eixo Y, rad/s

- $r_y$ : Raio da polia acoplada ao servomotor do eixo Y, m
- $v_{y1}$ : Velocidade da correia tangente à polia acoplada ao servomotor, m/s
- $v_{y2}$ : Variação da velocidade translativa ao longo da correia considerada como mola, m/s
- $v_y$ : Velocidade do carro de acionamento Y, m/s
- $k_y$ : Constante de elasticidade da correia sincronizadora no eixo Y, N/m
- $m_y$ : Massa total sobre as guias do eixo Y, kg
- $f_0$ : Força total aplicada na correia do eixo Y, N
- $f_1$ : Força para movimentar a massa total a ser transportada no eixo Y, N
- $f_2$ : Força para vencer o atrito viscoso das castanhas nas guias no eixo Y, N

Dos elementos funcionais individuais do circuito da Fig. 82, foram levantadas suas respectivas funções de transferência e das malhas e nós os respectivos somadores, como apresentados na Fig. 83.

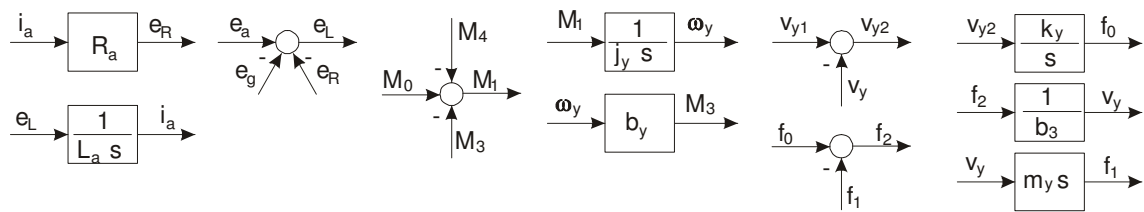


Fig. 83. Somadores e funções de transferência dos elementos funcionais constituintes do eixo Y.

A partir destes elementos compõem-se o modelo dinâmico da planta do eixo Y como apresentado na Fig. 84. Este diagrama de blocos corresponde ao módulo eletromecânico da planta do eixo Y.

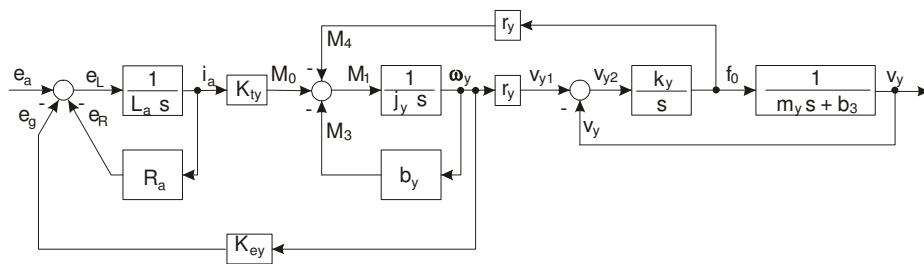


Fig. 84. Modelo dinâmico para a planta do eixo Y.

Da mesma maneira que o eixo X, obtemos o modelo dinâmico completo da planta do eixo Y (Fig. 85), acoplando o modelo do *drive* apresentado na Fig. 76, no modelo do módulo eletro-mecânico da Fig. 84.

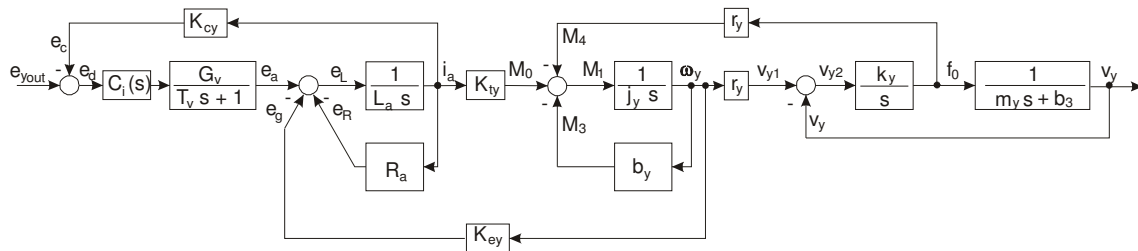


Fig. 85. Modelo dinâmico completo do acionamento em conjunto com a planta do eixo Y.

Onde:

$e_{yout}$ : Sinal de tensão de comando no *drive* do servomotor do eixo Y, V.

$K_{cy}$ : Ganho do transdutor da corrente de alimentação à armadura do eixo Y, V/A

Para efeitos de simulação e determinação do comportamento dinâmico da planta do eixo Y, utiliza-se o modelo do *drive* do servomotor no modo torque (Fig. 77). Desta maneira, o modelo dinâmico reduzido do acionamento em conjunto com a planta do eixo Y é o apresentado na Fig. 86.

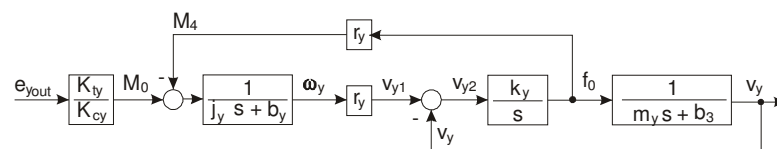


Fig. 86. Modelo dinâmico reduzido do acionamento em conjunto com a planta do eixo Y.

Neste modelo, a massa total a ser transportada no eixo Y ( $m_y$ ), é constituída da massa do eixo X, mais a massa dos dois servomotores (Tabela 9,  $m_y = 118,21$  kg).

A inércia ( $j_y$ ) e o coeficiente de atrito viscoso ( $b_y$ ) correspondem à soma dos respectivos elementos do servomotor e às do conjunto de polias acopladas ao eixo do servomotor pela correia.

$j_{my}$ : Momento de inércia do eixo do servomotor Y (WEG SWA 56-7,0-30),  $0,00068$   $\text{kgm}^2$

$j_3$ : Inércia das 3 polias do carro de acionamento Y, 0,003529 kg m<sup>2</sup>

$b_{my}$ : Coef. de atrito viscoso no servomotor (WEG SWA 56-7,0-30), 0,000181 Nm/rad/s

$b_4$ : Coef. de atrito viscoso nas 3 polias do carro de acionamento Y, 0,08241 N/rad/s

$$j_y = j_{my} + j_3$$

$$j_y = 0,00068 + 0,003529$$

$$\mathbf{j_y = 0,004209 \text{ kgm}^2}$$

$$b_y = b_{my} + b_4$$

$$b_y = 0,000181 + 0,08241$$

$$\mathbf{b_y = 0,08259 \text{ Nm/rad/s}}$$

A Tabela 7 apresenta os valores dos diferentes coeficientes introduzidos no modelo do eixo Y apresentado na Fig. 86. Como no caso do eixo X estes valores foram obtidos de dados de manuais dos componentes constituintes do eixo, assim como mediante ensaios realizados no sistema mecânico neste eixo.

Tabela 7. Variáveis e valores dos coeficientes requeridos no modelo do eixo Y.

<b>Coeficiente</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
ky	0,78	Nm/A
kcy	1,11	V/A
jy	0,004209	kg m <sup>2</sup>
by	0,08259	Nm/rad/s
ry	0,0458	m
ky	120.897,00	N/m
b3	12,98	N/m/s
my	118,21	kg

No modelo construído no Simulink representado na Fig. 87, os valores da não-linearidade de força e torque requeridos devido ao atrito estático, são considerados no modelo como sendo dois degraus constantes que se somam aos sinais da força e torque respectivamente. (força residual Y = 7,05 N, torque residual Y = 0,19 Nm).

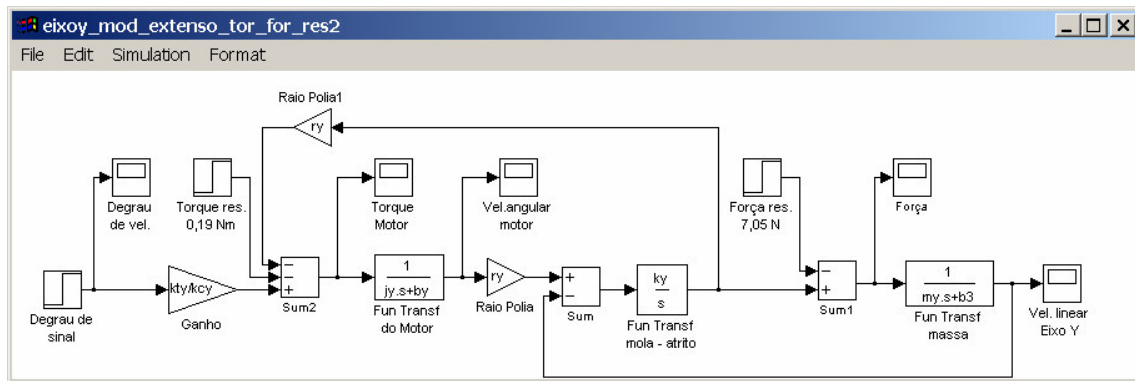


Fig. 87. Modelo dinâmico do eixo Y implementado como diagrama de programação para Simulink do MatLab.

Com este modelo simples para o programa computacional matemático SimuLink - MatLab, foi realizada uma simulação em malha aberta com um sinal de entrada em degrau de 10 V aplicado ao *drive* do servomotor. O primeiro ensaio realizado (Fig. 88) apresenta os resultados com os valores dos coeficientes do sistema do eixo Y definidos na Tabela 7.

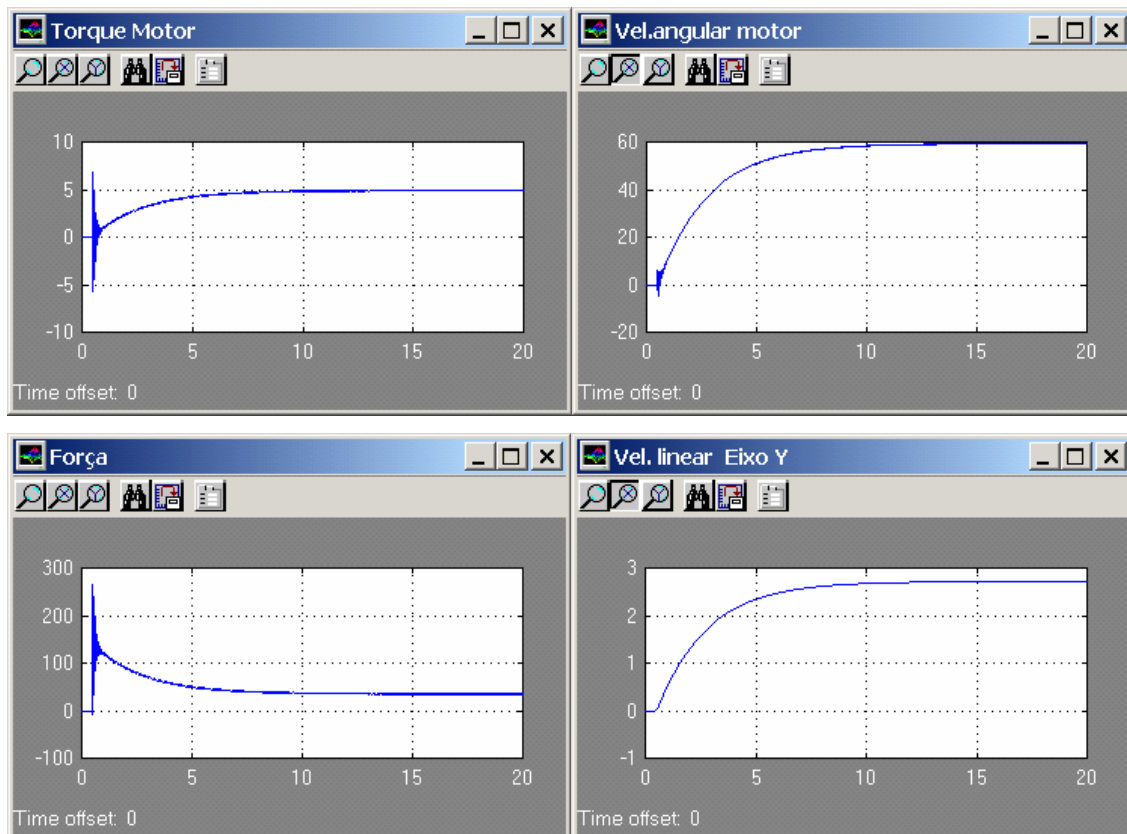


Fig. 88. Resultados da simulação do modelo matemático do eixo Y a uma entrada em degrau de 10 V de sinal ao *drive* do servomotor.

Como pode ser observado no segundo gráfico da Fig. 88, a velocidade angular do servomotor do eixo Y apresenta oscilações em alta frequência no início do movimento, isto devido a elevada rigidez da correia considerada como mola. Para apreciar melhor este efeito a Fig. 89 apresenta o resultado do comportamento da velocidade angular do servomotor ao simular o modelo com um valor  $k_y$ , 70 vezes menor ( $k_y=1.727$  N/m).

Por outro lado, como pode ser observado no quarto gráfico da Fig. 88 o tempo em que a velocidade de translação chega ao seu valor final é de aproximadamente 13 s, isto deve-se principalmente à elevada massa a ser transportada, uma vez que, simulando o modelo com uma massa 10 vezes menor (quarto gráfico da Fig. 90) o tempo de estabilização da velocidade de translação cai para 1,9 s.

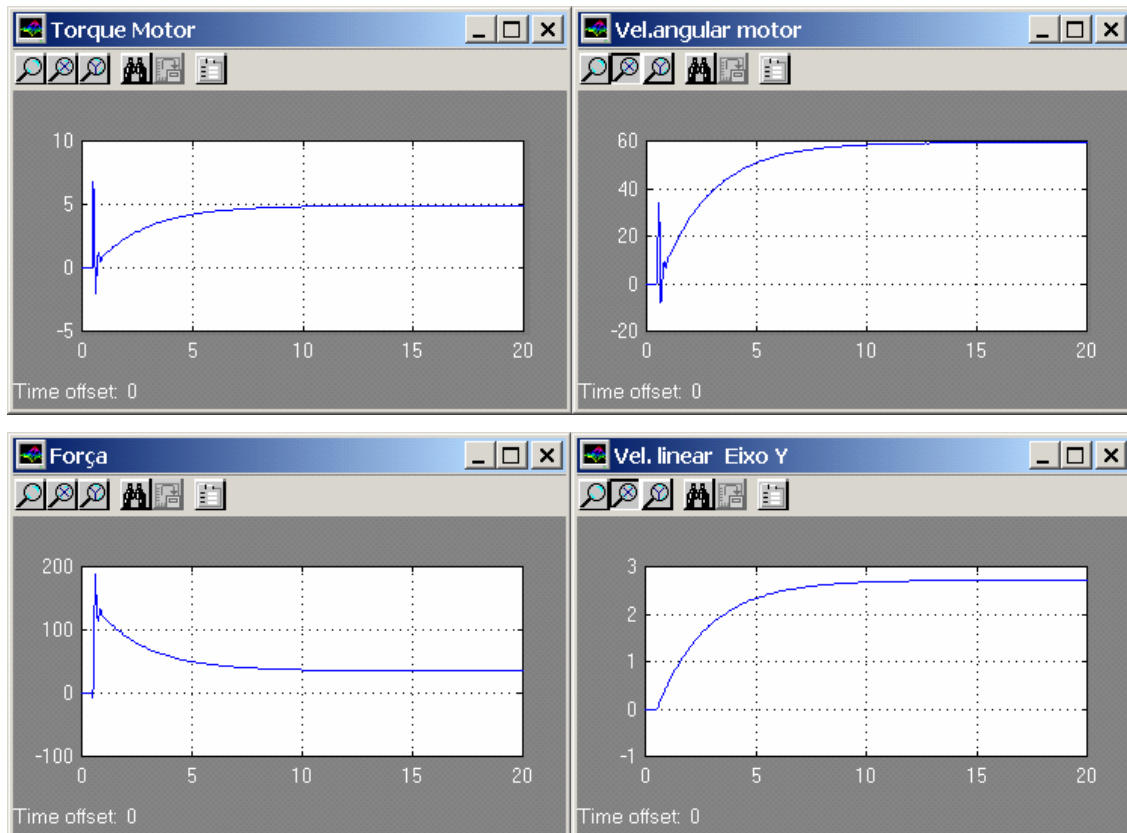


Fig. 89. Resultados da simulação considerando a correia com  $k_y=1.727$  N/m.

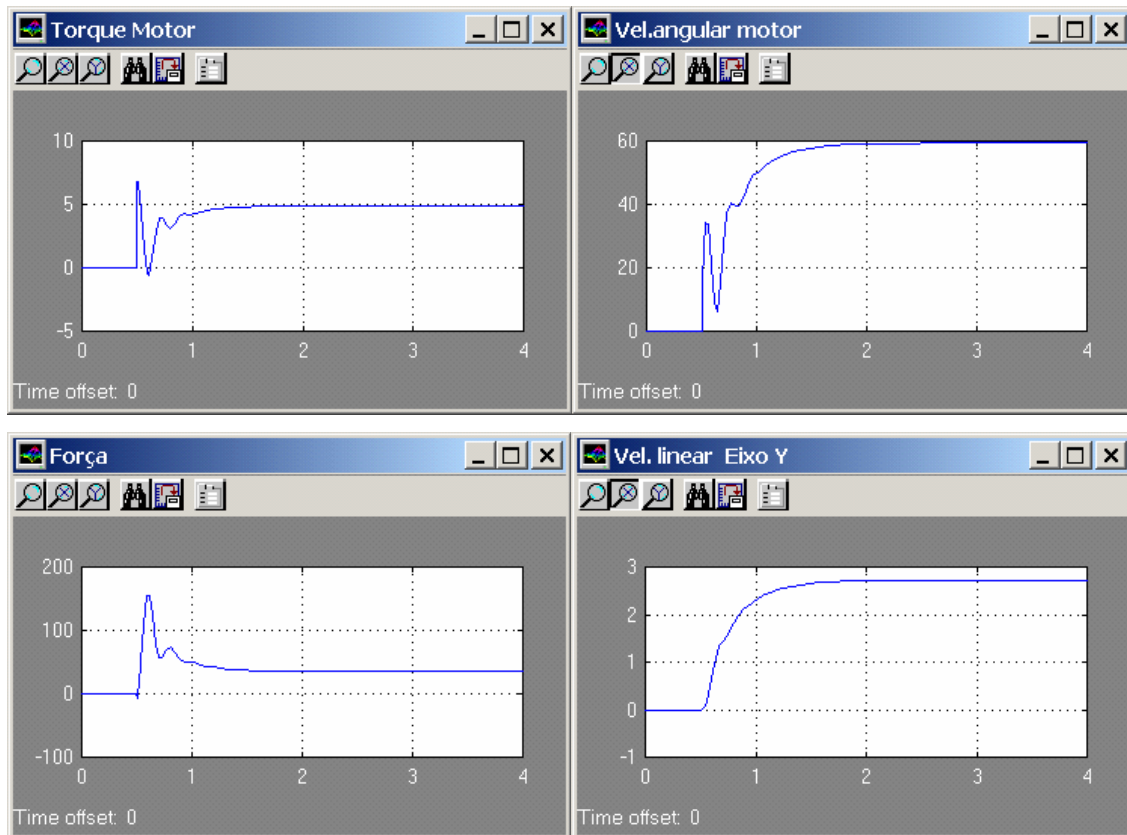


Fig. 90. Resultados da simulação considerando a correia com  $k_y=1.727$  N/m e  $m_y=12$  kg.

#### 4.2.4 Algoritmo do controlador de movimentos

O controlador PID - Proporcional, Integral e Derivativo, segundo TAKATSU & ARAKI, (1998), é o tipo de controlador de estrutura fixa mais utilizado nas aplicações industriais, tanto no Brasil como no mundo. Estudos realizados mostram que mais de 95% das malhas de controle de processos industriais são de tipo PID e que as estruturas de controle distribuído mais complexas tem o PID como elemento básico.

Um controlador PID é composto pela soma de três ações: Uma Proporcional ( $K_p$ ), uma integral ( $K_i$ ) e uma Derivativa ( $K_d$ ). Na sua forma mais simples, todas as ações encontram-se na malha direta atuando em paralelo sobre a planta, como apresentado na Fig. 91.

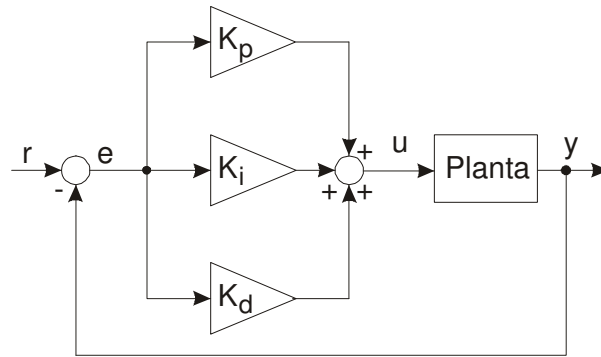


Fig. 91. Diagrama de blocos do controlador PID em paralelo.

### Ganho proporcional, $K_p$

Numa ação de controle, um ganho proporcional  $K_p$  é aquele que atua na rapidez de resposta do sistema fechado, por outro lado o ganho proporcional também atua sobre a rigidez, precisão e estabilidade do sistema. Esta componente de controle comporta-se como se fosse uma mola comprimida expandindo-se num sistema mecânico.

Um controlador com um valor de  $K_p$  zero ou muito baixo, não é capaz de manter o eixo posicionado e torna muito lenta a resposta. Incrementando  $K_p$ , a rigidez de controle aumenta e melhora a rejeição às perturbações de torque. Porém, um valor muito alto pode resultar em instabilidade.

### Ganho derivativo, $K_d$

Como numa ação de controle o termo derivativo  $K_d$  atua sobre o amortecimento do sistema com o objetivo de corrigir os efeitos do transitório, esta componente de controle comporta-se como se fosse um amortecimento em um sistema mecânico.

Como num controlador o termo derivativo  $K_d$  atua sobre o amortecimento do sistema, à medida que se incrementa este ganho, diminuem as oscilações do sistema tornando-o mais estável porém, se o incremento for muito alto o sistema torna-se sobre-amortecido aumentando o tempo de resposta.



### **Ganho integral, $K_i$**

Quando as características estáticas do sistema em malha fechada não atendem as especificações, geralmente definidas por erros estáticos nulos em regime permanente para entradas ou perturbações do tipo degrau, faz-se necessário à introdução de um termo integral  $K_i$  na malha de controle. Porém esta ação tende a incrementar o erro de seguimento na aceleração e desaceleração devido ao atraso que este termo provoca. Por outro lado, uma ação integral muito forte poderá causar um aumento da sobre-passagem do sinal e da instabilidade do sistema.

Por estes motivos, segundo SHEARER (1967), em aplicações de pequeno torque de cargas estáticas, seu valor deve ser mínimo. Já para sistemas com alto torque de cargas estáticas, seu valor deve ser ajustado adequadamente para minimizar estes efeitos e permitir que o erro de posição seja mínimo quando o eixo é parado.

Em conclusão, pode-se ver que a ação proporcional pode ser utilizada para acelerar a resposta do sistema e para diminuir o erro em regime permanente. Valores grandes do ganho proporcional podem levar o sistema a oscilar. A ação integral tem como principal vantagem permitir a operação dos sistemas com erro de seguimento nulo frente a referências e perturbações constantes. Já a ação derivativa é utilizada para corrigir os efeitos do transitório e tem um caráter preditivo.

Segundo RICO (2003) o controle PI pode ser usado com sucesso em processo de primeira ordem estável e o PD com processos integradores. Quando a dinâmica do processo for de segunda ordem ou de primeira com atraso, o controle PID sempre permite obter melhores soluções que o PI ou PD.

## **4.3 Simulações dos modelos dinâmicos dos eixos X e Y**

### **4.3.1 Simulação do modelo do eixo X em malha fechada**

O modelo dinâmico da planta do eixo X apresentado na Fig. 79 foi implementado no *software* MatLab como apresentado na Fig. 92, a primeira simulação foi realizada em malha fechada sem controlador (controlador unitário) para conhecer o comportamento intrínseco do eixo. Os resultados da simulação são apresentados na Fig. 93.

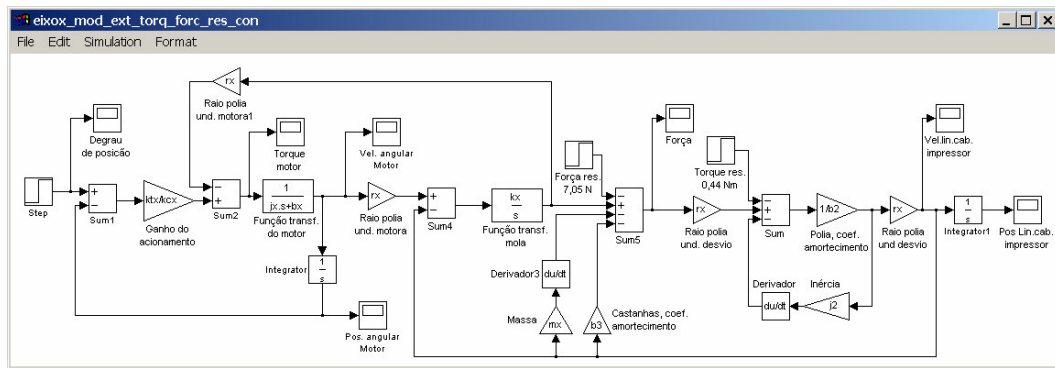


Fig. 92. Modelo dinâmico do eixo X com realimentação de posição mas sem controlador (controlador unitário).

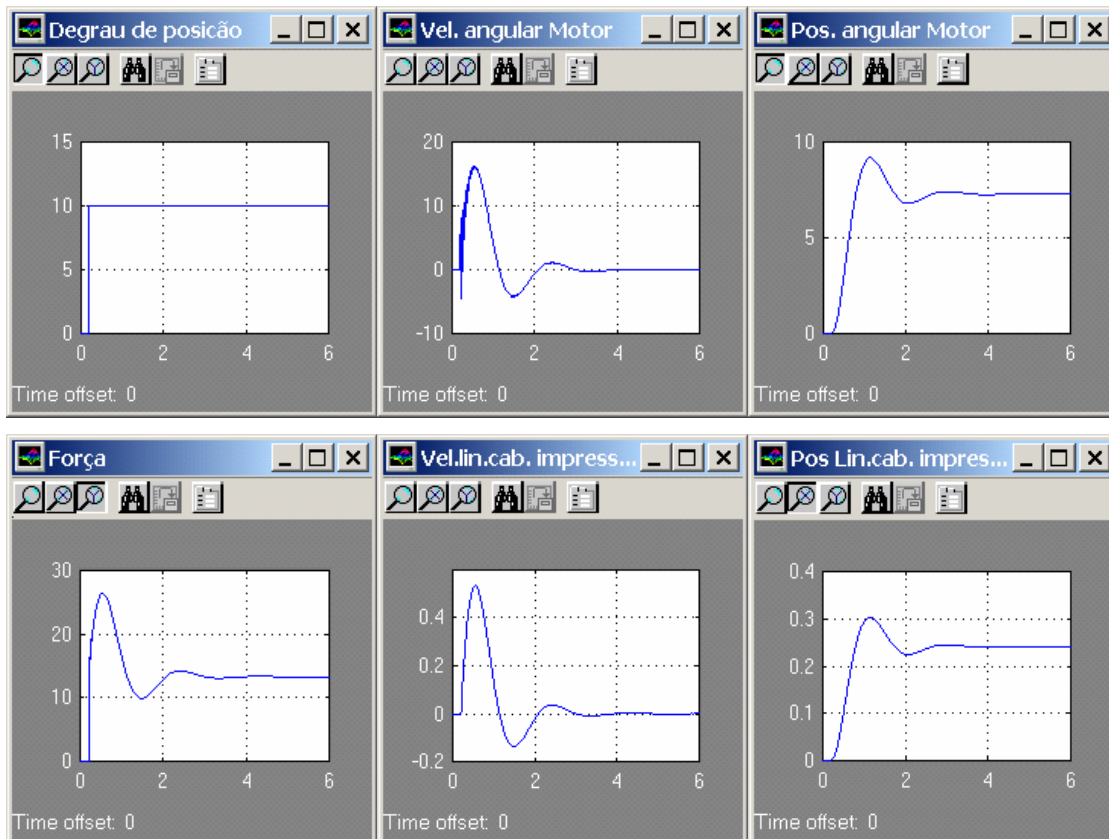


Fig. 93. Resultados da simulação do eixo X com malha fechada de posição mas sem controlador.

Pode-se observar nestes gráficos que o sistema mesmo sem o controlador já é estável mas apresenta sobre-passagens no posicionamento e não atinge a posição angular especificada pelo degrau.

#### 4.3.2 Especificações do controlador de posição requerido para o eixo X

Como pode ser observado nas simulações realizadas o tempo de acomodação neste eixo é maior que o requerido 0,25 s (veja, APÊNDICE 1 Determinação dos acionamentos do sistema impressor). Para resolver este problema é necessário a ação de um ganho proporcional, já que sabe-se que numa ação de controle, um ganho proporcional  $K_p$  é aquele que atua na rapidez de resposta do sistema em malha fechada.

Nas simulações pode-se ver que existe um erro de seguimento no posicionamento do eixo, por tanto, para resolver este problema será necessário a ação de um termo integrador  $K_i$ , como explicado anteriormente no item "4.2.4 Algoritmo do controlador de movimentos". Como este eixo possui um torque de carga estática pequeno, segundo SHEARER (1967) o valor de  $K_i$  deve ser mínimo.

Verificou-se também nas simulações que o eixo apresenta uma sobre-passagem no posicionamento, efeito que pode ser minimizado como a ação do termo derivativo  $K_d$  no controlador pois este atua sobre o amortecimento do sistema.

A partir da análise anterior conclui-se que é suficiente o controlador do tipo PID apresentado na Fig. 94, para melhorar o comportamento deste eixo.

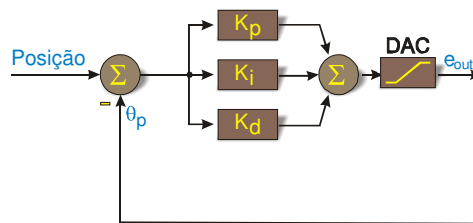


Fig. 94. Diagrama de blocos do controlador implementado para cada eixo de movimento do sistema impressor.

Considerando o algoritmo de controle implementado na placa de controle de movimentos (PID-FF) apresentado no "APÊNDICE 7 Algoritmo PID-FF implementado no controlador de movimentos" as funções dos ganhos  $A_{ff}$  e  $V_{ff}$  não serão utilizados por não ser necessário reduzir o erro de seguimento de trajetória durante a aceleração/desaceleração e em velocidade constante. Também não será implementado o ganho  $K_v$  por estar sendo utilizado só o encoder do servomotor para realimentar tanto a velocidade angular quanto a posição angular.

Assim completa-se os componentes do diagrama de blocos do modelo dinâmico para este eixo do sistema impressor apresentado na Fig. 71.

4.3.3 Simulação do modelo do eixo X em malha fechada e controlador PID

Com todas as partes definidas para ambos os eixos, a Fig. 95 apresenta o diagrama de blocos completo de um modelo dinâmico simples para o eixo X do sistema impressor com realimentação de posição.

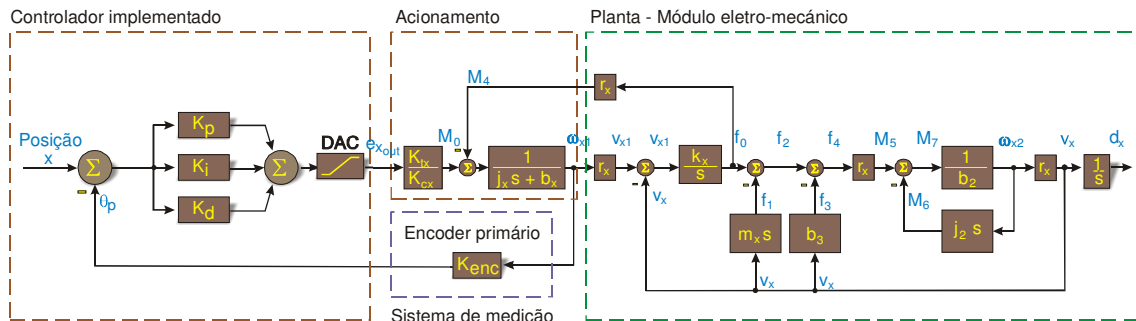


Fig. 95. Modelo dinâmico básico completo do eixo X.

O modelo dinâmico do *encoder* é uma constante que transforma um deslocamento angular numa série de pulsos, Fig. 96. Considerando-se o tempo entre os pulsos pode obter-se a velocidade angular.



Fig. 96. Modelo dinâmico do *encoder*.

Onde:

$K_{enc}$ : Constante do *encoder*, pulsos/rot

Para realizar as simulações no *software* Simulink - MatLab o modelo dinâmico do eixo X da Fig. 95, foi implementado com bloco diagramas equivalentes como apresentado na Fig. 97.

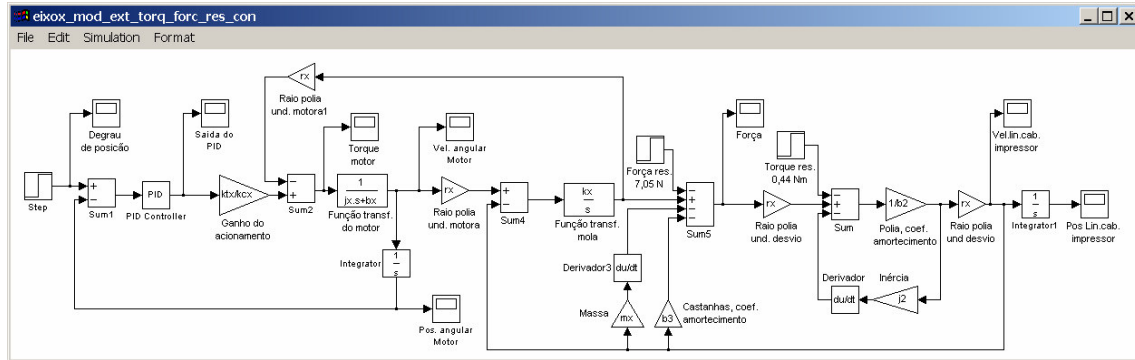


Fig. 97. Diagrama de blocos do modelo implementado no eixo X com controlador PID.

Os valores dos ganhos do controlador PID e alguns resultados de simulação são apresentados na Fig. 98.

Com estes valores nos ganhos do controlador obtém-se o comportamento especificado no item "1.4 Requisitos de projeto" do sistema, isto é:

- Um tempo de resposta da posição angular do servomotor em torno a 0,25 s
- Uma sobre-passagem na posição angular do servomotor menor que 1%.
- Um erro de posicionamento menor a 0,18 mm (1/10 do diâmetro do ponto) com um mínimo de erro em regime permanente.

Com o objetivo de conhecer o comportamento do sistema com outros valores de ganhos, p/ex. com os apresentados na Fig. 99, pode-se verificar que o sistema tem uma resposta no posicionamento angular do motor mais rápida, sem sobre-passagem de sinal e com um mínimo erro de posicionamento, como apresentado no sexto gráfico da Fig. 99. No entanto, pode-se observar que o sinal do gráfico do posicionamento translativo do cabeçote impressor (nono gráfico da Fig. 99) oscila depois de alcançado o posicionamento angular do servomotor, isto devido as elasticidades no sistema. Assim, estes ganhos não podem ser considerados, ainda que permitam que a velocidade angular do servomotor atinja o valor final num menor tempo.

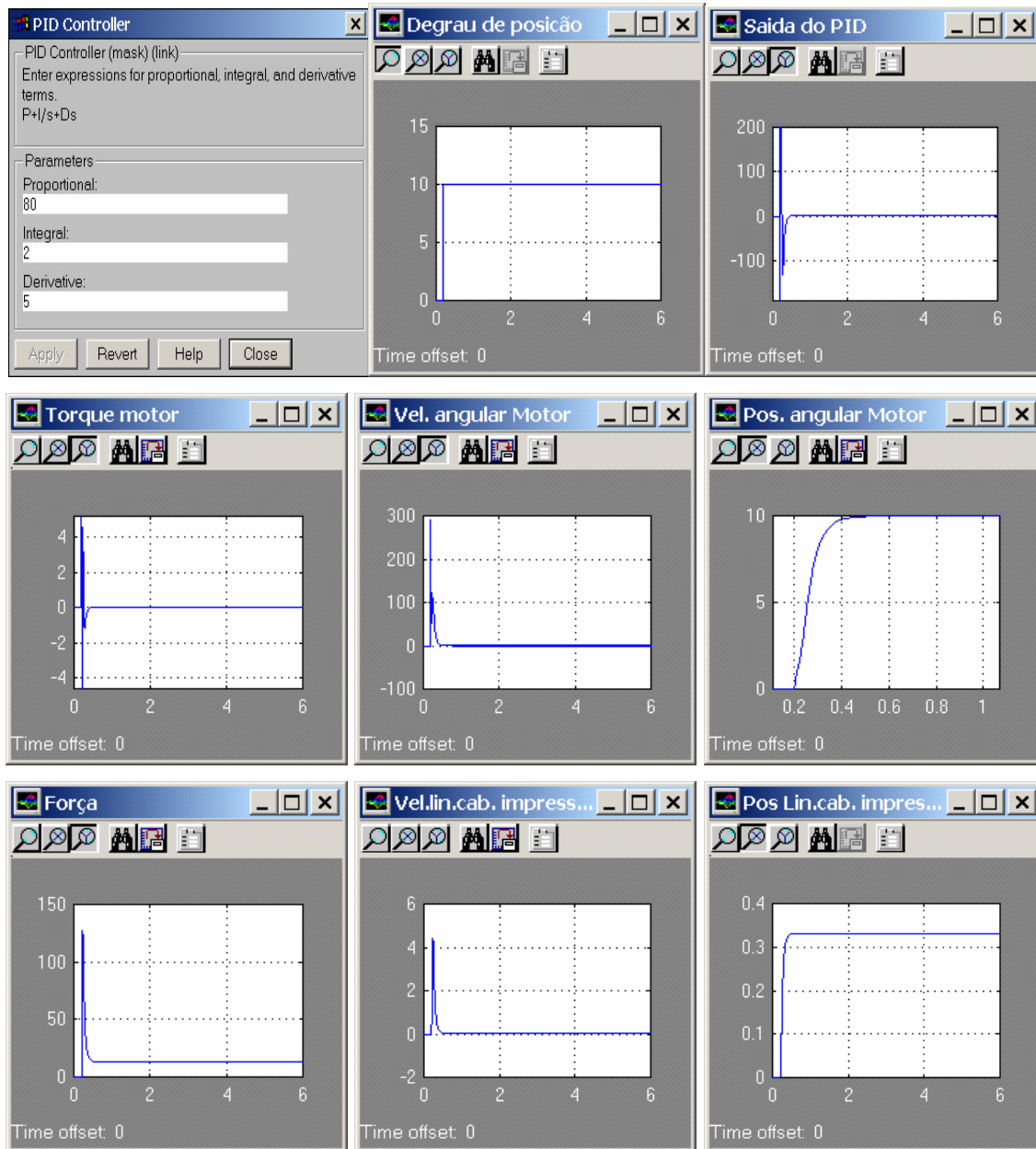


Fig. 98. Respostas ao degrau do modelo implementado no eixo X com controlador PID.

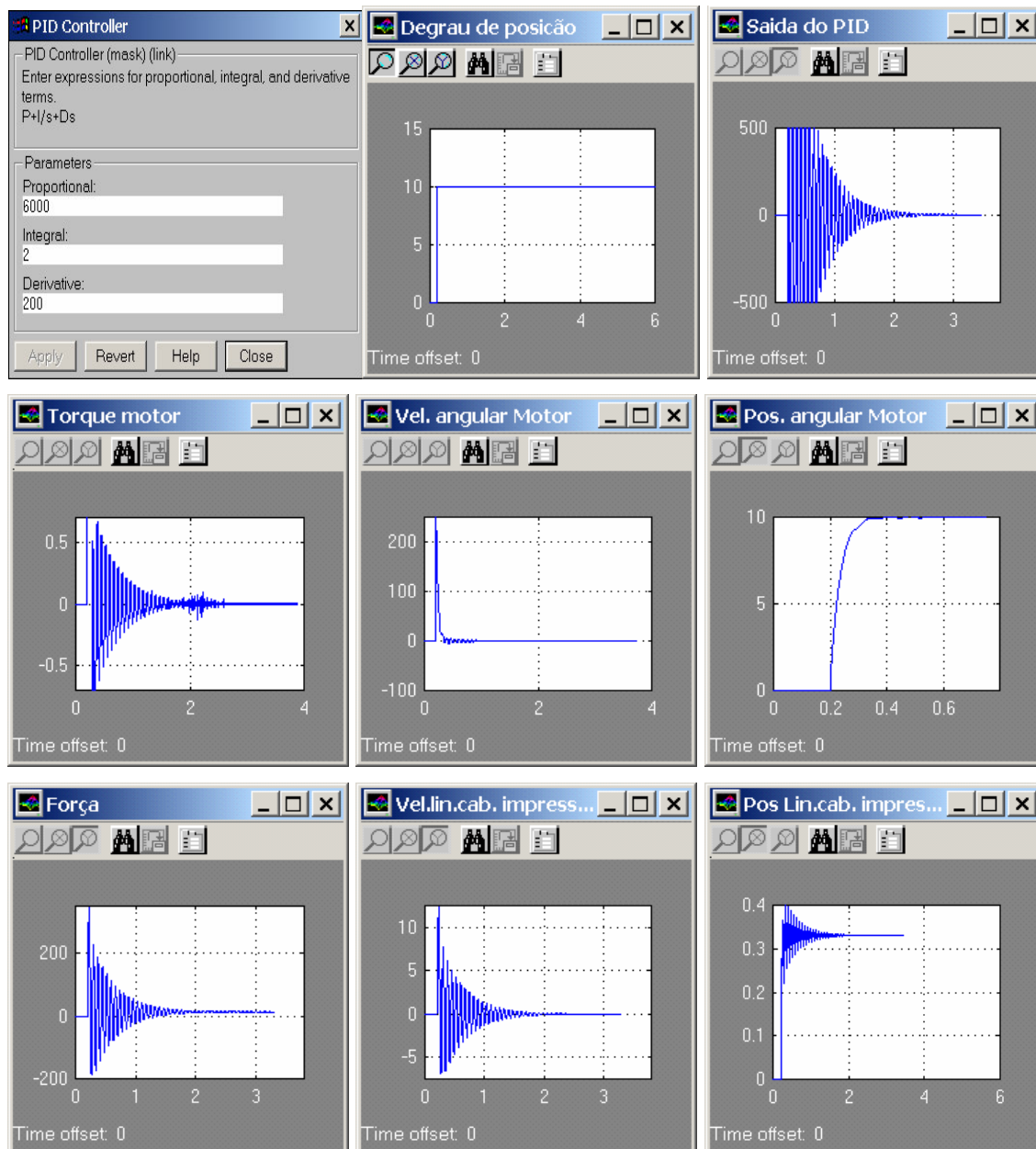


Fig. 99 Mais rápida resposta ao degrau obtida pela simulação do modelo do eixo X.

#### 4.3.4 Simulação do modelo do eixo Y em malha fechada

Como no eixo X, a primeira simulação realizada corresponde ao modelo do eixo Y apresentado na Fig. 86, em malha fechada mas sem controlador (controlador unitário) para conhecer o comportamento intrínseco do eixo. O modelo implementado no MatLab é o apresentado na Fig. 100 e os resultados da simulação deste modelo apresentam-se na Fig. 101.

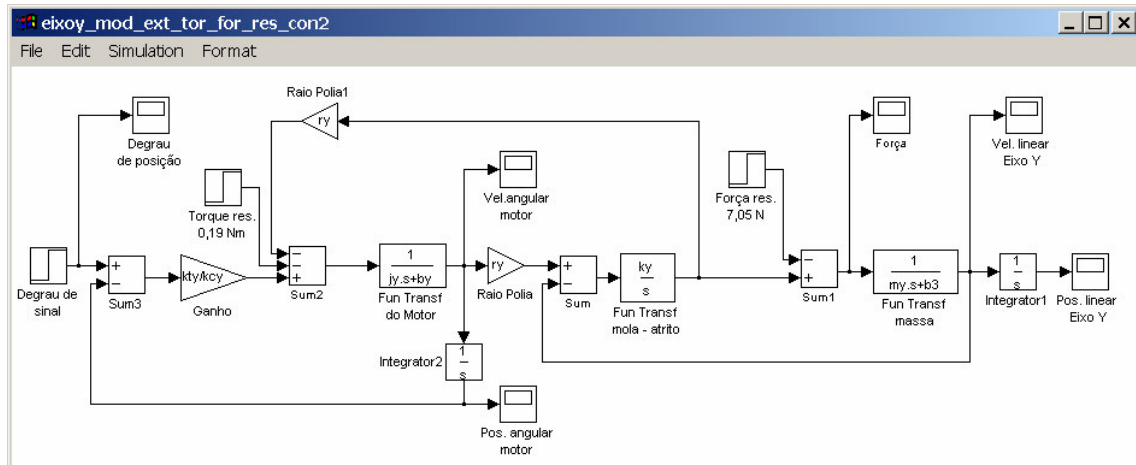


Fig. 100. Modelo dinâmico do eixo Y com realimentação de posição mas sem controlador (controlador unitário).

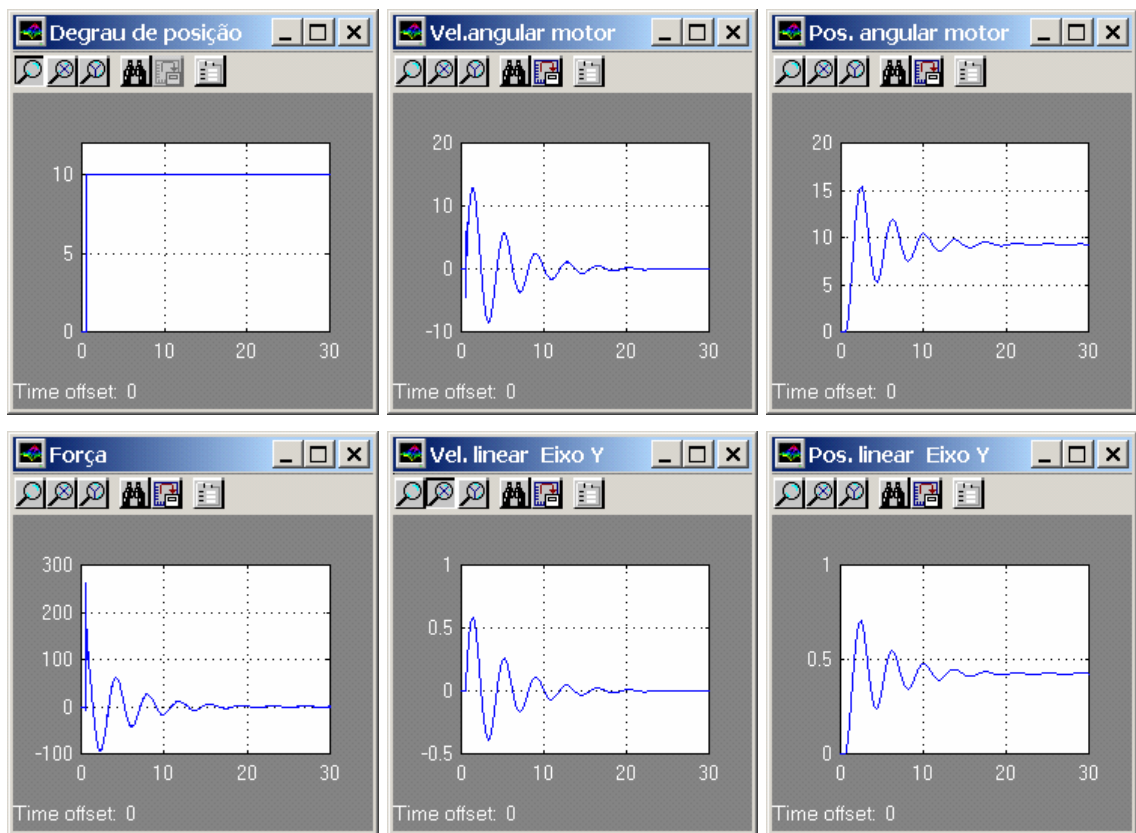


Fig. 101. Resultados da simulação do eixo Y com malha fechada de posição mas sem controlador.



Pode-se observar nestes gráficos que o sistema nestas condições (sem controlador e em malha fechada) é estável, mas apresenta muitas oscilações de posição. Pode-se também observar que a posição angular do servomotor (terceiro gráfico da Fig. 101) apresenta um erro em regime permanente.

#### 4.3.5 Especificações do controlador de posição requerido para o eixo Y

Como pode ser observado nestas simulações o tempo de acomodação, terceiro gráfico da Fig. 101, é muito maior que o requerido 0,34 s (veja, APÊNDICE 1 Determinação dos acionamentos do sistema impressor), por tanto ao igual que o eixo X a ação de um ganho proporcional  $K_p$  será necessário.

Incrementando  $K_p$ , a rigidez de controle aumenta e melhora a rejeição às perturbações de torque. Porém, um valor muito alto pode resultar em instabilidade, assim, como este eixo (Y) já apresenta oscilações deve ajustar-se este ganho cuidadosamente.

Nas simulações pode-se ver que existe um pequeno erro de seguimento no posicionamento do eixo (terceiro gráfico da Fig. 101), por tanto também para este eixo, será necessário a ação de um termo integrador  $K_i$ .

Como este eixo apresenta comportamento altamente oscilatório a ação do termo derivativo  $K_d$  no controlador é fundamental e provavelmente com um valor muito alto em relação ao eixo X.

Finalmente, considerando à análise anterior conclui-se que para este eixo é também suficiente o controlador do tipo PID apresentado na Fig. 94, para melhorar seu comportamento e ao igual que o eixo X também são desconsiderados a ação dos outros ganhos ( $A_{ff}$ ,  $V_{ff}$  e  $K_v$ ) da placa controladora de movimentos implementada no sistema impressor de formato extra largo (veja, "APÊNDICE 7 Algoritmo PID-FF implementado no controlador de movimentos").

Assim completa-se os componentes do diagrama de blocos do modelo dinâmico para este eixo do sistema impressor apresentado na Fig. 71.

#### 4.3.6 Simulação do modelo do eixo Y em malha fechada e controlador PID

A Fig. 102 apresenta o diagrama de blocos completo de um modelo dinâmico simples para o eixo Y do sistema impressor com realimentação de posição.

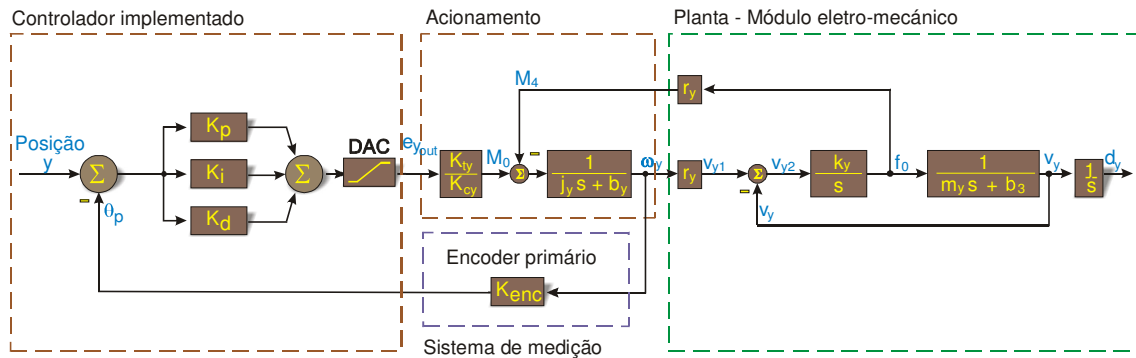


Fig. 102. Modelo dinâmico básico completo do eixo Y.

O comportamento do modelo é melhorado com a ação de um controlador PID como o implementado no modelo apresentado na Fig. 103 e que corresponde ao modelo completo desenvolvido para o eixo Y, Fig. 102.

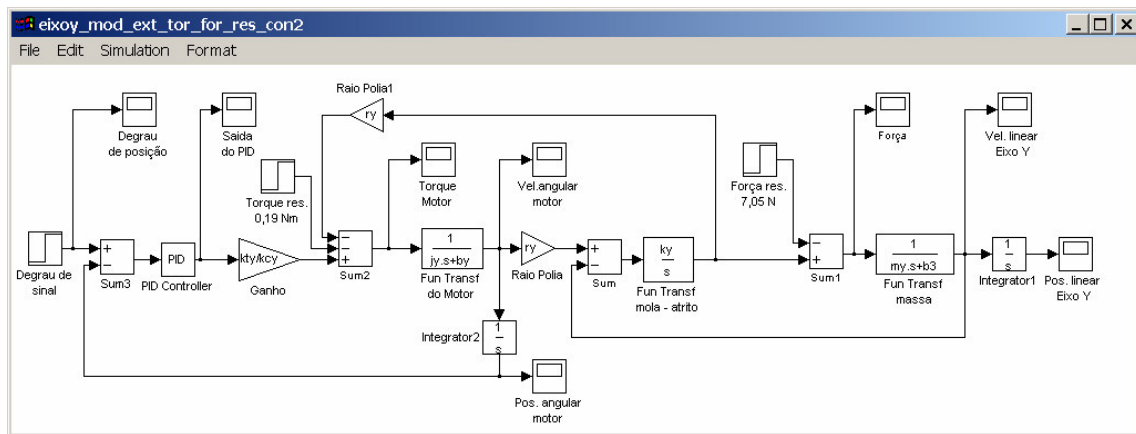


Fig. 103. Diagrama de blocos do modelo implementado no eixo Y com controlador PID.

Os valores dos ganhos do controlador PID e os resultados de uma primeira simulação são apresentados na Fig. 104. Pode-se observar nestes gráficos que a resposta do sistema melhorou consideravelmente teve um tempo de resposta próximo ao requerido (0,34 s), a posição angular do servomotor (sexto gráfico) apresenta-se sem sobre-passagem de sinal quando é permitido até 10 % e com um erro de seguimento menor a 0,18 mm (1/10 do diâmetro do ponto). Por outro lado, o gráfico da posição translativa do carro de acionamento Y (nono gráfico) apresenta uma leve sobre-passagem de sinal. Estas características, em seu conjunto, estão de acordo ao item "1.4 Requisitos de projeto" do sistema.

Com o objetivo de conhecer o comportamento do sistema com outros ganhos, foi realizado um segundo ensaio com os valores dos ganhos apresentado na Fig. 105.

Pode-se observar nos resultados desta simulação que a posição angular do servomotor (sexto gráfico da Fig. 105) atinge pela primeira vez o valor de referência em tempo menor que nas simulações anteriores, mas as oscilações no posicionamento do sistema aumentam consideravelmente, principalmente a do posicionamento translativo do carro de acionamento Y (nono gráfico da Fig. 105). Assim, estes ganhos não podem ser considerados, ainda que permitam que a velocidade angular do servomotor atinja o valor final num menor tempo.

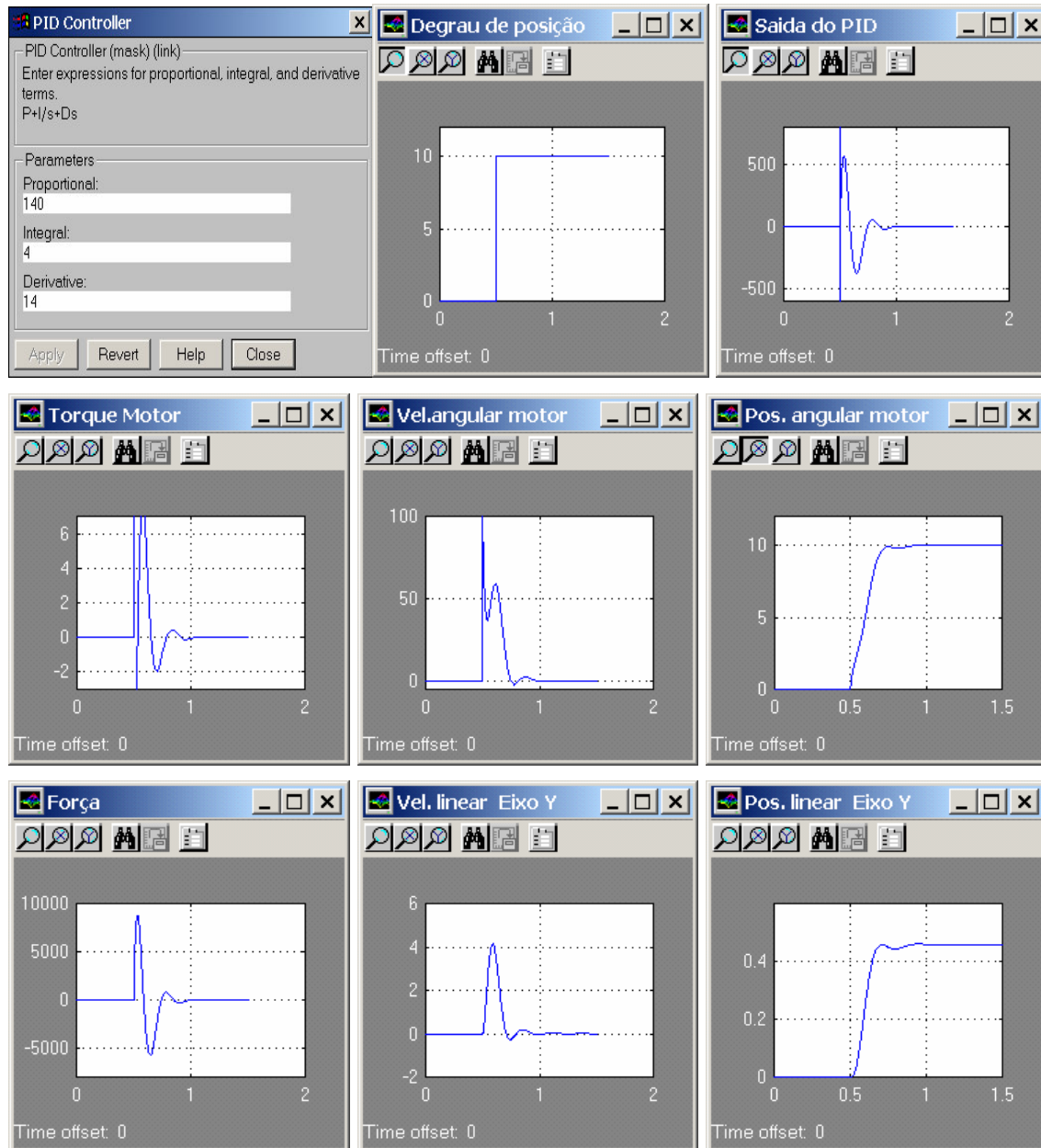


Fig. 104. Primeira simulação da resposta ao degrau do modelo implementado no eixo Y com controlador PID.

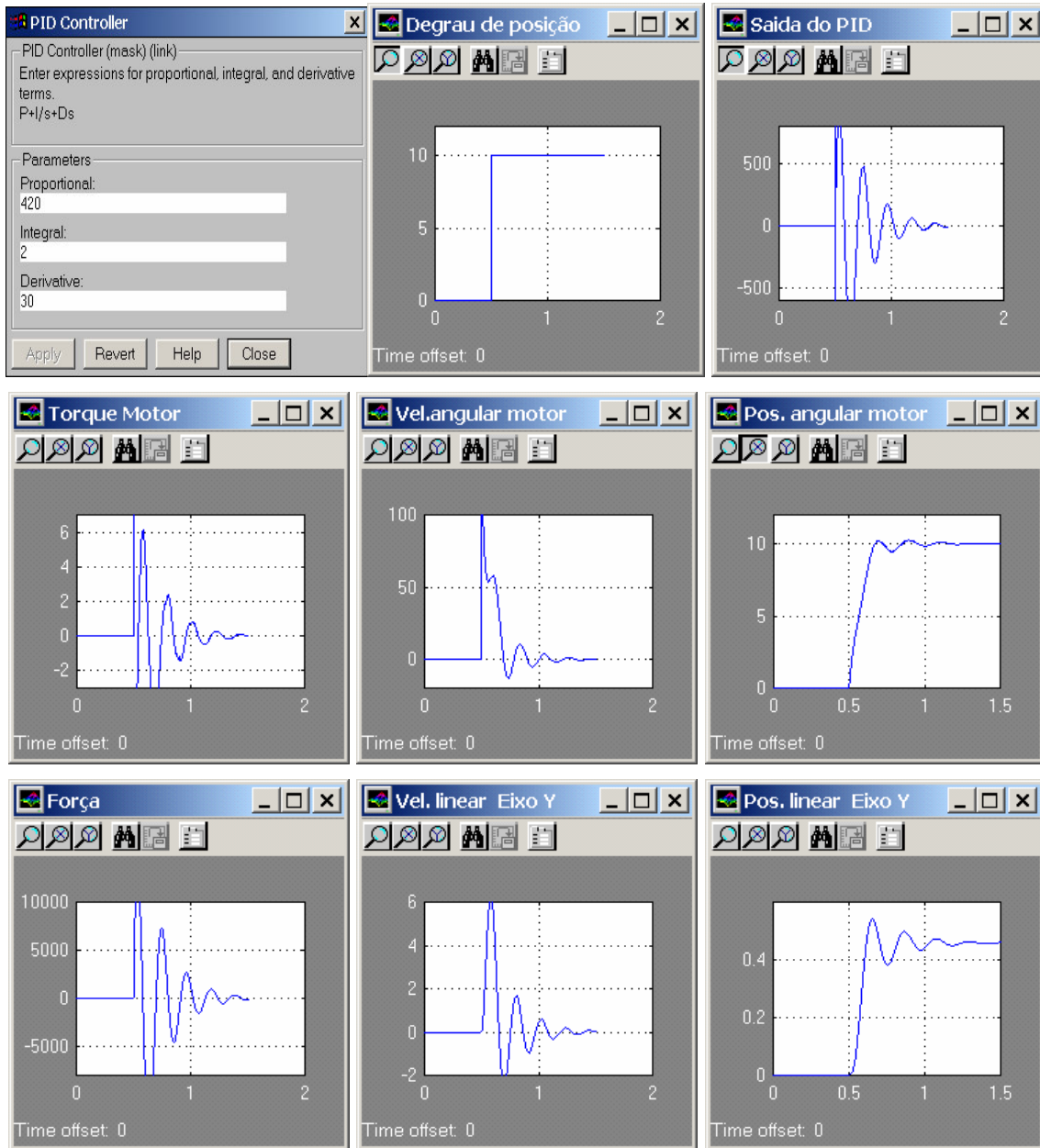


Fig. 105. Segunda simulação da resposta ao degrau do modelo implementado no eixo Y com controlador PID.

## CAPÍTULO 5 ENSAIOS E RESULTADOS OBTIDOS

### 5.1 Ensaio dinâmicos do conjunto impressor

#### 5.1.1 Introdução

Os ensaios dinâmicos têm como objetivo permitir o ajuste dos parâmetros do controlador da placa de controle de movimento e conseguir que ambos os eixos se movimentem de acordo as especificações do projeto.

Para conseguir o ajuste destes parâmetros o sistema implementado dispõe de *software* chamado de MAX (*Measurement & Automation Explorer*) com as seguintes funções:

- *auto - tuning* dos parâmetros do controlador,
- ensaio dinâmico de resposta em frequência (curvas de Bode),
- ensaio dinâmico de resposta ao degrau no tempo,
- ensaio de trajetória com ajuste da curva de aceleração (curva S)

#### 5.1.2 Parâmetros do controlador

A partir do programa MAX o primeiro passo foi realizar a função de *auto - tuning* nos dois eixos do conjunto impressor e obter um primeiro pacote de valores dos parâmetros do controlador. Posteriormente, seguindo a orientação de ajuste manual da Tabela 8, realizou-se uma série de ajustes finos até obter os valores apropriados nos parâmetros do controlador que permitiram resultados de resposta ao degrau de acordo ao item "1.4 Requisitos de projeto".

Tabela 8. Orientação básica para um ajuste manual do controlador PID  
(DA SILVA, 2003).

<b>Problema</b>	<b>Medida de ajuste</b>
Resposta muito lenta	Aumentar ganho proporcional
Resposta excessivamente oscilatória	Aumentar termo derivativo
Sobre-passagem excessiva	Reduzir taxa integral
Resposta inicialmente rápida e em seguida muito lenta	Aumentar taxa integral
Erro de regime	Aumentar taxa integral

Os valores destes parâmetros são os apresentados nas Fig. 106 e Fig. 107 para o eixo X e para o eixo Y, respectivamente.

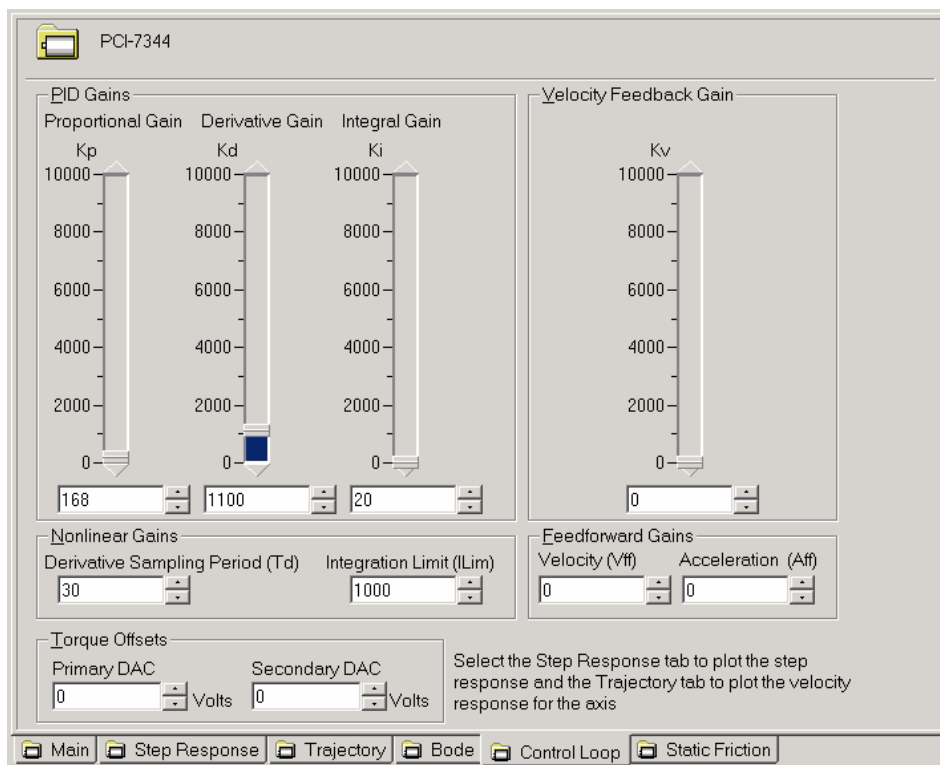


Fig. 106. Parâmetros do controlador do eixo X.

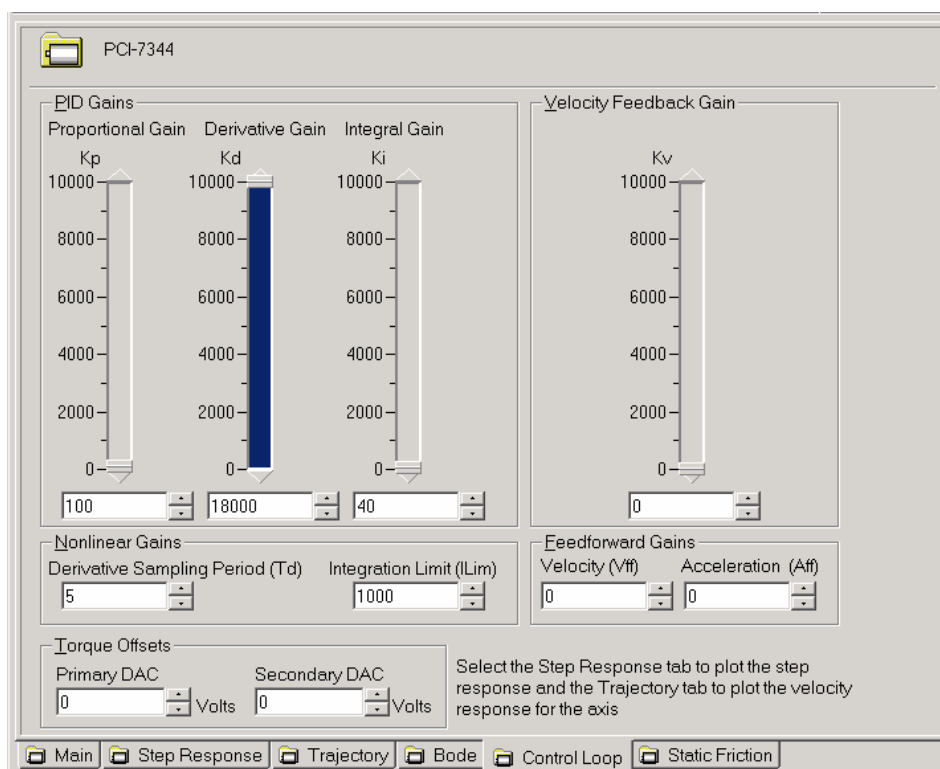


Fig. 107. Parâmetros do controlador do eixo Y.

Pode-se observar nos parâmetros obtidos que, por exemplo para obter no eixo Y as características de desempenho dinâmico requeridas, a componente derivativa é consideravelmente do que os outros ganhos devido à necessidade de diminuir as oscilações do servomotor (o incremento deste ganho proporciona maior amortecimento ao sistema). Este comportamento oscilatório já foi detectado na simulação a um degrau de posição da Fig. 101.

### 5.1.3 Resultados do ensaio de resposta ao degrau

Para o eixo X, com os parâmetros da Fig. 106 e uma referência de posicionamento de 01 rotação do eixo (8000 pulsos de encoder), o resultado do ensaio de resposta ao degrau realizado pelo programa MAX, é o apresentado na Fig. 108.

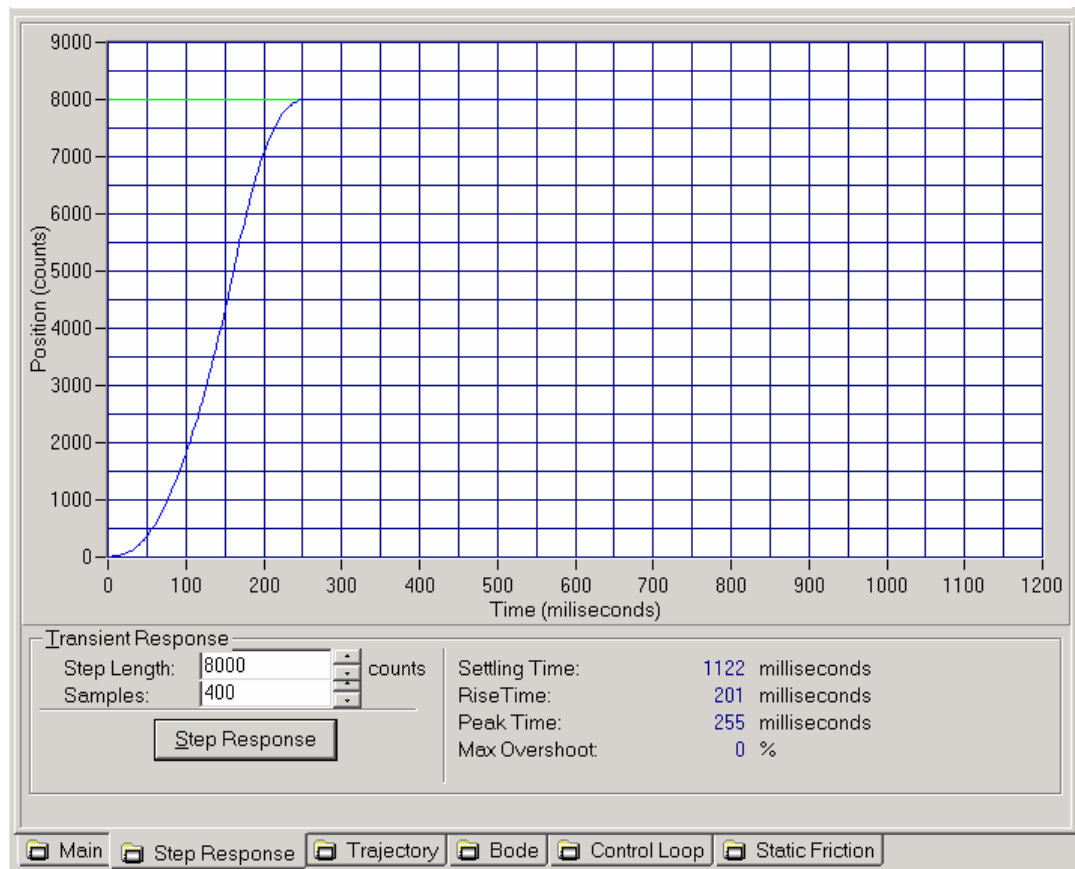


Fig. 108. Resposta medida a um degrau de posição de 01 rotação (8000 pulsos de encoder) do servomotor do eixo X.

Pode ser observado neste ensaio que com os valores ajustados no controlador (Fig. 106) o comportamento do eixo X atende as especificações realizadas no item "1.4 Requisitos de projeto" que são:

Sobre-passagem de no máximo 1%, no ensaio realizado de acordo aos resultados fornecidos pelo programa MAX é de 0%; um tempo de resposta de 0,25 s (veja "APÊNDICE 1 Determinação dos acionamentos do sistema impressor") sendo no ensaio de 0,201 s; e um erro de seguimento de 0,18 mm (1/10 do diâmetro do ponto), no ensaio pelo que se pode observar o erro de seguimento é nulo.

Para o eixo Y, com os parâmetros da Fig. 107 e uma referência de posicionamento de 0,5 rotação do eixo (4000 pulsos de encoder), o resultado do ensaio de resposta ao degrau é o apresentado na Fig. 109.

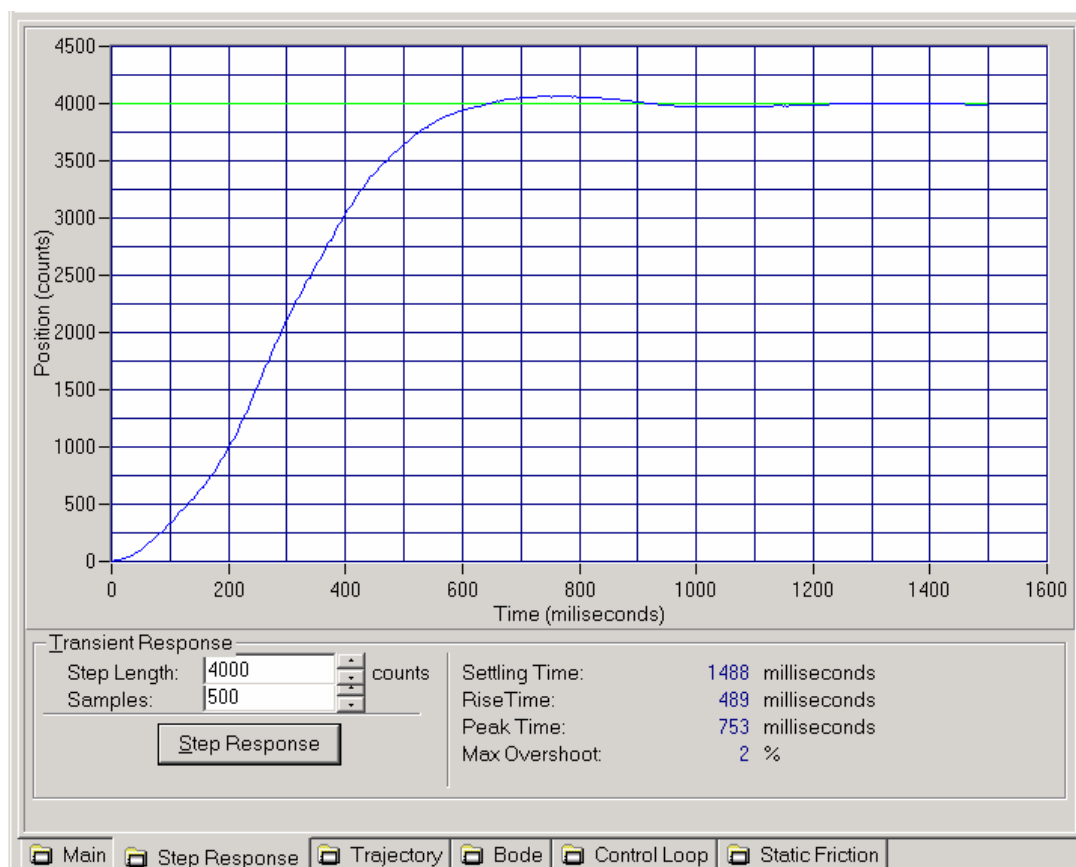


Fig. 109. Resposta medida a um degrau de posição de 0,5 rotação (4000 pulsos de encoder) do servomotor do eixo Y.

É possível observar neste gráfico que, para o posicionamento realizado de 4000 pulsos de posição angular o módulo eletromecânico do eixo Y apresenta sobrepassagem de 2% (aproximadamente 80 pulsos) mas, rapidamente é corrigido pelo controlador estabilizando-se em 1,488 s. A sobrepassagem é causada principalmente pela elevada inércia deste eixo.



Por outro lado, no protótipo do sistema impressor proposto o deslocamento do eixo Y para impressão de uma linha com o sistema impressor escolhido, é de 12 mm (correspondente aos 7 bicos existentes, item, 2.3.5 Válvula-solenóide com tinta sob-pressão). Como o eixo Y realiza 28 pulsos de *encoder* por milímetro de deslocamento, 12 mm do cabeçote impressor representam 336 pulsos. O resultado da resposta ao degrau para este deslocamento de 336 pulsos é o apresentado na Fig. 110.

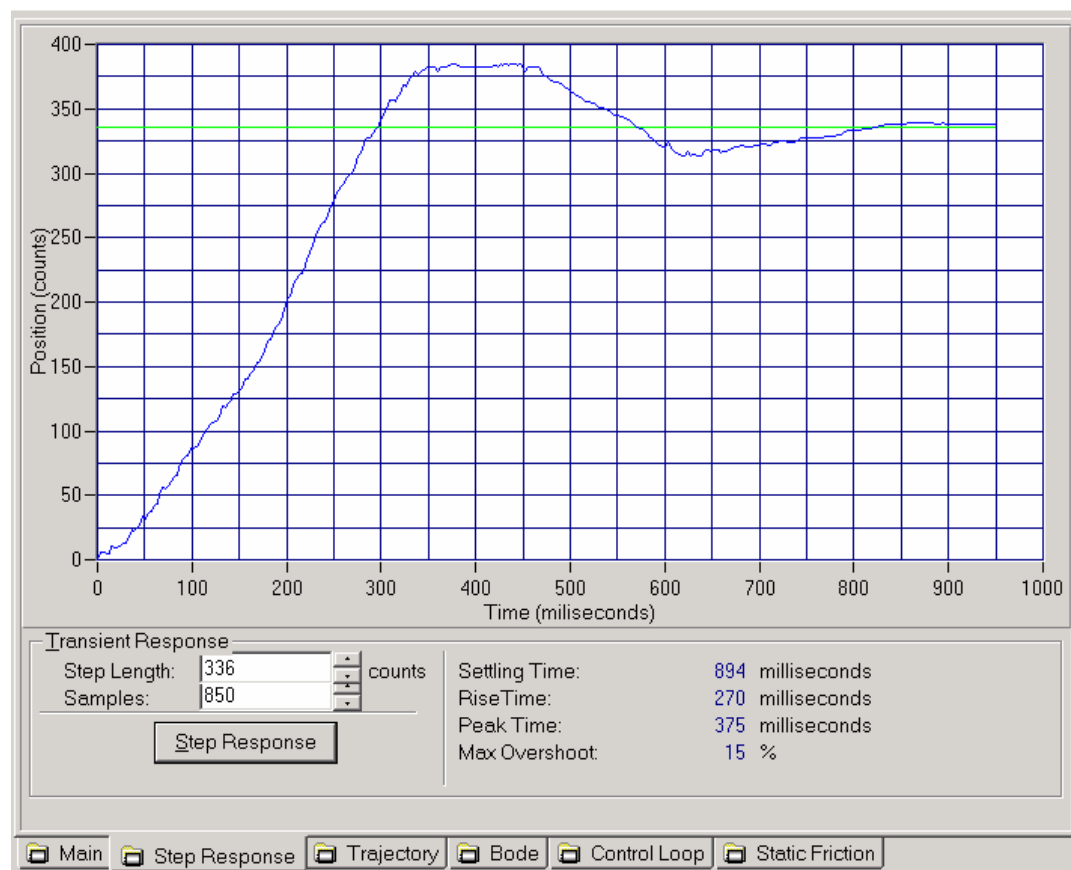


Fig. 110. Resposta ao degrau de 336 pulsos de posição do eixo Y.

Pode-se observar neste ensaio que corresponde a um requisito concreto de posicionamento do protótipo, que o comportamento da resposta ao degrau com os parâmetros definidos para este eixo (Y) atende às especificações realizadas no item "1.4 Requisitos de projeto" que são:

Uma sobre-passagem de no máximo 15% que foi o valor obtido no ensaio realizado; um tempo de resposta de 0,340 s (veja "APÊNDICE 1 Determinação dos

acionamentos do sistema impressor"), sendo no ensaio o tempo de resposta de 0,270 s e o tempo de pico de 0,375 s, valores que satisfazem o requerido; e, finalmente, como apresentado no gráfico um erro de seguimento mínimo.

Como pode ser observado entre os gráficos que correspondem à resposta ao degrau de posição angular para o eixo X, (simulação - Fig. 98 e ensaio - Fig. 108), e para o eixo Y (simulação - Fig. 104 e ensaio - Fig. 109) têm comportamento similar. Devido à esta semelhança, o ajuste dos ganhos do sistema implementado tornou-se mais simples, devido a que um trabalho similar já tinha sido realizado ao ajustar-se os ganhos do controlador para os modelos matemáticos.

Como pode ser observado entre o gráfico da Fig. 98 e a Fig. 108 que correspondem à resposta ao degrau de posição angular para o eixo X e o sexto gráfico da Fig. 104 e a Fig. 109 para o eixo Y, o resultado da resposta ao degrau entre as simulações e os ensaios tem um comportamento similar. Devido a esta semelhança o ajuste dos ganhos da placa de controle de movimento foi mais simples, devido a que um trabalho similar já tinha sido realizado ao ajustar os ganhos do controlador para os modelos matemáticos.

#### 5.1.4 Ensaio de trajetória

Com os requisitos de desempenho na resposta ao degrau satisfeitos, para ambos os eixos, o próximo passo é realizar os ensaios de trajetória, que servem para verificar o comportamento do sistema de controle de velocidade e ajustar a curva S de aceleração. Este ensaio é muito importante já que, dependendo do princípio de impressão utilizado, uma variação na velocidade representaria impressão de pontos a distâncias irregulares (veja item "Cabeçote impressor" no "CAPÍTULO 3 CONCEPÇÃO DO PROTÓTIPO").

Pode-se observar na Fig. 111 que com os parâmetros definidos, o ensaio de trajetória é satisfatório, o deslocamento do eixo X é constante e sem variações na velocidade. Realiza-se a aceleração e desaceleração em aproximadamente 0,300 s. Na memória de cálculo, (APÊNDICE 1 Determinação dos acionamentos do sistema impressor), o tempo de aceleração determinado para o eixo X foi de  $t_{ax}=0,250$  s, o que indica que o acionamento adquirido está respondendo bem às especificações impostas.

O deslocamento total realizado no ensaio do eixo X da Fig. 111, é de 94000 pulsos que corresponde a 3357 mm representando aproximadamente o curso final de "boca" da impressora.

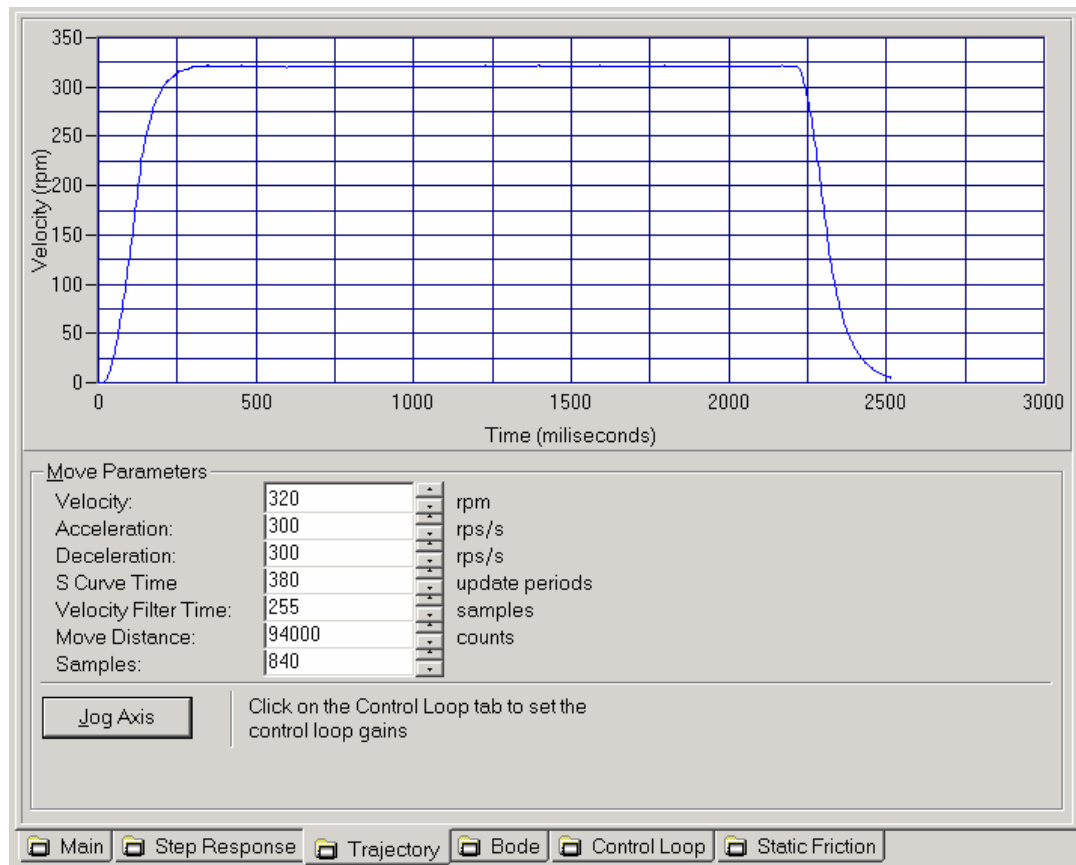


Fig. 111. Ensaio de perfil de velocidade na trajetória do eixo X.

Para que fosse obtido em regime permanente o comportamento da velocidade como apresentado na Fig. 111 do ensaio de trajetória, além de se ajustar os ganhos do controlador PID foi também necessário ajustar-se o período de amostragem derivativo (4.2.4 Algoritmo do controlador de movimentos). Com o ajuste deste parâmetro conseguiu-se que o servomotor parasse de gerar um ruído audível causado pelo valor do ganho derivativo requerido no controlador para atender a os requisitos de projeto.

No ensaio de trajetória do eixo Y apresentado na Fig. 112 para um deslocamento igual ao que será realizado na impressão de uma linha (12 mm = 336 pulsos de *encoder*) os tempos de aceleração e desaceleração estão em torno aos obtidos

teoricamente no "APÊNDICE 1 Determinação dos acionamentos do sistema impressor".

Segundo este cálculo, o tempo exigido para aceleração é de 0,170 s e o tempo realmente utilizado para atingir a máxima velocidade, segundo o ensaio de trajetória da Fig. 112, é de aproximadamente 0,180 s, o que significa que o acionamento selecionado se encontra funcionando de acordo com o previsto na memória de cálculo.

Mas o tempo total de posicionamento é maior do que o esperado, devido à carga inercial deste eixo, já que, como pode ser observado no gráfico do ensaio, a desaceleração exige um tempo maior e apresenta uma inclinação variável. Devido também à inércia observa-se uma sobre-passagem no valor final do posicionamento.

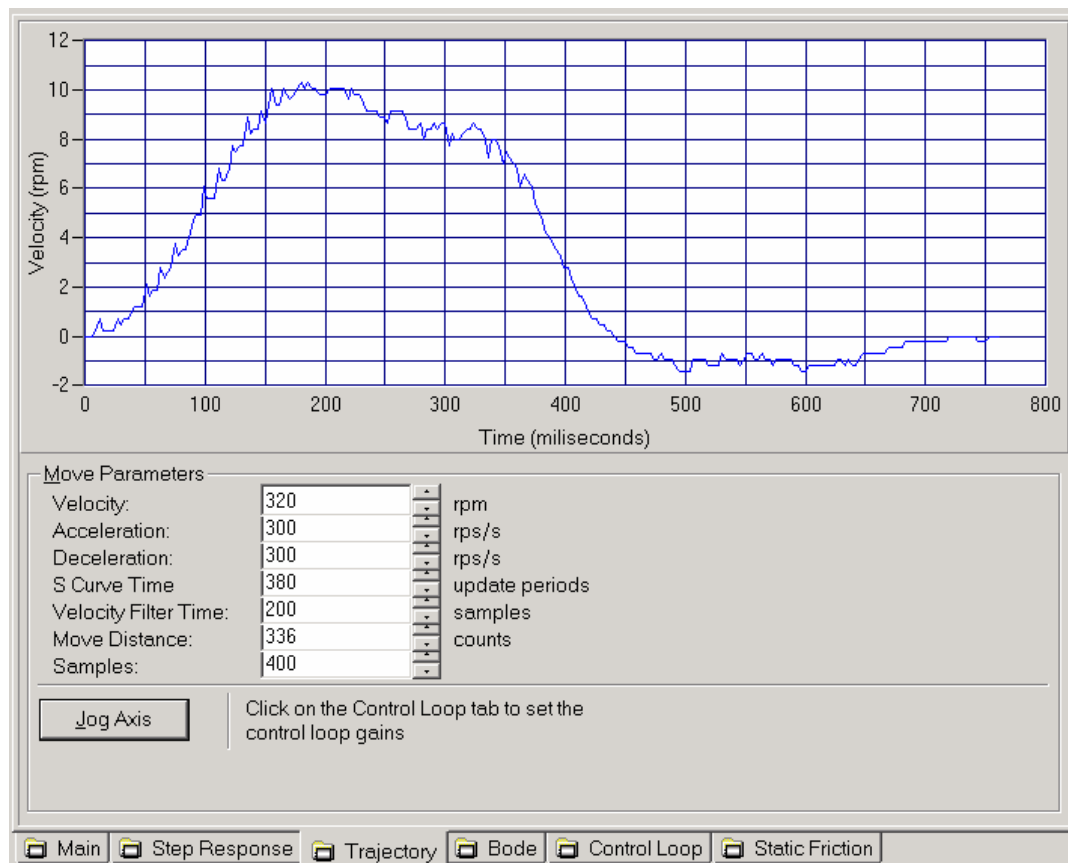


Fig. 112. Ensaio de perfil de velocidade na trajetória do eixo Y.

## 5.2 Testes técnicos preliminares do sistema impressor

Os resultados técnicos preliminares obtidos dizem respeito aos testes de impressão realizados com o protótipo do sistema impressor desenvolvido. Estes testes serviram para ajustar a impressora de maneira a realizar os desenhos em formato extra largo corretamente.

### 5.2.1 Verificação da resolução

Este teste tem como objetivo verificar o diâmetro do ponto realizado pelo cabeçote impressor adquirido em função da frequência de energização dos solenóides. O resultado do teste apresentado na Fig. 113 mostra por exemplo, que o cabeçote impressor a uma frequência de acionamento de 1400 Hz realiza pontos de 2,6 mm de diâmetro correspondente a 9,7 dpi. Aumentando a frequência de acionamento, o diâmetro do ponto diminui gradualmente. A partir de 2000 Hz os solenóides pararam de funcionar devido a que sua resposta dinâmica é menor que a frequência de acionamento.

Considerando que o diâmetro do ponto requerido para o sistema impressor é 1,8 mm (veja Fig. 50 do item "Imagem e resolução visual") a frequência de acionamento dos bicos será a correspondente, 1900 Hz. Caso se requeira um preenchimento maior pode-se utilizar uma frequência menor.

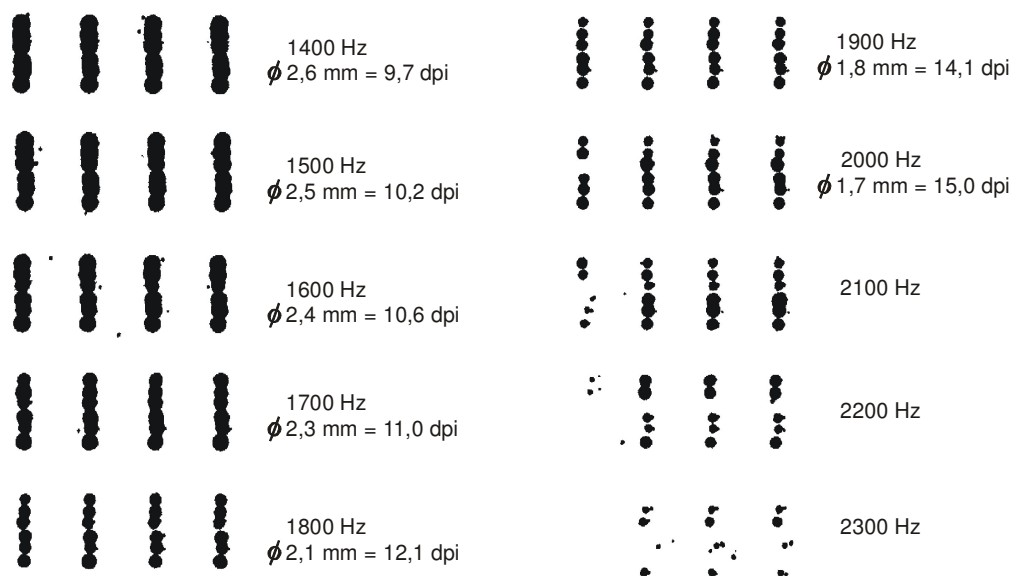


Fig. 113. Ensaios realizados variando a frequência de energização do dispositivo de impressão, sobre um papel branco de 75 g/m<sup>2</sup>.

### 5.2.2 Teste de impressão

O primeiro teste de impressão realizado foi a confecção de um quadrado de 30x30 pontos como apresentado na Fig. 114, este teste tem como objetivo ajustar a disposição dos pontos.

O quadrado realizado é suficiente para alinhar os bicos ejetores já que esta figura permite conhecer as principais características de uma impressão, entre as quais podemos citar:

- Realização de linhas verticais e horizontais paralelas entre si;
- Obtenção de proporção entre os comprimentos das linhas (ao imprimir um quadrado obter o quadrado e não um retângulo);
- Finalmente permite verificar se existe algum desalinhamento entre os vários segmentos verticais que constituem uma mesma linha.

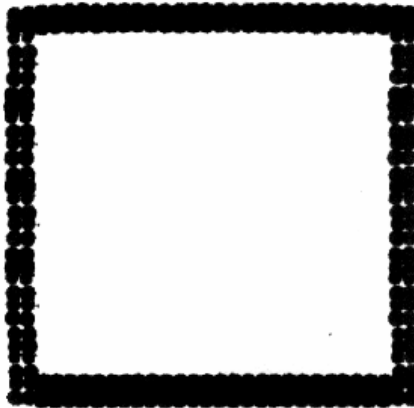


Fig. 114. Quadrado de 30x30 pontos impresso no sistema proposto.

O teste seguinte foi a impressão de dois retângulos nos extremos da área de impressão como mostrado na Fig. 136 do "APÊNDICE 4 Fotos dos componentes do sistema impressor *raster*". A Fig. 115 apresenta o detalhe desta impressão.

A partir dos pontos superior e inferior da Fig. 115 b), foram traçadas duas linhas contínuas com um espaçamento igual ao diâmetro do ponto (1,8 mm), da mesma maneira, foi traçada uma linha pontilhada passando pelo ponto mais afastado, a distância entre estas duas linhas é o erro de desalinhamento ocorrido na impressão e corresponde a 0,60 mm. Considerando que no item, 1.4 Requisitos de projeto o erro máximo de desalinhamento permitido é um diâmetro de ponto (1,8 mm), este resultado se encontra dentro o especificado.

Cabe lembrar que se admite um erro máximo de desalinhamento igual a um diâmetro de ponto, porque a uma distância de 6 metros separações maiores poderão ser distinguidas por pessoas da faixa etária dos 20 anos, veja a Fig. 50 do item "Imagem e resolução visual" do item "2.4.3 A visão".

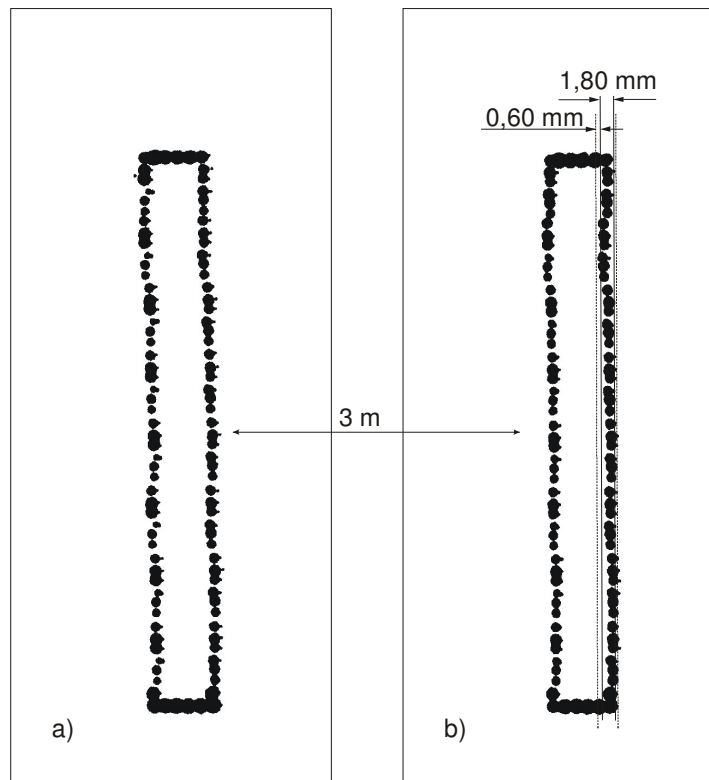


Fig. 115. Detalhe dos retângulos impressos nos extremos da área de impressão. a) Extremo direito. b) Extremo esquerdo

Qualquer desalinhamento que pudesse existir durante a impressão é causado pelos atrasos no programa do *software* gerenciador, seja pelo atraso na leitura da posição ou pelo atraso na execução dos comandos quando o sistema já se encontra em movimento. Este problema só poderá ser resolvido com a utilização de computadores mais rápidos e com um programa mais apurado sendo executado a partir de um arquivo executável. Atualmente o programa do *software* gerenciador necessita da linguagem LabView rodando para ser executado.

Observa-se no retângulo da Fig. 115 a), que existem vários pontos com diâmetros maiores e menores na primeira linha vertical, já na segunda os pontos realizados se apresentam com diâmetros similares, isto acontece devido a que o cabeçote ficou

um tempo sem funcionar ocasionando uma retração da tinta nos condutos do cabeçote, situação que se regula quando a impressão da segunda linha.

Outra particularidade que pode ser observada é um pequeno rastro de tinta depois do ponto, isto acontece devido a que a impressão é *on the fly* e pequenas partículas de tinta são lançadas em direção do movimento (de esquerda para direita).

### 5.2.3 Exemplo de impressão

A Fig. 116 apresenta a tela do computador com a figura a ser impressa. Para obter a informação de impressão foi utilizado neste exemplo a aquisição via *software* realizada integralmente no programa LabView, a Fig. 117 mostra o protótipo do sistema impressor desenvolvido em funcionamento.

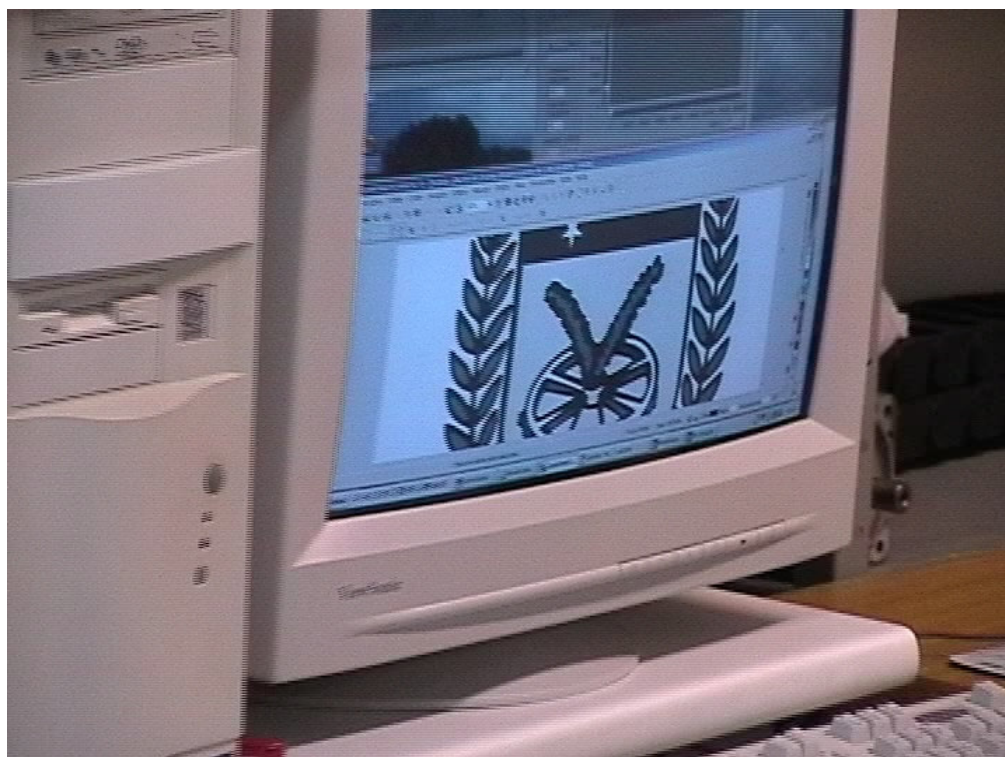


Fig. 116. Tela no computador da figura a ser impressa.





Fig. 117. Protótipo do sistema impressor em funcionamento.

Finalmente a Fig. 118 apresenta uma impressão em formato extra-largo realizada com o sistema impressor projetado. A impressão foi realizada em preto e branco devido a que o cabeçote impressor do protótipo por enquanto só se encontra com uma linha de bicos ejetores, o preto.



Fig. 118. Impressão de aproximadamente 6 m<sup>2</sup> realizada pelo sistema impressor de formato extra-largo proposto.

## CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÃO PARA CONTINUIDADE

### 6.1 Conclusões

#### 6.1.1 Conclusões sobre o sistema impressor *raster*

O sistema impressor *raster* proposto pode ser desenvolvido e montado integralmente no Brasil, este fato permitirá receber assistência técnica local imediata e a menor custo. A concepção global deste sistema impressor *raster* encontra-se com patente já requerida no Brasil sob o número PI 9900581-6.

O sistema impressor foi desenvolvido a um custo muito inferior ao de impressoras da mesma largura de boca existentes. Segundo a análise feita no exame de qualificação deste projeto (PIMENTEL, 2002) o custo total considerando os gastos realizados com a aquisição dos componentes e o custo das bolsas da equipe do projeto foi de 183.576,00 R\$ o que em dólares na época representou 73.430,00 U\$ e como explicado no item "1.2 Soluções e processos existentes" uma impressora comercial de largura de boca similar (3 m) tem um custo de aquisição em torno de 500.000,00 U\$.

Os resultados de impressão obtidos e apresentados no "5.2 Testes técnicos preliminares" foram satisfatórios, a integração da mecânica com a eletrônica mediante o *software* gerenciador funcionou adequadamente permitindo a impressão dos desenhos. Os diâmetros dos pontos impressos pelo cabeçote impressor são do tamanho requerido, como observado na Fig. 115, alguns dos pontos apresentaram um pequeno rastro, mas como a mídia será exibida a vários metros esta peculiaridade não será distinguida.

O projeto desenvolvido conta com toda a programação necessária e todos os elementos eletro-eletrônicos para funcionar no modo colorido (sistema RGB), mas como o cabeçote impressor atualmente só conta com uma linha de tinta (preto), ainda não se conseguiu imprimir uma arte colorida e avaliar visualmente seu desempenho neste modo. Com o intuito de testar este funcionamento foi

implementado no cabeçote impressor conjuntos de LED's que simulam o funcionamento dos bicos ejetores coloridos como pode ser apreciado na Fig. 117.

O árduo trabalho realizado nas sub-rotinas do programa gerenciador que diz respeito ao processamento da informação colorida tanto na aquisição como no acionamento dos bicos, não é explicitamente apresentado nesta tese mas certamente requereu de muita dedicação.

O módulo que ofereceu maior desafio técnico e que por isto necessitou maior atenção foi, com certeza, o de aquisição dos sinais de impressão da Impressora-fonte, tanto a interface de aquisição por *hardware* como a de *software*, pois para obter a informação por qualquer destes caminhos, teve-se que acessar sistemas (sinais eletrônicos da Impressora-fonte ou estrutura interna dos arquivos a serem impressos) originalmente inacessíveis ao usuário comum de impressoras.

O módulo de pós-processamento, principalmente no que diz respeito ao controlador de movimentos e ao *software* gerenciador do sistema requereram também especial atenção devido a que estes realizam a integração entre o sistema eletro-eletrônico e o mecânico. A adequada integração permitiu o funcionamento coordenado do sistema impressor proposto.

#### 6.1.2 Conclusões sobre o conjunto impressor

O conjunto impressor desenvolvido atende as especificações (item "1.4 Requisitos de projeto") levantadas junto as micro e pequenas empresas de comunicação.

O projeto mecânico realizado no que diz respeito ao seu sistema de transmissão de movimentos e sistema de leitura da posição translativa, considera uma máquina com área de trabalho de 3,5x9,0 m, mas por limitações de espaço físico foi desenvolvido de 3,5x2,0 m, como observado na estrutura mecânica do protótipo do conjunto impressor da Fig. 134.

O projeto de adequação dos acionamentos e das guias realizado no eixo X onde o cabeçote impressor se movimenta permite conseguir velocidades de até 180 m/min (SCHUCO DESIG, 2003), sendo mais que o dobro do requerido (60 m/min). Portanto, se a dinâmica do cabeçote impressor estiver nesta faixa de funcionamento, pode-se realizar impressões a 120 m<sup>2</sup> /h.

Atualmente o cabeçote impressor adquirido (item, Cabeçote de válvulas-solenóide) é o dispositivo que limita a velocidade de impressão, segundo a folha técnica seria possível movimentar o cabeçote a uma velocidade de 60 m/min. Com esta velocidade e as características do conjunto impressor seria possível realizar impressões a 40 m<sup>2</sup>/h, não entanto quando este cabeçote impressor foi acionado à velocidade especificada a tinta expelida quando incidia no papel deixava um rastro de pequenas gotas em direção do movimento, este fato obrigou a reduzir a velocidade até conseguir que este rasto seja mínimo. Nestas condições a rapidez de impressão diminuiu para 7,2 m<sup>2</sup>/h, assim, a impressão da Fig. 118 que tem uma área 6 m<sup>2</sup> de foi realizada em 50 min. Devido a estes fatores será necessário realizar um melhoramento do cabeçote impressor adquirido ou ensaiar outros tipos de cabeçotes que tenham características superiores ou no mínimo iguais ao adquirido.

Como apresentado nos ensaios dinâmicos realizados em ambos os eixos, as características de desempenho dinâmico requerido para resposta ao degrau, tempo de resposta e erro de seguimento foram satisfeitas, veja item "5.1.3 Resultados do ensaio de resposta ao degrau".

Os requerimentos de resolução de impressão também foram conseguidos ao obter do cabeçote impressor resoluções de 14 dpi como apresentado na Fig. 113 do item "5.2.1 Verificação da resolução". Cabe lembrar que a resolução de 14 dpi como apresentado na Fig. 50, é a suficiente para que pessoas da faixa etária dos 20 anos não consigam ver os detalhes à distâncias maiores ou iguais a 6 metros

O erro de posicionamento entre pontos é igual à resolução do sistema de medição translativo implementado. Como o diâmetro do ponto realizado é de 1,8 mm (14 dpi), o erro máximo de posicionamento especificado é um décimo deste valor, 0,18 mm. Por tanto, como a escala translativa indutiva do encoder implementado possui uma resolução de 50 µm (0,05 mm) veja item "3.2.3 Conjunto impressor", o erro de posicionamento é sete vezes melhor que o especificado.

Com este sistema de medição translativo utilizado, pode-se inclusive implementar cabeçotes impressores com resoluções maiores p/ex. 250x250 dpi (pontos com diâmetros de 0,1 mm) e conseguir imprimir mídias para serem vistas a distâncias menores (aproximadamente a 40 cm, veja Fig. 50).

O erro máximo de desalinhamento como explicado no item "5.2.2 Teste de impressão" é de 0,6 mm. Segundo as especificações o valor máximo admitido deste erro é igual a um diâmetro de ponto (1,8 mm), por tanto o erro de desalinhamento realizado pelo conjunto impressor está dentro o especificado.

Finalmente, com o objetivo de melhorar o comportamento dinâmico do módulo eletro-mecânico do eixo Y, seria aconselhável retirar o servomotor de acionamento deste eixo com o objetivo de diminuir a inércia. Mas este trabalho implica em utilizar outro sistema de transmissão já que segundo o fabricante (SCHUCO DESIG, 2003) o sistema utilizado com correia sincronizadora é o que permite maiores deslocamentos, até 10 m.

### 6.1.3 Principais contribuições

Como contribuições deste trabalho, pode-se oferecer soluções nacionais em tecnologia de impressão que atendem aos requerimentos de impressão de formato extra-largo, bem como, fornecer *knowhow* de impressão a empresas do ramo.

O protótipo desenvolvido será submetido a testes de campo a serem realizadas pela empresa parceira do projeto que utilizará o sistema impressor no atendimento a requerimentos de mídia e comunicação existentes no mercado local da Grande Florianópolis e região. Considerando o rápido crescimento de empresas de comunicação e a necessidade por mídias de formato extra-largo e, de acordo com os resultados da nova tecnologia, em novas versões, poder-se-á expandir o atendimento de serviços a todo o país e inclusive ao Mercosul.

## 6.2 Sugestão para futuro trabalho

A partir do conhecimento obtido no desenvolvimento deste primeiro protótipo e utilizando inicialmente da estrutura mecânica do conjunto impressor assim como toda a integração já realizada da parte eletro-eletrônica, pode-se desenvolver uma máquina multifuncional flexível o suficiente para que a mesma estrutura física possa operar como diferentes equipamentos exigindo no máximo a troca física do cabeçote onde se encontra a ferramenta ativa. A troca do cabeçote deve ser concebida de modo a ser de fácil, rápida e segura realização.

A máquina multifuncional poderia operar como:

- Uma impressora, ao acoplar um cabeçote impressor.
- Um sistema de corte e gravação, acoplando um LASER.
- Uma máquina de corte de papelão, acoplando uma faca.
- Uma máquina de desenho vetorial (*plotter*), acoplando uma caneta.
- Uma fresa, adicionando um terceiro eixo vertical e colocando na ponta um motor de alta rotação.

Esta máquina multifuncional é uma necessidade das empresas de comunicação que em geral são micro ou pequenas empresas e carecem de espaço físico para abrigar simultaneamente estas diversas máquinas que são de interesse, especialmente se forem de grande porte, além do que também não dispõe de características financeiras que lhes permitam investir simultaneamente nos diversos equipamentos para realizarem as tarefas acima descritas. Tendo em vista também que sua amortização pode ser lenta demais, pois os distintos equipamentos acabam subutilizados ao aguardar por entrada de serviços que as requisitem, enquanto obsolecem rapidamente. Tal equipamento tem duas grandes vantagens, requer apenas um investimento e estará ativo (amortizando-se) sempre que tiver qualquer solicitação de serviços.

Para a máquina multifuncional realizar todas as funções descritas exceto seu funcionamento com movimentação seqüencial para impressão *raster* (Fig. 10) já implementado, será necessário programar no *software* gerenciador procedimentos que lhe permita realizar a movimentação continua ilustrada na Fig. 9. A forma destes movimentos deverão ser obtidos a partir da informação de arquivos gráficos do tipo vetor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEROGRAFIA: **Fazendo arte**. Disponível em: <<http://aerografia.com>>. Acesso em: 5 jun. de 2004.

ALTAIR, G. R. de J. **Uma contribuição para o desenvolvimento e controle de sistemas de posicionamento submicrométricos**. 1999. 191 pg. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis

BACK, N. **Projeto de produtos industriais**. Apostila de curso - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1993

BORLAND. **C++ Builder - 6 Studio**: Technical Overview. USA, 2003. Disponível em: <<http://www.borland.com/cbuilder>>. Acesso em: 10 nov. 2003.

COATES SCREEN: Fabricante de tintas ultravioleta. **Link Magazine Articles**. 2004.

COLUMBIA UNIVERSITY COMPUTING HISTORY: A Chronology of Computing at Columbia University. Disponível em <<http://www.columbia.edu/acis/history>>. Acesso em 20 fev. 2004.

COMPUTER MUSEUM TONH. **Printers**. Disponível em: <<http://www.tonh.net/museum/printers.html>>. Acesso em: 10 out. 2003.

CORTESE, F. **The visual System**. 2004. Clinical Neuroanatomy MS709, Tutorial #8. Department of Psychology, McMaster University. Canada. Disponível em: <<http://brain.mcmaster.ca/~fil>>. Acesso em: 10 mar. 2004.

DA SILVA, J. M. **Ajuste de Controladores PID**. 2000. Curso de Extensão - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Disponível em <<http://www.delet.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/apostila.html>>. Acesso em: 10 Nov. 2003.

DIAGRAPH / ITW. **Integrated Valve - Large character ink jet printer**. Disponível em: <<http://www.diagraph.com>>. Acesso em: 19 fev. 2003.

DIEPOLD, Th.; OBERMEIER, E.; BERCHTOLD, A. **A Micromachined Continuous Ink Jet Print Head for High Resolution Printing**. Technical Digest MME'97 Southampton, p. 176-179, 1997.

DYNAPAR. **LR/LS inductive Linear Encoder**: Data Sheet Part No. 991102. USA, [2000].

ENCAD. **Wide-Format Inkjet Printers**. Disponível em: <<http://www.encad.com/>>. Acesso em: mar. 2002.

FACT INDEX. **Enciclopédia on line**. Disponível em: <<http://www.fact-index.com>>. Acesso em: 2004.

FLESCH, C. A. **Automação da medição**. Apostila de curso - Departamento de Engenharia Mecânica / LabMetro, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

FLESCH, C.A.; SCHNEIDER C.A. **Sistemas de Medição**. Apostila do curso - Departamento de Engenharia Mecânica / LabMetro, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1993.

GFA WEB DESIGN. **Efeitos das cores**. Disponível em: <<http://www.gfa.com.br>>. Acesso em: 2004.

GRAFICASONLINE: Revista internacional de la Industria de la Comunicación Visual. **La guía sericol de serigrafia UV**. Disponível em: <<http://www.graficasonline.com/serigrafia>>. Acesso em: 5 nov. 2003.

GRANDJEAN, E. **Manual de Ergonomia**: Adaptando o trabalho ao homem. Etienne Grandjean; tradução João Pedro Stein. Porto Alegre: Ed. Artes Médicas, 1998.



GROSS, H. **Electrical Feed Drives for Machine Tools**. Berlin; München: Siemens - Aktiengesellschaft; Chichester: Wiley, 1983.

HEIDENHAIN: Encoders. **Measuring Principle**. Disponível em: <<http://www.heidenhain.com/phaise2/gendis.html>>. Acesso em: 03 mar. 2004.

HP INVENT: Printing & Multifunction. **Products**. Disponível em: <[http://www.hp.com/united-states/consumer/gateway/printing\\_multifunction.html](http://www.hp.com/united-states/consumer/gateway/printing_multifunction.html)>. Acesso em: 20 nov. 2003.

IBM. **Introduction to IBM Data Processing Systems**, IBM Textbook C20-1684, 1968.

INSTITUTO DE ARTES VISUALES. **Fundamentos del diseño**. Disponível em: <<http://www.newsartesvisuales.com>>. Acesso em: 2004.

RICO J.E.N. **Controle clássico**. Apostila de curso Departamento de Engenharia Elétrica / LCMI - DAS, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

LALANDE, J. **How Inkjet Printers Work**. SMART Computing in plan English. Journal Code IPCN, article Re.No. IPCN-2038-26. Fev. 2000.

LARESE INDUSTRIA MECÂNICA. **Fábrica de máquinas para o setor serigráfico**. Disponível em: <<http://www.larese.com.br>>. Acesso em: jun. 2002.

MÁQUINAS E METAIS. Revista latino-americana de máquinas-ferramenta. Editora Aranda. out. 1997.

MARSH. **Unicorn Large Character Ink Jet Printer**: Catálogo Part No. SL000325, USA, 2003.

MARTIN, C.A. **Acionamentos de avanço para máquinas ferramenta**. Apostila de curso - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.

MARTIN, C.A. **Curso de sistemas de controle e sua dinâmica**. Apostila de curso - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1993.

MASCAGNI, J. **EMBA MARK Importação, comércio e representação Ltda**. Representantes no Brasil do Sistema de Impressão Válvula-Solenóide com tinta sob pressão. São Paulo. 2001.

MOLECULAR EXPRESSIONS. **Optical Microscopy Primer - Physics of Light and Color**. Disponível em: <<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/lightandcolor/electromaghome.html>>. Acesso em: 10 out. 2002.

MOLES, A.; JANISZEWSKI L. **Grafismo Funcional. Enciclopedia del Diseño**. Ed. ceac, 1997.

NI - NATIONAL INSTRUMENTS. **FlexMotion Software Reference Manual**. USA, 2004.

NI - NATIONAL INSTRUMENTS. **FlexMotion Control Loop**. Apresentação na NIWeek da National Instrumens. USA. 1999. Disponível em: <<http://zone.ni.com>>. Acesso em: jun. 2002.

NSK NIPPON SEIKO. **Precision Machine Components, NSK Linear Guides - Ball Screws**: Catálogo Pr.No.E3159, 1998.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 2da edição. Rio de Janeiro: Editora Prentice Hall do Brasil Ltda, 1993.

PIMENTEL, B. D. **Análises e desenvolvimento de um novo sistema impressor digital de formato extra-largo**. 2002. Exame de Qualificação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

PIMENTEL, B. D. **Bancada de ensaios para acionamentos eletromecânicos fracionários rotativos**. 1996. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

PIMENTEL, B. D.; HEIN, M. **Final Report of Test Bench**. Relatório final da Bancada Experimental de Impressão, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

QUÍMICA E DERIVADOS. **Vernizes**. Edição nº 427. Editora QD Ltda, Jun. 2004

RENISHAW ENCODERS. **RGH22 series - digital and analogue readhead**: Data Sheet Part No. L-9517-0182-01. England, 1998.

RUMBAUGH, J. et.al. **Modelagem e Projetos Baseados em Objetos**. Editora Campus Ltda. 8 Edição, 1994.

SCHORSCH: **Architectural Lighting Design Software**. Disponível em: <<http://www.schorsch.com/kbase/glossary>>. Acesso em: 2004.

SCHÜCO DESIGN. **Machine Constructing System**: catalogue and Design Manual. 2003.

SCIAVICCO, L.; SICILIANO, B. **Modeling and Control of Robot Manipulators**. The McGraw-Hill Companies, Inc. USA. 1996.

SHEARER, J. L.; MURPHY, A. T.; RICHARDSON, H. H. **Introduction to system Dynamics**. Addison-Wesley series in systems and controls, 1967.

SILK SCREEN. **Tintas UV**. A revista que traz tudo sobre serigrafia. Editora Sertec. Out. 2003

SIMSREED. Gallery. **Obras de Georges Rouault**. Disponível em: <<http://www.simsreed.com/gallery/artists/rouault/>>. Acesso em: 4 set. 2003.

SINTEPLAST: Fábrica de pinturas. **El color**. Disponível em: <[http://www.sintoplast.com/Color/default\\_ec.htm](http://www.sintoplast.com/Color/default_ec.htm)>. Acesso em fev. 2004.

SOGOLEE. **Airbrush HP 101**. Data Sheet. Disponível em: <<http://www.sogolee.com>>. Acesso em: 20 nov. 2001.

STEVE, A.; OWEN, B. **Apply Control-System Theory to Analyze Closed-Loop Systems**. Designer's guide to: Linear control-system theory. Hewlett Packard Co. 1986.

TAKATSU, H., ITOH, T., ARAKI, M. **Future needs for the control theory in industries - Report and topics of the control technology survey in the japanese industry**. Journal of process Control. 8 (5-6): 369-374. 1998.

THK LM SYSTEMS. **Ball Screws**: Catálogo No. 75-1BE, THK CO.,LTD, Tokyo, Japan, 1996.

THK LM SYSTEMS. **Linear Motion Systems**: Catálogo No. 100-1AE, THK CO.,LTD, Tokyo, Japan, 2000.

TSUI, T.; ATSUMI, B. et. al. **Required performance of display devices in consideration of visual characteristics of elderly people**: About luminance and character size. Article in press ELSEVIER. Disponível em: <[www.elsevier.com](http://www.elsevier.com)>. Acesso em: 9 out. 2001.

VUTEK: Digital Printing Systems. **Products**. Disponível em: <<http://www.vutek.com>>. Acesso em: 2002.

WEBOPEDIA: Dictionary on line for computer and Internet terms. Disponível em: <<http://www.webopedia.com>>. Acesso em: 17 fev. de 2004.

WIKIPEDIA: Enciclopédia on line. Disponível em: <<http://en.wikipedia.org/wiki>>. Acesso em: 20 fev. 2004.

WILSON, J. R.; CORLETT, E. N. **Evaluation of human work: A practical ergonomics methodology**. Segunda edição. Ed. Taylor & Francis, 1998.

WORDIQ. Enciclopédia on line. Disponível em: <[http://www.wordiq.com/definition/Electromagnetic\\_radiation](http://www.wordiq.com/definition/Electromagnetic_radiation)>. Acesso em: 2004.

ZEBRA. **Printing Solutions for Business Improvement**. Disponível em: <<http://www.zebra.com>>. Acesso em: 19 fev. 2003.

## APÊNDICES

## APÊNDICE 1 Determinação dos acionamentos do sistema impressor

### Escolha do *driver* e servomotor do Eixo X

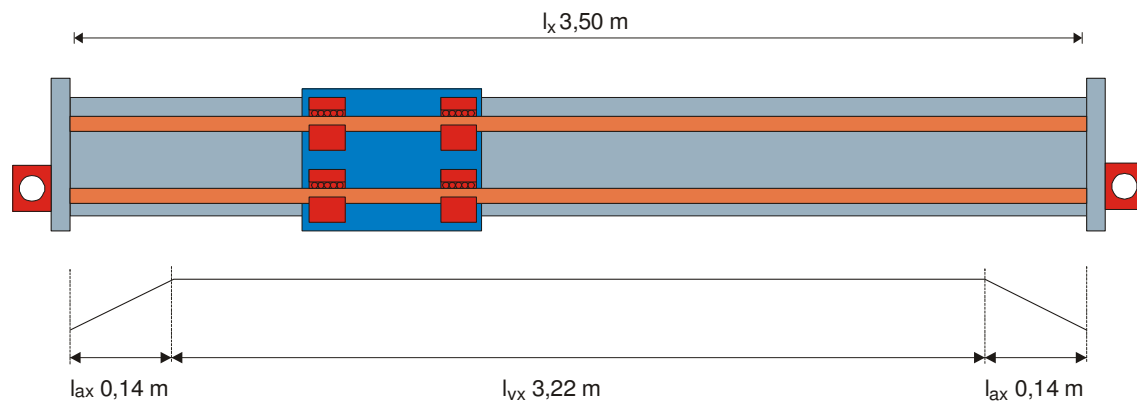


Fig. 119. Curva de velocidade do cabeçote no eixo X.

Como a máxima velocidade de impressão do dispositivo impressor escolhido (item, 2.3.5 Válvula-solenóide com tinta sob-pressão) é de 67 m/min, e considerando que esta velocidade deve ser atingida em 4 % (0,14 m) do comprimento efetivo de deslocamento do cabeçote (3500 mm), a aceleração efetuada ( $a_x$ ) e o tempo total de deslocamento ( $t_x$ ) do cabeçote impressor será

$l_x$  : deslocamento do eixo X por linha de impressão, 3,50 m

$l_{ax}$  : distância de aceleração e desaceleração, 0,14 m

$t_{ax}$  : tempo de aceleração, s

$l_{vx}$  : deslocamento em velocidade constante, 3,22 m

$t_{vx}$  : Tempo para deslocamento em velocidade constante, s

$v_x$  : velocidade do dispositivo de impressão no eixo X (67 m/min), 1,12 m/s

$a_x$  : aceleração do cabeçote impressor, m/s<sup>2</sup>

$t_x$  : tempo total de deslocamento do cabeçote impressor no eixo X, s

$$a_x = \frac{v_x^2}{2 * l_{ax}}$$

Equação 1

$$a_x = \frac{1,12^2}{2 * 0,14}$$

$$a_x = 4,48$$

$$a_x \approx 4,50 \text{ m/s}^2$$

$$t_{ax} = \frac{v_x}{a_x}$$

$$t_{ax} = \frac{1,12}{4,50}$$

$$t_{ax} = 0,25 \text{ s}$$

$$t_{vx} = \frac{l_{vx}}{v_x}$$

$$t_{vx} = \frac{3,22}{1,12}$$

$$t_{vx} = 2,88 \text{ s}$$

$$t_x = 2 * t_{ax} + t_{vx}$$

$$t_x = 2 * 0,25 + 2,88$$

$$t_x = 3,38$$

$$t_x = 3,4 \text{ s}$$

Para deslocar o cabeçote impressor a força aplicada deve vencer a inércia da massa e o atrito de rolamento das castanhas sobre as guias.

$$F = F_{\text{massa}} + F_{\text{atrito}}$$

$$F = m\ddot{X} + \mu N$$

Onde:

F: Força total aplicada, N

X: Deslocamento, m

m: Massa do corpo, kg

$\mu$ : Coeficiente de atrito de rolamento

N: Reação normal ao peso do corpo, N

Como o sistema não é ideal as perdas existentes serão consideradas afetando a força requerida por um rendimento  $\eta$ , Equação 2.

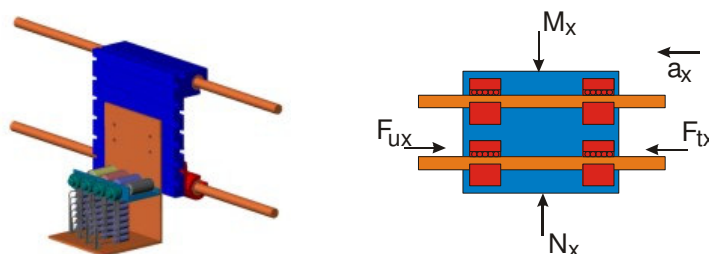


Fig. 120. Análise de forças no cabeçote impressor.



$$F_{tx} = \frac{1}{\eta} (m_x \ddot{X} + \mu N_x)$$

$$F_{tx} = \frac{1}{\eta} (F_{ax} + F_{ux})$$

Equação 2

$F_{tx}$  : Força total a ser aplicada pelo servomotor no eixo X, N

$F_{ux}$  : Força de atrito no eixo X, N

$F_{ax}$  : Força para acelerar a carga no eixo X, N

$M_{ca}$ : Carga devido à massa do carro porta-cabeçote (4,30 kg\*9,81), 42,18 N

$M_c$ : Carga devido à massa do cabeçote impressor (10,00 kg\*9,81 m/s<sup>2</sup>), 98,10 N

$M_x$  : Carga total sobre as guias do eixo X, N

$N_x$  : Reação normal ao peso aplicado no eixo X, N

$m_x$  : Massa total sobre as guias do eixo X, 14,30 kg

$\mu$  : Coeficiente de atrito de rolamento, para "*Linear Buch*", 0.004 (THK LM SYSTEM, 2000)

$\eta$  : Rendimento do conjunto, 0,80

A carga total sobre as guias é a soma do peso do carro porta-cabeçote mais o da carga que corresponde ao cabeçote impressor.

$$M_x = M_{ca} + M_c$$

$$M_x = 42,18 + 98,10$$

$$\mathbf{M_x \approx 140 N}$$

A força normal resultante a esta carga sobre as guias é igual a carga total no eixo X

$$N_x = M_x$$

$$\mathbf{N_x = 140 N}$$

Portanto a componente da força devido ao atrito de rolamento é

$$F_{ux} = \mu * N_x$$

$$F_{ux} = 0.004 * 140,14$$

$$\mathbf{F_{ux} = 0,56 N}$$

A força necessária  $F_{ax}$ , para acelerar a carga a  $4,50 \text{ m/s}^2$  será

$$\begin{aligned}F_{ax} &= m_x * a_x \\F_{ax} &= 14,3 * 4,50 \\ \mathbf{F_{ax} = 64,35 \text{ N}}\end{aligned}$$

Assim, a força total  $F_{tx}$ , que o servomotor deve proporcionar para movimentar o cabeçote impressor é

$$\begin{aligned}F_{tx} &= \frac{1}{\eta} (F_{ax} + F_{ux}) \\F_{tx} &= \frac{1}{0,8} (64,35 + 0,56) \\ \mathbf{F_{tx} = 81,14 \text{ N}}\end{aligned}$$

O torque necessário do servomotor se determina a partir da força total a ser aplicada e o diâmetro da polia da unidade de acoplamento do servomotor (Fig. 129) que é de 66,20 mm.

$M_{mx}$ : Torque do servomotor do eixo X, Nm

$r_x$ : Raio da polia acoplada ao servomotor do eixo X, 0,033 m

$n_x$ : Rotações do servomotor X, rpm

$\omega_x$ : Velocidade angular do servomotor do eixo X, rad/s

$$\begin{aligned}M_{mx} &= F_{tx} * r_x \\M_{mx} &= 81,14 * 0,033 \\ \mathbf{M_{mx} = 2,64 \text{ Nm}}\end{aligned}$$

A rotação do servomotor para ter a velocidade requerida de 1,12 m/s, com este diâmetro de polia é

$$\begin{aligned}\omega_x &= \frac{v_x}{r_x} \\ \omega_x &= \frac{1,12}{0,033} \\ \omega_x &= 33,94 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

$$n_x = \frac{\omega_x}{2\pi} * 60$$
$$n_x = \frac{33,94}{2\pi} * 60$$
$$n_x = 324,10$$
$$n_x \approx \mathbf{325 \text{ rpm}}$$

Do catálogo dos servomotores da WEG o modelo que atende estas necessidades de torque e rotação é

Servomotor SWA 56-2,5-60

Com torque de 2,5 Nm @ 300 rpm

Utiliza o Servoconversor SCA - 04.08/16

Massa do servomotor 4,60 kg

### **Escolha do *driver* e servomotor do Eixo Y**

Como o eixo Y se desloca 12 mm (equivalente a uma linha de impressão) a escolha do *drive* e servomotor foi realizado considerando um tempo máximo para realizar este deslocamento equivalente a 10 % do tempo total utilizado pelo eixo X durante seu movimento. A Fig. 121 apresenta uma aproximação do gráfico de aceleração e desaceleração do eixo Y no qual serão realizados os cálculos.

$l_y$ : deslocamento do eixo Y por linha de impressão, 0,012 m

$l_{y1}$ ,  $l_{y2}$ : Distância de aceleração de desaceleração no eixo Y, m

$v_y$ : Velocidade do carro de acionamento Y, m/s

$a_y$ : Aceleração do conjunto impressor,  $m/s^2$

$t_{y1}$ ,  $t_{y2}$ : Tempo de aceleração e desaceleração, 0,17 s

$t_y$ : Tempo de deslocamento do eixo Y por linha de impressão, s

$$t_y = t_x * 0,1$$

$$t_y = 3,4 * 0,1$$

$$t_y = \mathbf{0,34 \text{ s}}$$

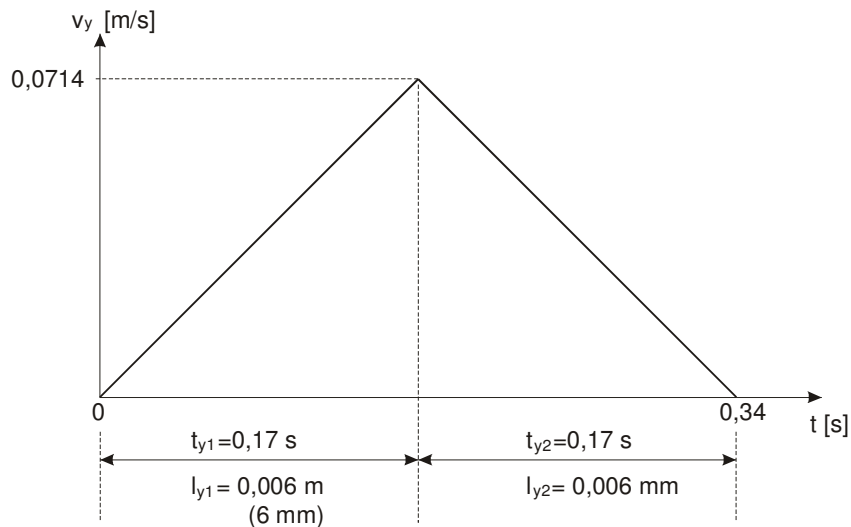


Fig. 121. Tempo utilizado pelo eixo Y para um deslocamento de 12 mm.

A aceleração e a velocidade do eixo Y será de

$$a_y = \frac{2 * l_{y1}}{t_y^2}$$

$$a_y = \frac{2 * 0,006}{0,17^2}$$

$$a_y = 0,42 \text{ m/s}^2$$

$$v_y = a_y * t_y$$

$$v_y = 0,42 * 0,17$$

$$v_y = 0,0714 \text{ m/s}$$

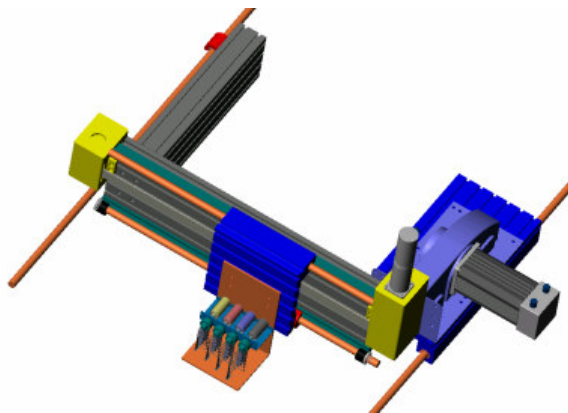


Fig. 122. Conjunto impressor do sistema proposto.

A massa a ser transportada neste eixo é constituída da massa do cabeçote impressão e do conjunto impressor, como apresentado na Fig. 122 e discriminado

na Tabela 9, para efeitos de determinação desta massa será considerado inicialmente o peso do servomotor Y igual ao peso do servomotor com o dobro do torque que o especificado para o eixo X.

Tabela 9. Massa dos componentes que atuam sobre o eixo Y.

Descrição	Massa kg
Perfil de Al 160x80 0,50 m *12,45 kg/m	6,23
Perfil de Al 160x80 4,00 m * 12,45 kg/m	49,80
2 apoios de castanha 2*0,3 kg	0,60
Guias de precisão modelo PF 3,75 m*4,50kg/m	16,88
Unidade de desvio de correia	3,30
Tracionador de correia	2,00
Unidade de acoplamento do servomotor	6,00
Unidade motriz para correia fixa	11,00
Carro de acionamento Y 500 mm	8,50
Servomotor eixo X	4,60
Servomotor eixo y	9,30
<b>TOTAL (m<sub>y</sub>)</b>	<b>118,21</b>

$m_y$  : Massa total sobre as guias do eixo Y, 118,21 kg

$M_y$  : Carga total sobre as guias do eixo Y, N

$N_y$  : Reação normal ao peso aplicado no eixo Y, N

$F_{uy}$  : Força de atrito no eixo Y, N

$F_{ay}$  : Força para acelerar a carga no eixo Y, N

$F_{ty}$  : Força total a ser aplicada pelo servomotor no eixo Y, N

$\mu$  : Coeficiente de atrito de rolamento, para "*Linear Buch*", 0.004 (THK LM SYSTEM, 2000)

$\eta$  : Rendimento do conjunto, 0,80

$g$ : gravidade, 9,81 m/s<sup>2</sup>

A carga total sobre as guias do eixo Y é

$$M_y = m_y * g$$

$$M_y = 118,21 * 9,81$$

$$M_y = 1159,64$$

$$M_y \approx 1160 \text{ N}$$

Por tanto a força normal é

$$N_y = M_y$$
$$\mathbf{N_y = 1160 N}$$

A força necessária para vencer o atrito de rolamento é

$$F_{uy} = \mu * N_y$$
$$F_{uy} = 0,004 * 1160$$
$$F_{uy} = 4,64$$
$$\mathbf{F_{uy} \approx 5,00 N}$$

A força para acelerar a carga numa distância de 6 mm é

$$F_{ay} = m_y * a_y$$
$$F_{ay} = 118,21 * 0,42$$
$$F_{ay} = 49,64$$
$$\mathbf{F_{ay} \approx 50 N}$$

Por tanto substituindo estes valores na Equação 2 equivalente para o eixo Y, a força total necessária para movimentar o conjunto impressor é de

$$F_{ty} = \frac{1}{\eta} (F_{ay} + F_{uy})$$
$$F_{ty} = \frac{1}{0,8} (50 + 5)$$
$$F_{ty} = 68,75$$
$$\mathbf{F_{ty} \approx 69 N}$$

O diâmetro da polia motriz desta unidade de correia fixa (Fig. 130 b, do APÊNDICE 3 Perfis e unidades de acionamento em alumínio) é de 91,67 mm, por tanto o raio será de 0,0458 m:

$M_{my}$ : Torque do servomotor do eixo Y, Nm

$M_{ry}$ : Torque requerido no eixo Y, Nm

$M_{iy}$ : Torque fornecido depois do redutor do eixo Y, Nm

$M_{ac}$ : Torque de acionamento da carga no eixo Y, Nm

$M_{ext}$ : Perturbação externa de torque, Nm

$F_{ext}$ : Força externa de perturbação, 50 kgf

$r_y$ : Raio da polia acoplada ao servomotor do eixo Y, 0,0458 m

$n_y$ : Rotações do servomotor Y, rpm

$n_{ry}$  : Rotações na entrada do redutor, rpm

$i_y$  : Relação na redução planetária no eixo Y

$\omega_y$ : Velocidade angular do servomotor do eixo Y, rad/s

$\omega_{ry}$ : Velocidade angular na entrada do redutor, rad/s

$$M_{ac} = F_{ty} * r_y$$

$$M_{ac} = 69 * 0,0458$$

$$\mathbf{M_{ac} = 3,20 Nm}$$

Considerando uma perturbação externa de torque equivalente a um peso de 50 kgf aplicada no eixo Y, o torque requerido para compensar este efeito é

$$F_{ext} = 50 * 9,81$$

$$\mathbf{F_{ext} = 490 N}$$

$$M_{ext} = F_{ext} * r_y$$

$$M_{ext} = 490 * 0,0458$$

$$\mathbf{M_{ext} = 22,44 Nm}$$

O torque requerido no eixo Y é

$$M_{ry} = M_{ac} + M_{ext}$$

$$M_{ry} = 3,2 + 22,44$$

$$M_{ry} = 25,64$$

$$\mathbf{M_{ry} \approx 26 N}$$

Como o torque do servomotor requerido está fora da ordem de grandeza dos torques padrões fabricados (até 10 Nm), será utilizado um redutor na ponta do eixo para obter o torque requerido. Inicialmente para dimensionar o servomotor é necessário conhecer as rotações nas quais funcionará.

A velocidade angular final no eixo do conjunto impressor antes do redutor é

$$\omega_{ry} = \frac{v_y}{r_y}$$

$$\omega_{ry} = \frac{0,0714}{0,0458}$$

$$\omega_{ry} = 1,56 \text{ rad/s}$$

que em rotações por minuto é

$$n_{ry} = \frac{\omega_{ry}}{2\pi} * 60$$

$$n_{ry} = \frac{1,56}{2\pi} * 60$$

$$n_{ry} = 14,89$$

$$n_{ry} \approx 15 \text{ rpm}$$

Considerando um redutor de 10:1 as rotações do servomotor são

$$n_y = n_{ry} * i_y$$

$$n_y = 15 * 10$$

$$n_y = 150 \text{ rpm}$$

Segundo o catálogo do fabricante o servomotor SWA 56-2,5-60 da marca WEG possui um torque de 2,5 Nm à 150 rpm, que depois do redutor será de

$$M_{iy} = M_{my} * i_y$$

$$M_{iy} = 2,5 * 10$$

$$M_{iy} = 25 \text{ Nm}$$

Atendendo ao torque máximo requerido no eixo Y ( $M_{ry}$ ) para acionamento da carga, que considera as forças para aceleração, atrito, e perturbações externas que pudessem vir acontecer.

Do catálogo do fabricante as características técnicas deste servomotor são as seguintes:

Servomotor marca WEG



Modelo SWA 56-2,5-60

Torque nominal de 2,5 Nm

Massa do servomotor de 4,6 kg

Inércia do rotor de 0,00022 kg m<sup>2</sup>

### Otimização do sistema redutor

Segundo Martin (1999), a transferência de energia do servomotor para o sistema a ser acionado é otimizado quando a inércia da carga é maior (na ordem de 20 % a mais) que a inércia do eixo do servomotor, neste sentido será especificado a continuação a melhor redução que atenda este requisito de projeto.

$j_{my}$  : Momento de inércia do eixo do servomotor Y, 0,00022 kg m<sup>2</sup>

$j_{ry}$  : Momento de inércia da carga depois do redutor no eixo Y, kg m<sup>2</sup>

$j_{Ly}$  : Momento de inércia da carga do eixo Y, kg m<sup>2</sup>

A inércia da carga do sistema impressor é

$$j_{Ly} = m_y * r_y^2$$

Equação 3

$$j_{Ly} = 118,21 * 0,0458^2$$

$$j_{Ly} = 0,247 \text{ kg m}^2$$

A inércia depois do redutor é (OGATA, 1993)

$$j_{ry} = \left( \frac{1}{i_y} \right)^2 * j_{Ly}$$

Equação 4

Para satisfazer a relação de projeto que a inércia da carga refletida no eixo do servomotor deve ser 20 % maior que a inércia do rotor do servomotor

$$\frac{j_{ry}}{j_{my}} = 1,2$$

Equação 5

Substituindo a Equação 3 e a Equação 4 na Equação 5 a relação de redução é

$$i_y = \frac{1}{\sqrt{\frac{1,2 * j_{my}}{j_{Ly}}}}$$

$$i_y = \frac{1}{\sqrt{\frac{1,2 * 0,00022}{0,247}}}$$

$$i_y = 30,58$$

$$i_y \approx 30$$

que significa uma redução de 30:1

Do catálogo dos redutores planetários da PARKER o modelo escolhido é o PEN 090-032 S7 M000 000 000

Com as seguintes características:

Relação de redução de 32:1

Backlash <17 arc-min

Carga máxima radial de 2500 N

Carga máxima axial de 2800 N

Torque máximo contínuo de 120 Nm

Esta redução acoplada ao servomotor permitira que este funcione a

$$n_y = n_{ry} * i_y$$

$$n_y = 15 * 30$$

$$n_y = 450 \text{ rpm}$$

Com um torque na saída do redutor de

$$M_{iy} = M_{my} * i_y$$

$$M_{iy} = 2,5 * 30$$

$$M_{iy} = 75 \text{ Nm}$$

Que representa 3 vezes mais que o torque requerido no conjunto impressor ( $M_{ry} = 26 \text{ Nm}$ ).

## APÊNDICE 2 Exemplo de decodificação do código binário

Para ler o código binário de um arquivo BMP foi utilizado o aplicativo *Vim*, que é um editor de texto avançado e permite a edição de um arquivo em seu formato hexadecimal, (<http://www.vim.org>) este programa é uma versão melhorada do editor de texto *vi* disponível na maioria dos sistemas UNIX.

A imagem utilizada para o exemplo é o da Fig. 123, na seqüência a respectiva visualização em hexadecimal, Fig. 124.

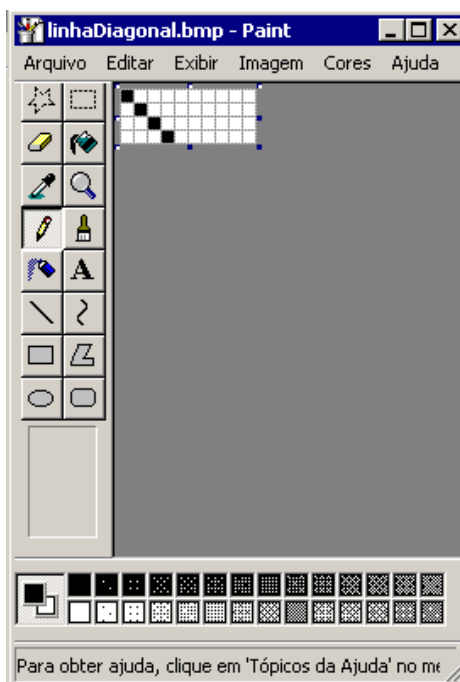


Fig. 123 Imagem a ser decodificada.

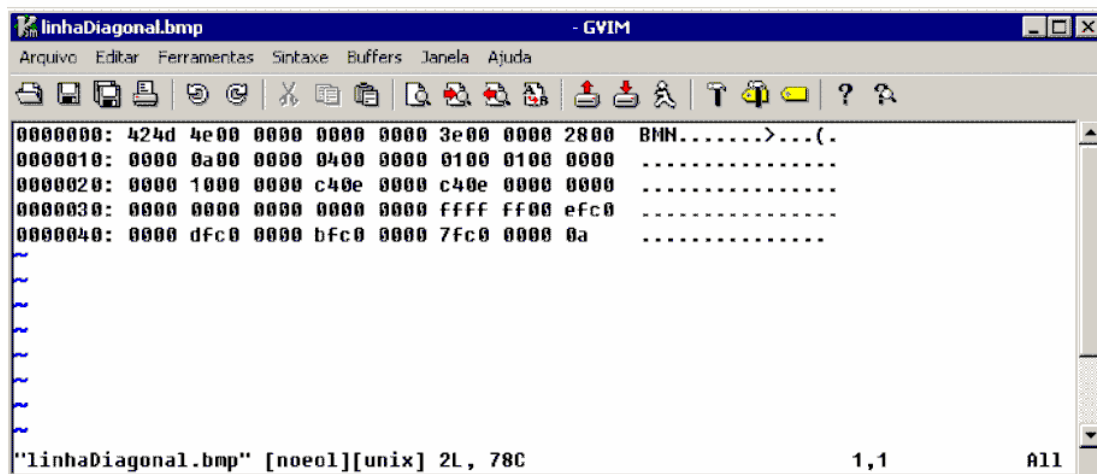


Fig. 124 Visualização em hexadecimal da imagem.

Ao visualizar um arquivo binário podem-se diferenciar claramente três partes: Dados do arquivo, dados do gráfico e dados dos pixels.

**Dados do arquivo**

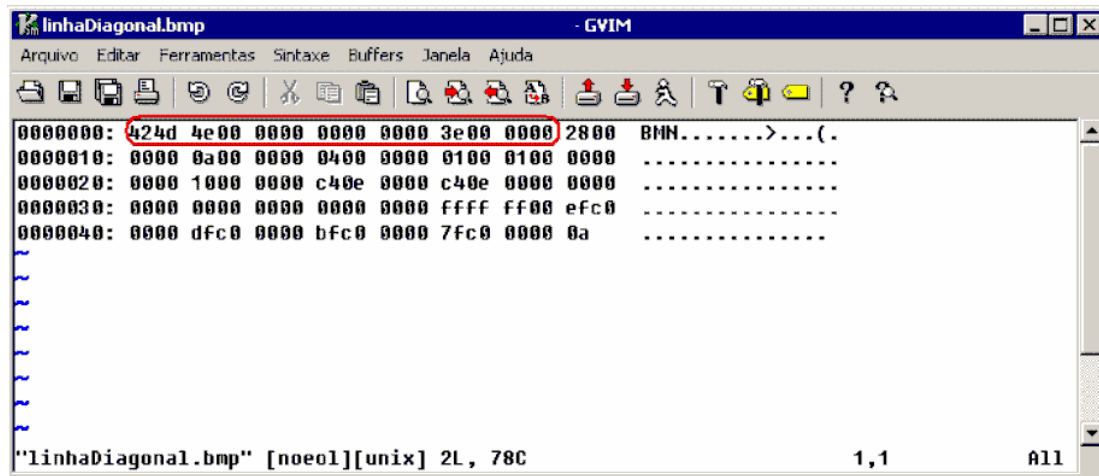


Fig. 125 Dados do arquivo, em destaque.

Os dados do arquivo são mostrados em destaque na Fig. 125 e fornecem as informações do arquivo apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10. Dados do arquivo

Número de bytes	Descrição
2	Tipo do arquivo
4	Tamanho do arquivo
4	Reservado
4	Numero do byte de início dos dados

Para o exemplo as informações contidas nestes dados são:

Tipo do arquivo = 424d, letras B e M do código ASCII que correspondem aos arquivos BMP

Tamanho do arquivo = 0000 004e = 78 Bytes

Reservado = 0000 0000

Numero do byte de início dos dados = 0000 003e = byte 62

Dados do gráfico

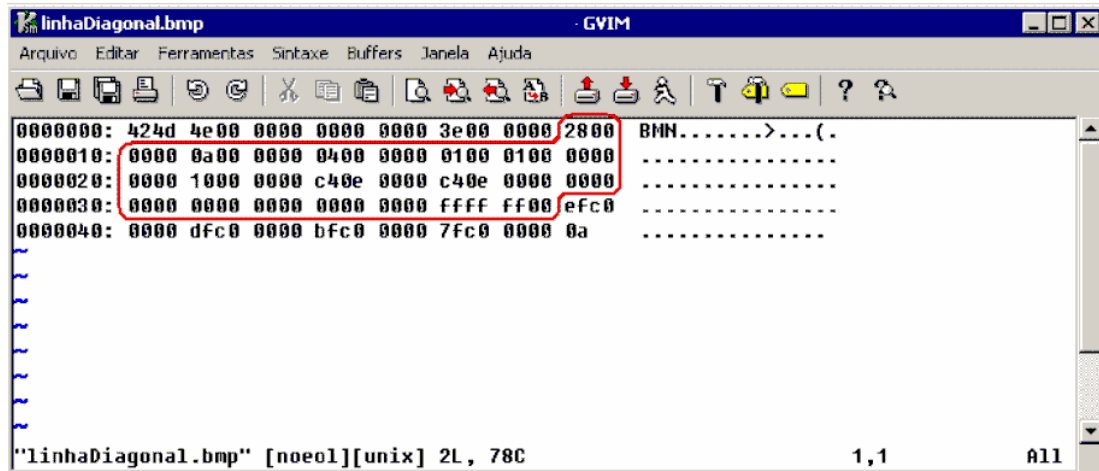


Fig. 126 Dados sobre a imagem, em destaque.

Os dados do gráfico são mostrados em destaque na Fig. 126 e fornecem as informações da imagem apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11. Dados do gráfico.

Numero de bytes	Descrição
4	Tamanho do cabeçalho de informação
4	Largura da imagem
4	Altura da imagem
2	Planos, sempre em 1
2	Bits por Pixel
4	Compressão, sempre em zero
4	Tamanho da imagem em bytes
4	Pixels horizontais por metro
4	Pixels verticais por metro
4	Quantidade de cores usadas
4	Número de cores importantes

Para o exemplo as informações contidas nestes dados são:

Tamanho do Cabeçalho de informações = 0000 0028 = 40 bytes

Largura da Imagem = 0000 000a = 10 pixels

Altura da Imagem = 0000 0004 = 4 pixels

Planos = 0001 = 1

Bits/pixel = 0001 = 1 (monocromático)

Compressão = 0000 0000  
 Tamanho da imagem = 0000 0010 = 16 bytes  
 Pixels horizontais/metro = 0000 0ec4 = 3780  
 Pixels horizontais/metro = 0000 0ec4 = 3780  
 Quantidade de cores usadas = 0000 0000  
 Número de cores importantes = 0000 0000

**Dados dos pixels**

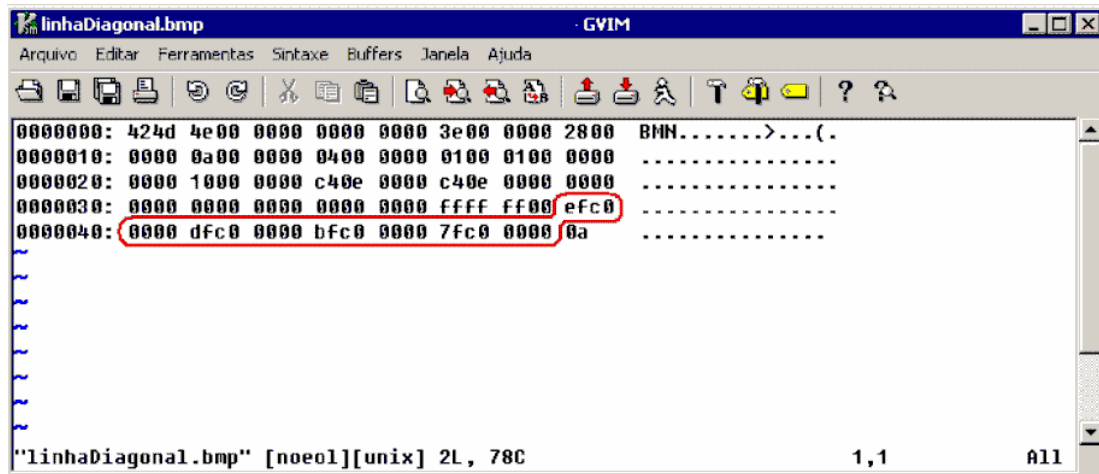


Fig. 127 Dados referente aos pixels do arquivo.

A terceira parte do arquivo binário mostrada em destaque na Fig. 127, corresponde à área de dados onde estão armazenadas as informações referentes a cada pixel da imagem. Numa imagem o número de linhas é igual à altura da imagem e cada linha é armazenada em blocos de 32 bits. Para obter o número de blocos por linha se divide a largura da imagem, em pixels, por 32.

Para o exemplo  $10 \text{ pixels} / 32 = 0,3125$ , como a divisão não é exata temos no mínimo 1 bloco de 32 bits por linha, como a altura da imagem são 4 pixels então existem 4 linhas de 32 bits, desta maneira, os números hexadecimais correspondentes a cada linha são: efc0 0000; dfc0 0000; bfc0 0000; 7fc0 0000, que convertidos à representação binária gera o seguinte mapa de bits.

efc0 0000 - 1110 1111 1100 0000 0000 0000 0000 0000  
 dfc0 0000 - 1101 1111 1100 0000 0000 0000 0000 0000  
 bfc0 0000 - 1011 1111 1100 0000 0000 0000 0000 0000  
 7fc0 0000 - 0111 1111 1100 0000 0000 0000 0000 0000

A área de dados é armazenada na ordem inversa das linhas, por isso os primeiros bytes são referentes aos últimos pixels, assim invertendo a ordem das linhas temos o mapa final de bits.

```
0111·1111·1100·0000·0000·0000·0000·0000  
1011·1111·1100·0000·0000·0000·0000·0000  
1101·1111·1100·0000·0000·0000·0000·0000  
1110·1111·1100·0000·0000·0000·0000·0000
```

Na área em destaque pode-se observar o desenho original, como o exemplo trata de uma imagem monocromática cada bit representará 1 pixel da figura, os bits em zero correspondem aos pixels em preto e os bits em 1 aos brancos, o resto dos bits em zero correspondem ao preenchimento do bloco de 32 bits por linha.

O caractere remanescente, 0Ah, indica o fim do arquivo, que corresponde ao símbolo de “*end of file*” (também conhecido por seu acrônimo: EOF) da tabela ASCII.

### APÊNDICE 3 Perfis e unidades de acionamento em alumínio

Devido ao formato especial da seção dos perfis padronizados de alumínio, Fig. 128, estes apresentam uma grande resistência à curvatura e torção, com elevados valores de momento de inércia e momentos de resistência, (segundo o fabricante SCHÜCO DESIGN, de  $1.181,69 \text{ cm}^4$ , e  $147,71 \text{ cm}^3$  respectivamente, para o perfil da Fig. 128), assim, é possível trabalhar com longos comprimentos sem suportes intermediários, os perfis tem comprimentos de até 6 m. As unidades de posicionamento podem ser fornecidas pré-montadas o que diminui o tempo de montagem.

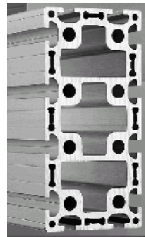


Fig. 128. Perfil de Al 160x80.

Entre as unidades existentes para posicionamento e transporte de carga translativo, estão disponíveis o módulos de transmissão apresentados na Tabela 12.

Os servomotores podem ser instalados na unidade de acoplamento apresentada na Fig. 129, esta unidade é constituída de uma carenagem, e um flange para fixação do servomotor. A polia interna tem um diâmetro de 66,20 mm, com 26 dentes e passo de 8 mm.

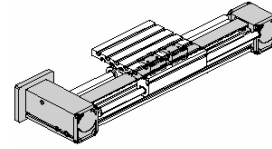


Fig. 129. Unidade de acoplamento do servomotor.

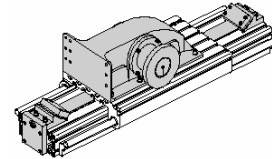


Tabela 12. Módulos de transmissão utilizando guias de precisão  
(SCHÜCO DESIGN, 2003).

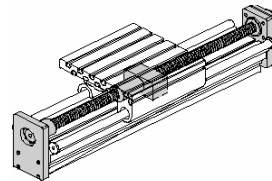
Módulo com correia dentada  
força axial até 2.500 N



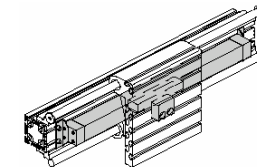
Módulo com correia dentada fixa  
força axial até 2.500 N



Módulo com fuso de esferas  
força axial até 8.800 N



Módulo pneumático  
força axial 295.000 N  
com o cilindro FESTO DGP-25



Para movimentar conjuntos mais pesados pode-se utilizar o módulo de acionamento com correia dentada fixa (Tabela 12), cujo principal componente é a unidade motriz para correia fixa, Fig. 130 a). Esta unidade possui furos de diâmetro 9 mm localizados de forma universal. A polia interna tem um diâmetro de 91,67 mm, com 36 dentes e passo de 8 mm.

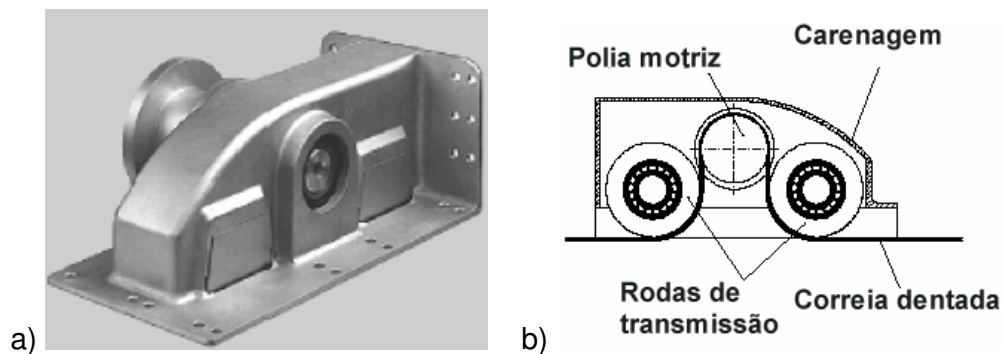


Fig. 130. a) Unidade motriz para correia fixa. b) Princípio de funcionamento.

O princípio de funcionamento desta unidade está apresentada na Fig. 130 b). A correia utilizada para o movimento deste eixo é de 50 mm de largura.

Estas unidades se movimentam mediante castanhas de esferas recirculantes sobre guias de precisão com capacidade de transportar cargas medianas (até 8837 N, SCHÜCO DESIGN, 2003) Fig. 131.

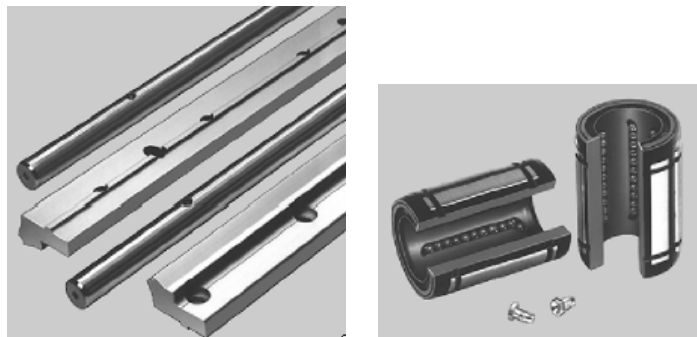


Fig. 131. Guias lineares cilíndricas com castanha de esferas recirculantes.

**APÊNDICE 4 Fotos dos componentes do sistema impressor  *raster***

Para poder adquirir a informação de impressão de uma impressora de mesa como proposto neste trabalho (Fig. 60) foi necessário desenvolver a interface de aquisição apresentada na Fig. 132, esta figura mostra a foto do protótipo realizado.

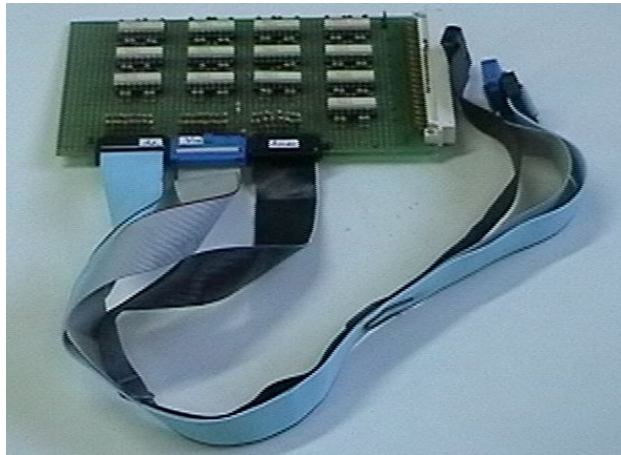


Fig. 132. Interface de aquisição de sinal.

Já a Fig. 133 apresenta a eletrônica desenvolvida no âmbito do projeto para condicionar os sinais entre a parte eletro-eletrônica do conjunto impressor com as placas eletrônicas digitais I/O e a *motion control* inseridas no computador hospedeiro (Fig. 62).



Fig. 133. Foto do módulo condicionar de sinal.

A Fig. 134 apresenta o conjunto impressor montado onde podem ser apreciados os dois servomotores tanto do eixo X na vertical, como do eixo Y na horizontal.

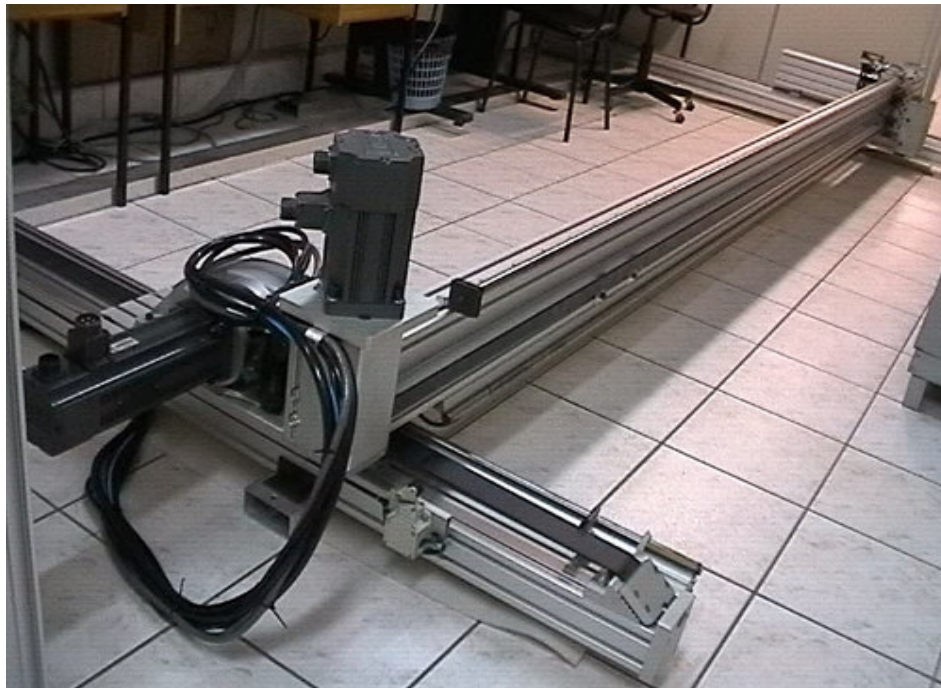


Fig. 134. Estrutura mecânica do protótipo do Conjunto Impressor.

A Fig. 135 apresenta o detalhe do carro porta-cabeçote montado sobre as guias de precisão cilíndricas dispostas ao longo do eixo X.

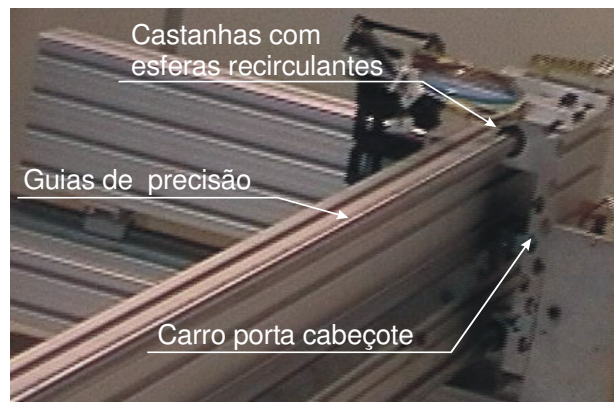


Fig. 135. Guias com castanhas de esferas recirculantes.

A Fig. 136 mostra o sistema desenvolvido durante o ensaio de linearidade de impressão realizado. O objetivo deste ensaio foi determinar o desvio de impressão nos extremos do sistema, para isto foram impressos dois quadrados nos extremos do eixo X, a Fig. 115 mostra o detalhe da impressão realizada e o desvio existente.



Fig. 136. Impressão de dois retângulos nos extremos da área de impressão.



## APÊNDICE 5 Principais algoritmos do *software* gerenciador

O *software* gerenciador implementado na placa de controle de movimento foi realizado mediante a linguagem de programação LabView.

A Fig. 137 apresenta a tela onde se introduzem os valores dos parâmetros físicos do sistema impressor tais como a "Distância de aceleração", "Numero de bicos do cabeçote", "Diâmetro do ponto", entre outros e também exibe um rascunho do desenho a ser realizado e a posição de ambos os eixos durante a execução da impressão.

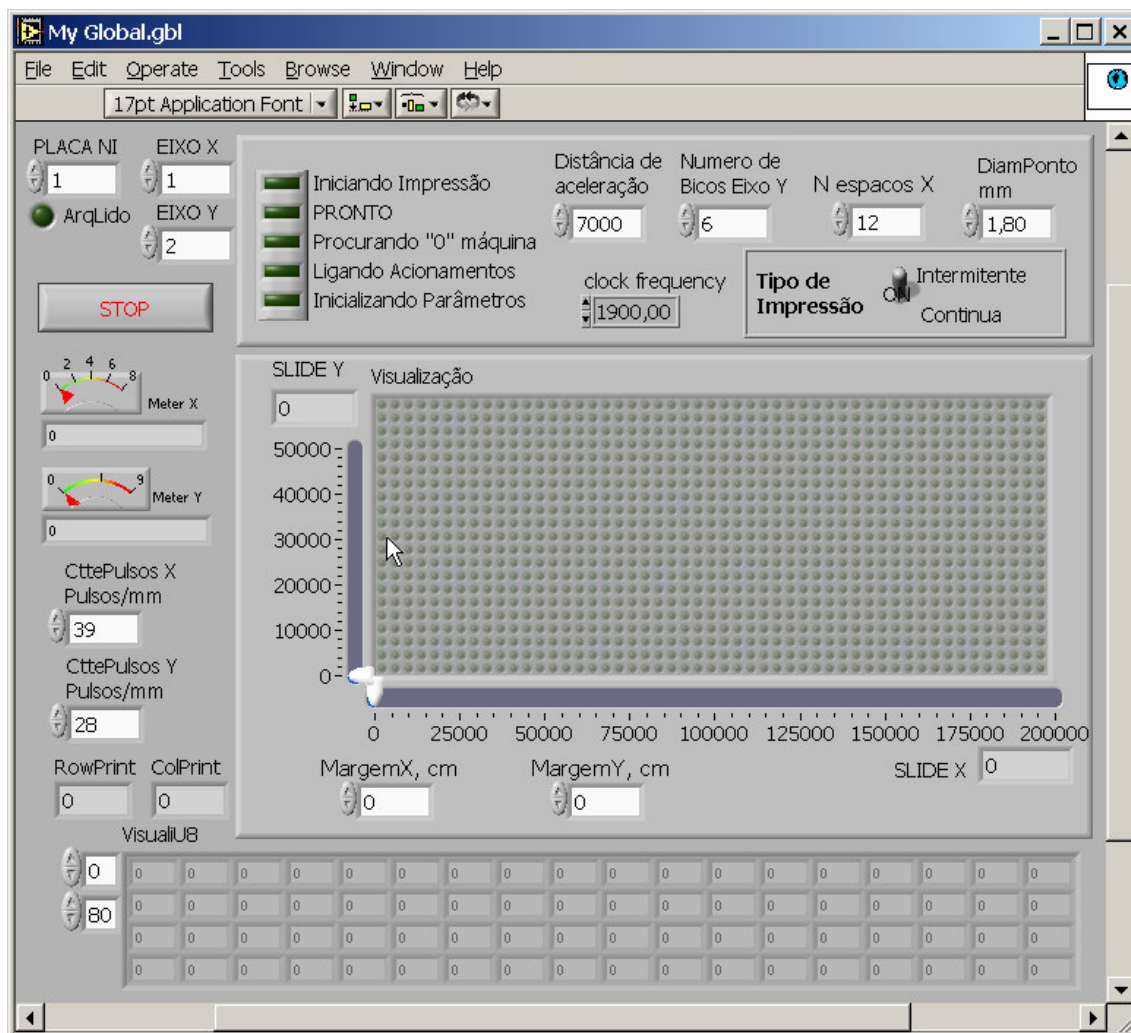


Fig. 137. Tela dos valores dos parâmetros durante a execução da impressão.

A Fig. 138 apresenta a tela do programa principal de interface com o usuário, a partir desta interface o usuário pode abrir o arquivo a ser impresso, inicializar a impressão e sair do programa.

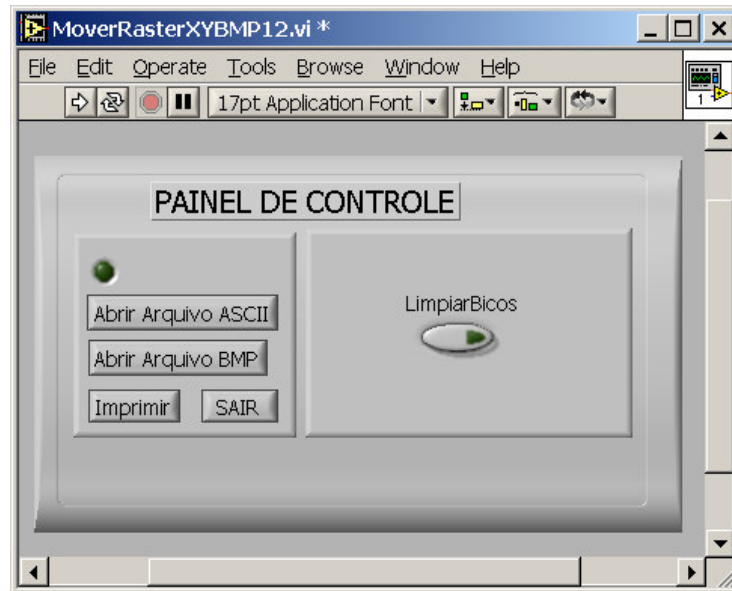


Fig. 138. Tela de interface com o usuário do *software* gerenciador.

A Fig. 139 apresenta o código do programa principal. Este programa é o encarregado de realizar todas as funções prévias requeridas pelo protótipo e aguardar pelas instruções do usuário.

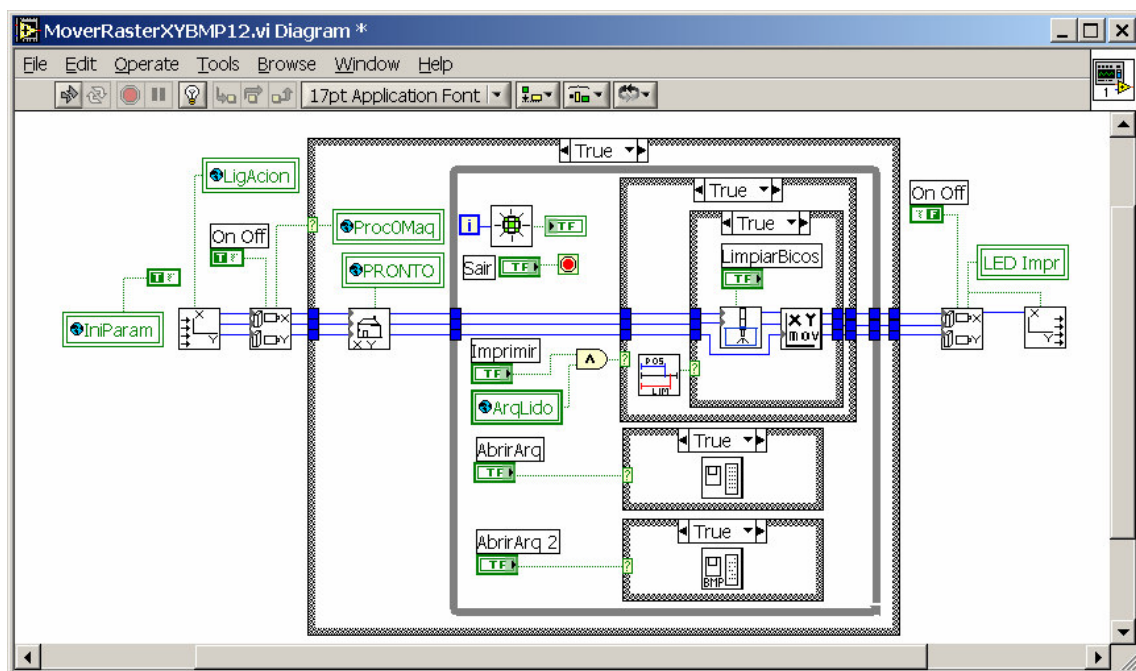


Fig. 139. Código do programa principal do sistema impressor.

O código do programa principal esta constituído pelos sob-programas apresentados na Fig. 140. Nestes sob-programas podem ser observados os dados de entrada e saída requeridos.

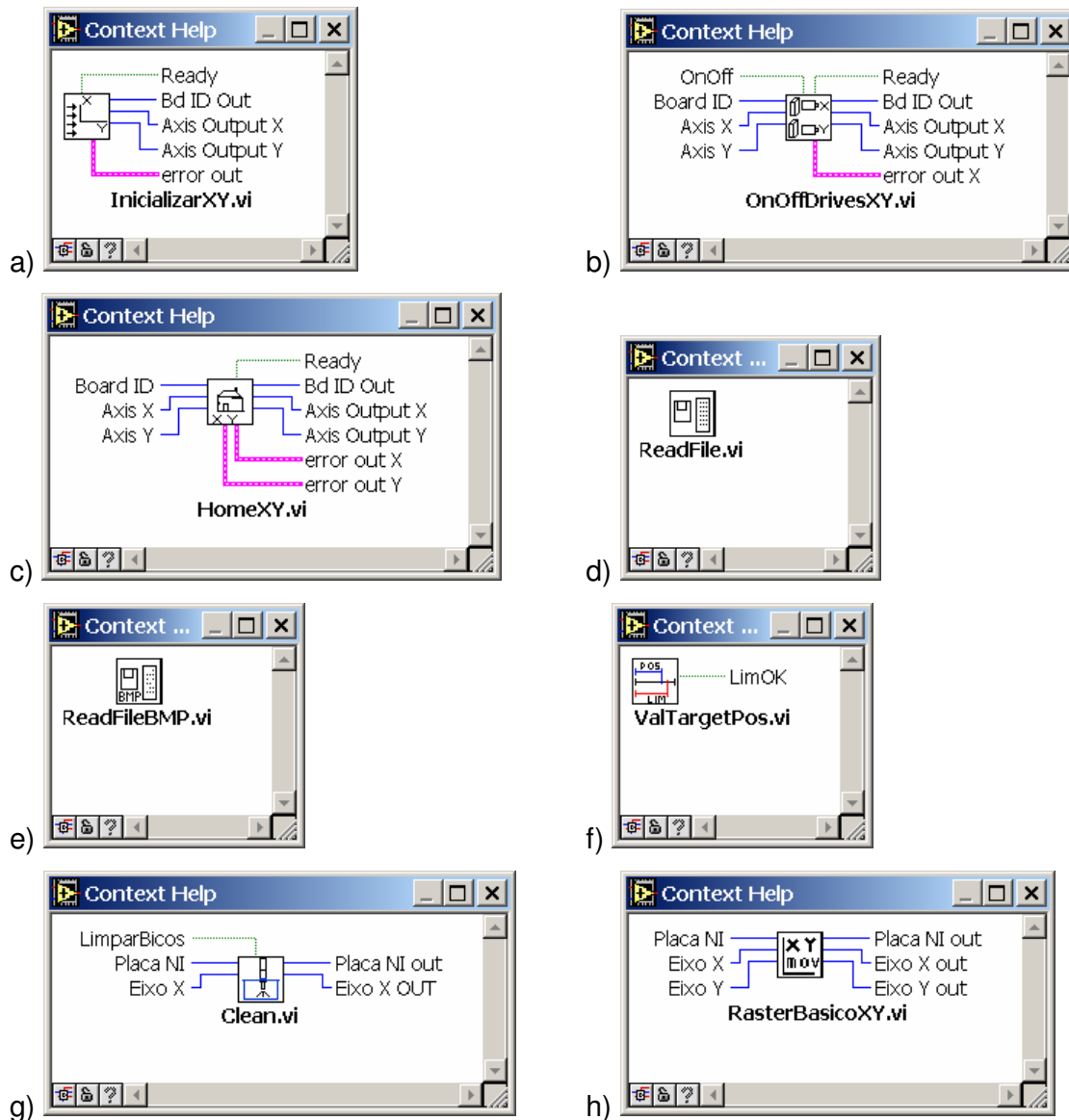


Fig. 140. Sob-programas do programa principal.

Código do programa principal (Fig. 139), a primeira função a ser realizada é a configuração de ambos os eixos e inicialização dos parâmetros Fig. 140 a). Após esta inicialização são ligados os *drives* dos servomotores Fig. 140 b) se este procedimento foi realizado com sucesso se movimenta ambos os eixos até a posição de "Home" Fig. 140 c), neste momento o programa fica esperando que o usuário interaja com o *software* indicando qual é o arquivo a ser impresso. Pode-se escolher entre abrir um arquivo ASCII Fig. 140 d) ou um arquivo do tipo BMP Fig. 140 e), uma vez carregado o desenho este é apresentado na tela de visualização (Fig. 137).



Neste momento o sistema esta pronto para realizar a impressão esperando tão somente pelo comando "Imprimir" da tela de interface com o usuário. Ao realizar este comando a primeira função é verificar se o tamanho do desenho esta de acordo aos limites de impressão Fig. 140 f), verificado este aspecto o programa pode inicialmente realizar uma limpeza de bicos Fig. 140 g) se foi selecionada esta opção (Fig. 138), logo iniciar o processo de impressão *raster* propriamente dito executando a função da Fig. 140 h). Terminada a impressão o programa entra novamente no ciclo de espera até que uma nova opção seja escolhida pelo usuário na tela da Fig. 138. Ao se terminar os trabalhos de impressão deve-se sair do programa mediante a opção "Sair", quando se realiza este comando o programa executa novamente a função da Fig. 140 b) desligando os *drives* dos servomotores e logo a função da Fig. 140 a) zerando todos os valores dos parâmetros da placa controladora de movimento e as digitais I/O.

O código da função que executa o processo de impressão *raster* (Fig. 140 h)) é o apresentado na Fig. 141. Esta função utilizando os parâmetros definidos na tela da Fig. 137 e o sub-programa de "MoverImprimir" da Fig. 142, comanda o movimento ambos os eixos de acordo à quantidade de linhas e colunas existentes no desenho a ser impresso. Finalizado este processo executa novamente o sub-programa "MoverImprimir " para levar ambos os eixos até a posição de "Home" e esperar pela nova instrução do usuário.

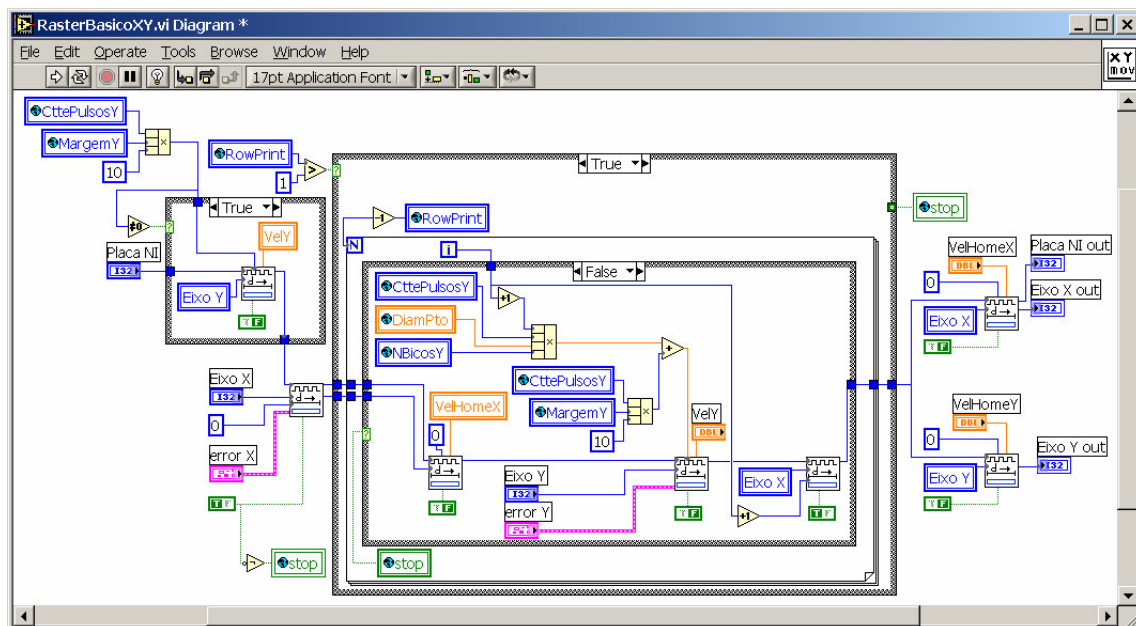


Fig. 141. Código do programa que realiza a impressão *raster*.

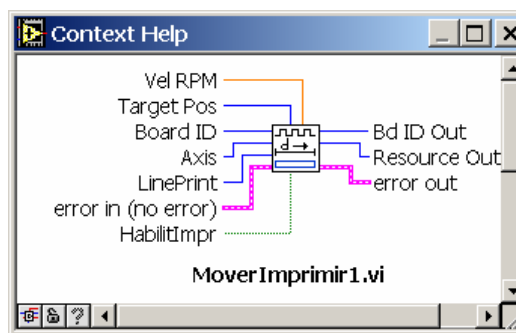


Fig. 142. Sob-programa "mover" da função imprimir *raster*.

## APÊNDICE 6 Principais esquemas eletro-eletrônicos

A Fig. 143 apresenta um esquema geral com os componentes eletro-eletrônicos do protótipo do sistema impressor e o fluxo de informações elétricas existentes. Neste esquema pode-se observar que o elemento central é o condicionador de sinal em torno do qual estão conectados todos os componentes.

O condicionador de sinal tem varias funções:

- Modifica os valores dos sinais dos sensores de posição de ambos os eixos para os níveis que as placas de comando numérico utilizam.
- Realiza o liga/desliga dos *drives* dos servomotores mediante sinais provenientes da placa de controle de movimento ou mediante botões de acionamento manual.
- Envia os sinais de comando aos *drives* dos servomotores de ambos os eixos para realizar sua movimentação. Estes sinais de comando podem vir da placa de controle de movimento ou de potenciômetros instalados neste condicionador.
- Envia os sinais de acionamento para os solenóides dos bicos ejetores do cabeçote impressor em função dos comandos realizados pelas placas digitais I/O.

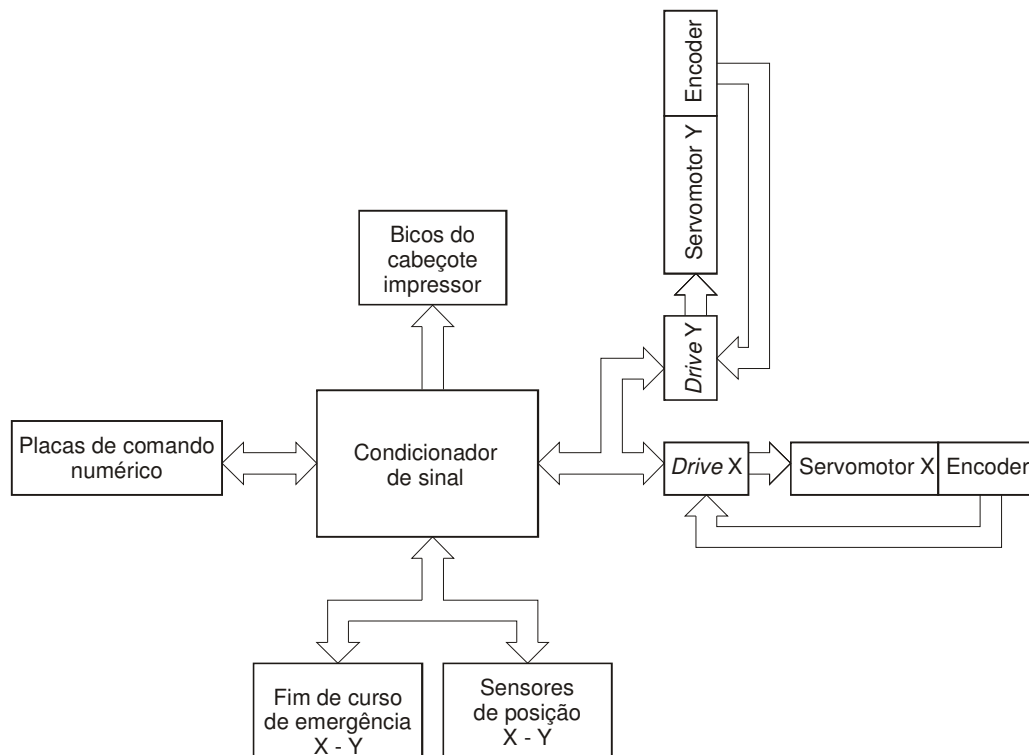


Fig. 143. Esquema das ligações entre o condicionador de sinal com os diversos elementos eletro-eletrônicos do sistema impressor.

Para realizar as diferentes funções explicadas, o condicionador de sinal esta constituído de diferentes módulos eletro-eletrônicos como apresentado na Fig. 144 (e sua foto na Fig. 133).

Entre estes módulos eletro-eletrônicos encontra-se a placa de acionamento dos bicos do cabeçote impressor, uma barra de conectores para realizar as ligações elétricas requeridas entre os diferentes módulos, uma fonte de alimentação para fornecer energia aos diferentes componentes eletrônicos (5 V) e acionamento dos relês (12 V), uma placa eletrônica para acionamento dos sensores óticos de fim de curso, uma placa de relês que ligam/desligam os *drives* dos servomotores e um painel de comando manual com botões e potenciômetros para simular sinais de controle.

Caso exista um funcionamento irregular, os fins de curso mecânicos instalados nos extremos dos eixos acionam os relês para desligar os *drives* dos servomotores. Com o mesmo intuito de proteger o sistema ante um funcionamento irregular, neste condicionador se encontra instalado um botão de emergência que realiza um corte geral de energia nos *drives*.

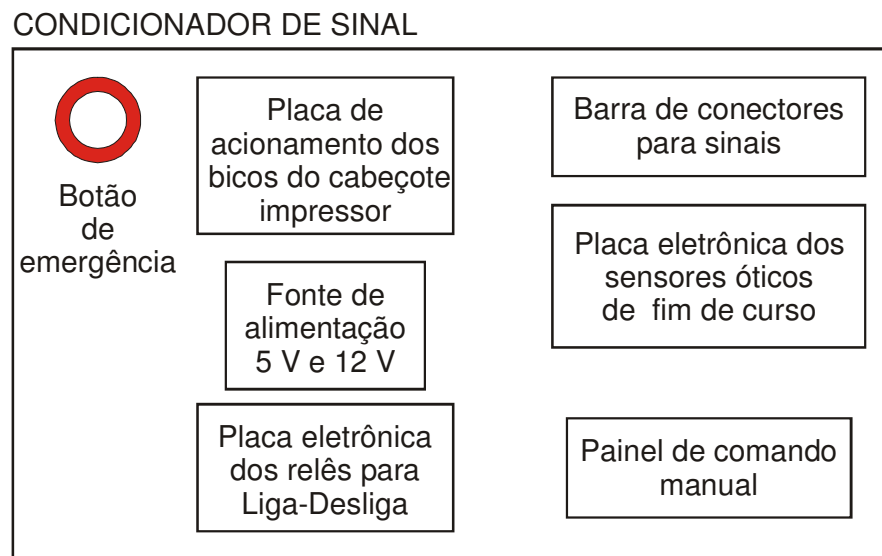


Fig. 144. Diferentes componentes do condicionador de sinal.

Durante o funcionamento normal do protótipo a placa de controle de movimento requer para seu funcionamento de 3 sensores de fim de curso para cada eixo, "*reverse*", "*home*" e "*forward*". Fisicamente, estes sensores se encontram antes dos fins de curso mecânicos.

*Home*, é o sensor requerido para que o sistema se posicione na situação inicial de movimento.

*Reverse*, é o sensor que indica à placa de controle que o eixo chegou no extremo máximo admitido antes do sensor de *home*.

*Forward*, é o sensor que indica à placa de controle que o eixo chegou no extremo máximo admitido depois do sensor de *home*.

Ao ser alcançadas estas posições, dependendo de como foram programados estes sensores podem, frear, desacelerar ou simplesmente liberar o servomotor.

Durante o procedimento de inicialização e posicionamento em *Home*, se o eixo chega primeiro em algum dos sensores dos extremos, *forward* ou *reverse* este troca se sentido de movimento procurando o sensor de *home*, caso encontre o outro sensor do extremo a placa de controle de movimento para o servomotor e acusa erro. A Fig. 145 apresenta o diagrama de blocos para funcionamento dos sensores de fim de curso óticos de ambos os eixos.

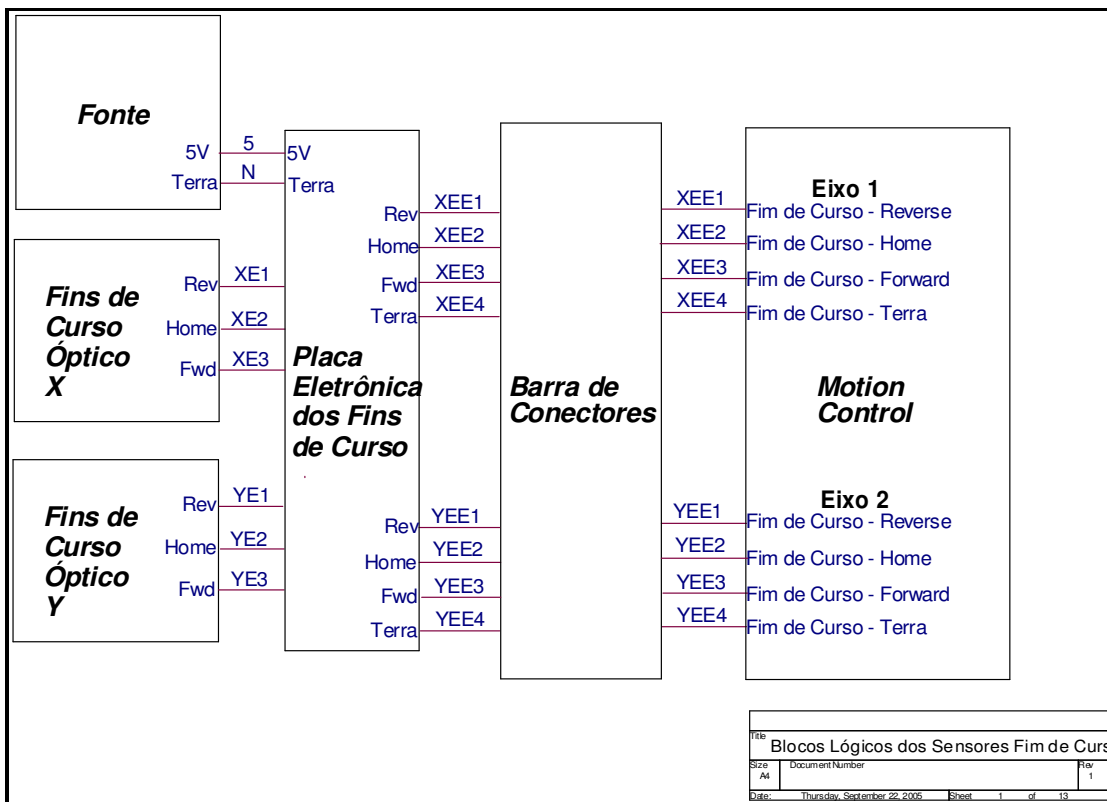


Fig. 145. Diagrama de blocos dos sensores de fim de curso óticos de ambos os eixos.

O esquema elétrico da placa eletrônica dos fins de curso é apresentado na Fig. 146 e da ligação dos sensores óticos na Fig. 147.

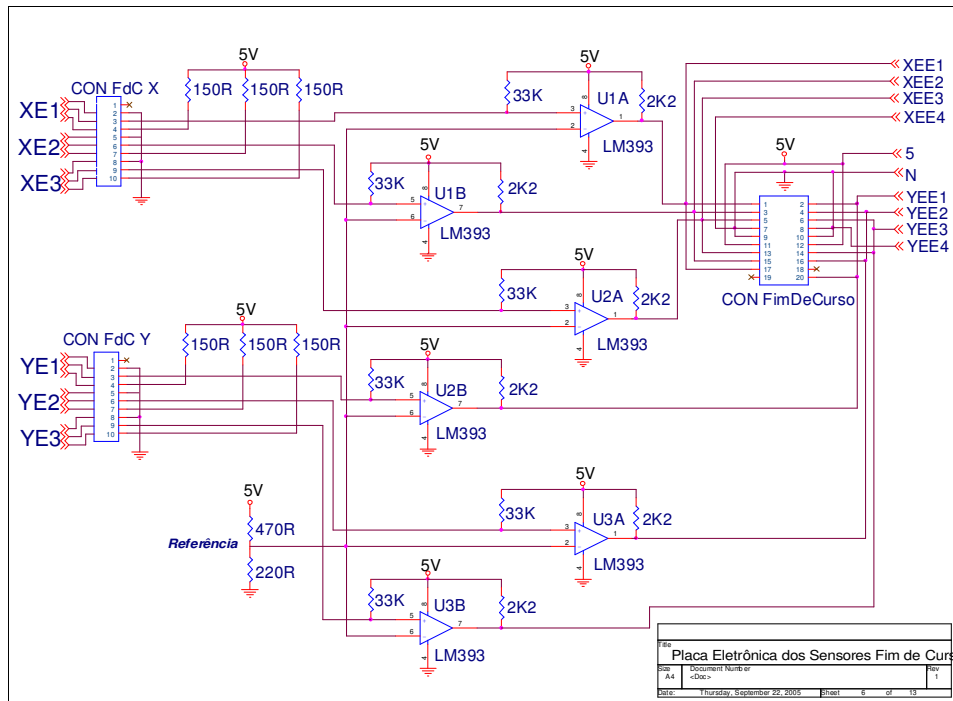


Fig. 146. Esquema elétrico da placa eletrônica dos sensores de fim de curso óticos.

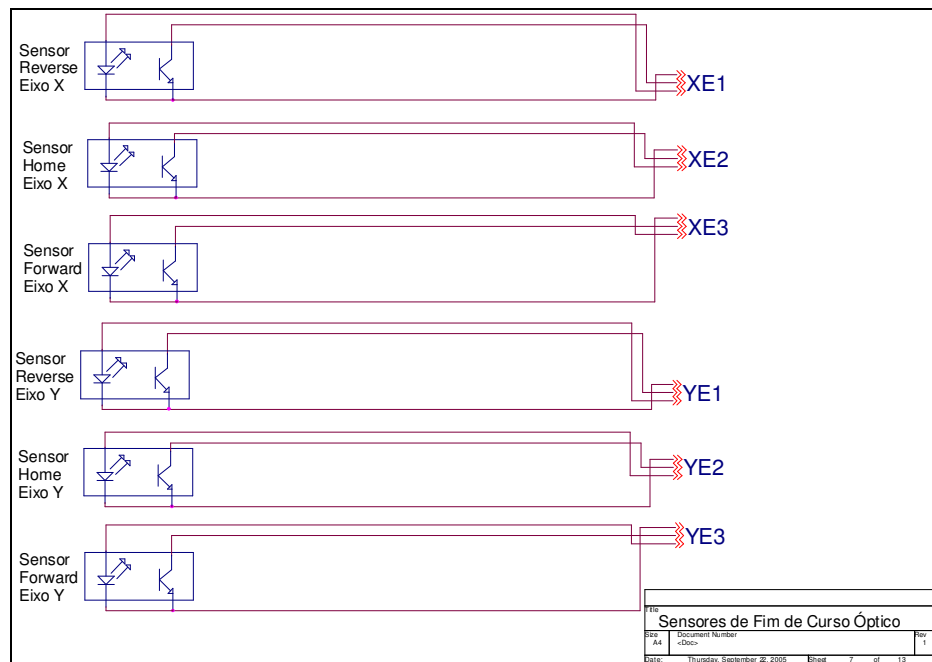


Fig. 147. Esquema elétrico da ligação dos sensores óticos de fim de curso.

O diagrama de blocos da placa eletrônica dos relês, apresentado na Fig. 148 tem duas funções, a primeira é ligar ou desligar os *drives* dos servomotores para iniciar seu funcionamento através de comandos da placa de controle de movimentos. A segunda função é desligar a energia fornecida ao *drives*, caso algum dos fins de curso mecânicos tenha sido acionado.

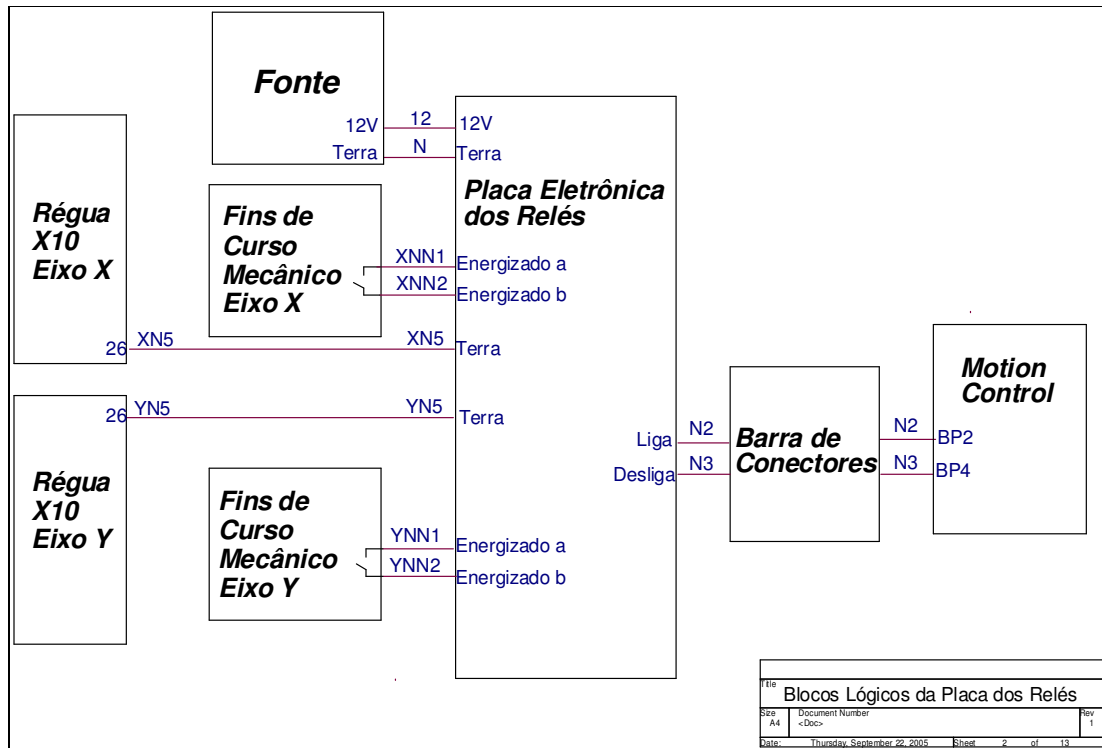


Fig. 148. Diagrama de blocos da placa eletrônica dos relês para liga/desliga dos *drives* dos servomotores.

Para acionamento dos bicos ejetores do cabeçote impressor o sistema implementado conta com o circuito eletrônico da Fig. 149. Os sinais de comando para acionamento deste circuito são provenientes de uma placa digital I/O adquirida para esta função.

Com o objetivo de organizar no condicionador de sinal a ligação de todos dos fios provenientes da placa de controle de movimentos com o resto dos módulos, foi implementada uma barra de conectores com as ligações apresentadas na Fig. 150.

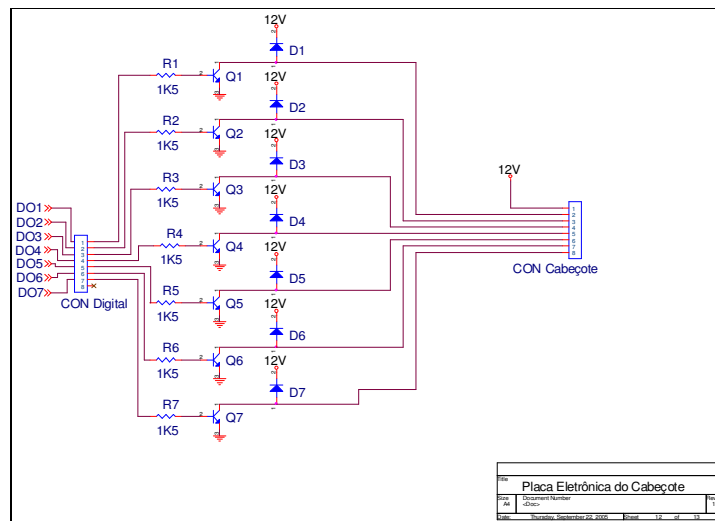


Fig. 149. Circuito elétrico da placa de acionamento dos solenóides dos bicos ejetores do cabeçote impressor.

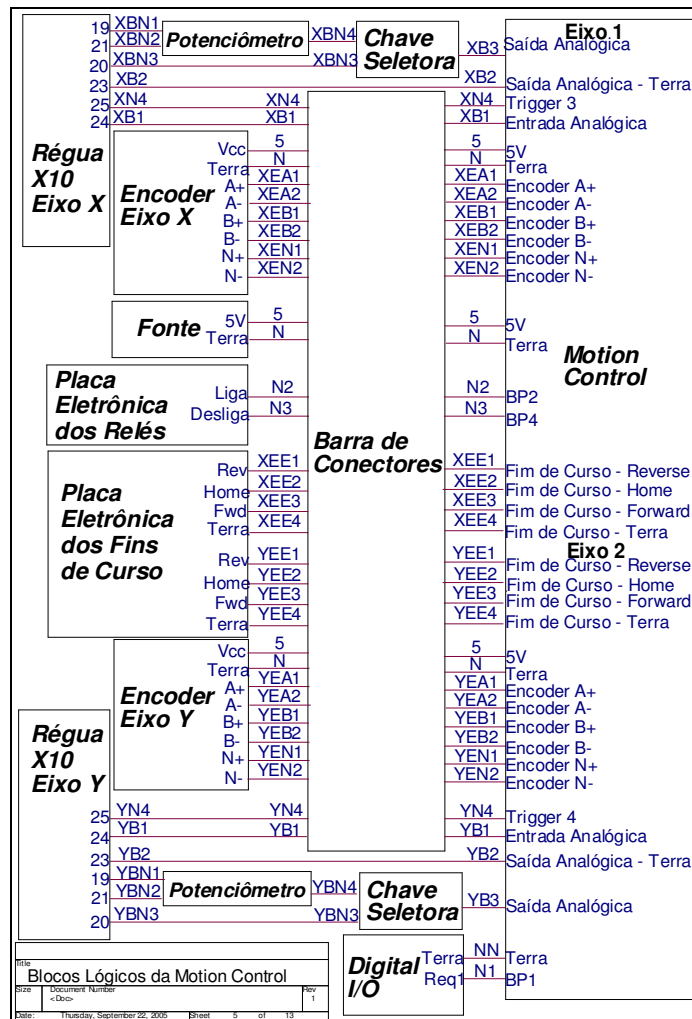


Fig. 150. Esquema da ligação elétrica dos sinais da placa de controle de movimentos com o resto dos módulos.



A Fig. 151 apresenta, através da régua de conexão X10, o esquema da ligação elétrica entre o *drive* de acionamento X com os diversos módulos do condicionador de sinal. Este circuito permite que os *drives* dos servomotores possam ser ligados manualmente mediante os botões do painel de comando manual ou mediante os relês liga/desliga que são acionados pela placa de controle de movimento. O sinal analógico de referência para os *drives* pode ser obtido dos potenciômetros do painel de comando ou vir diretamente da placa de controle de movimento. Um esquema similar para o eixo Y é apresentado na Fig. 152.

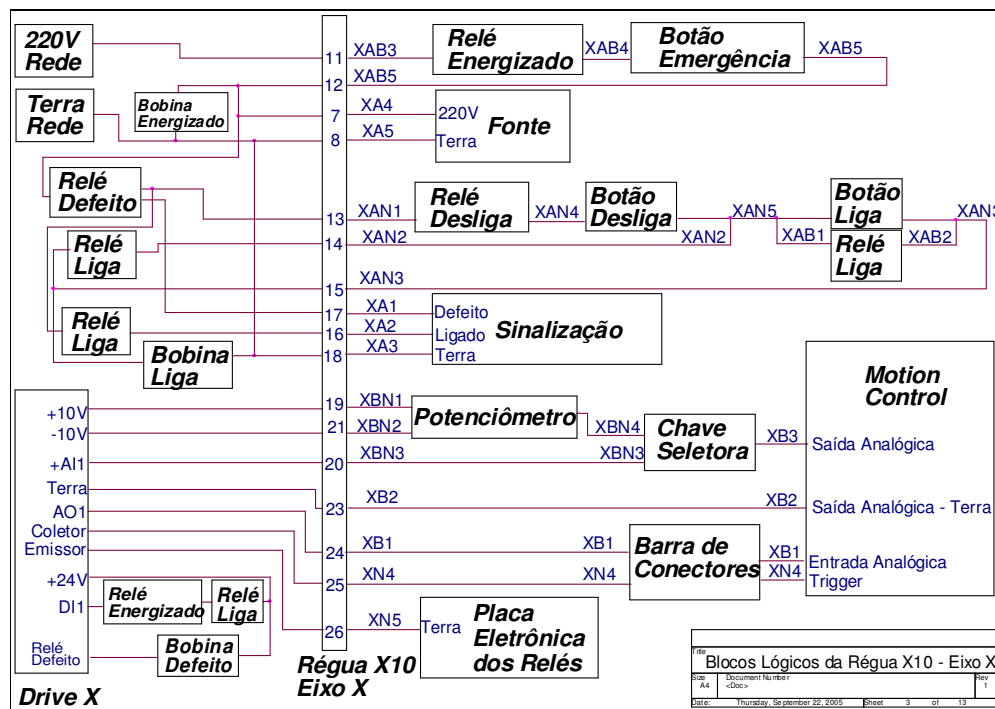


Fig. 151. Esquema da ligação elétrica entre o *drive* do servomotor X com seus diversos módulos requeridos para seu funcionamento.

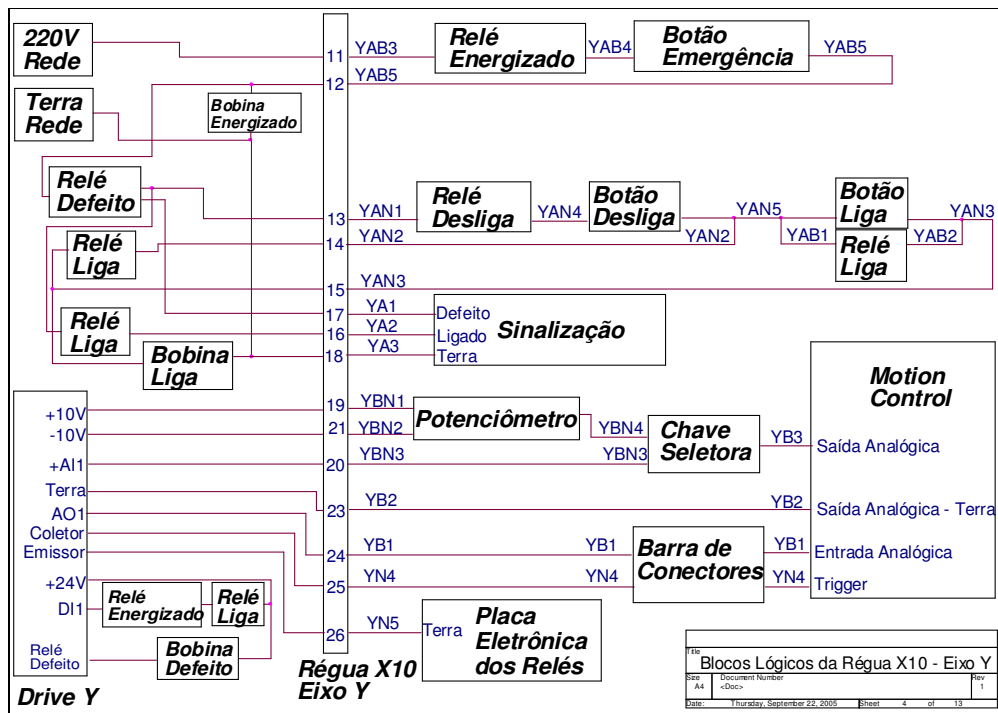


Fig. 152. Esquema da ligação elétrica entre o *drive* do servomotor Y com seus diversos módulos requeridos para seu funcionamento.

## APÊNDICE 7 Algoritmo PID-FF implementado no controlador de movimentos

O sistema impressor de formato extra-largo para movimentar ambos os eixo X e Y, utiliza uma placa de controle de movimentos que tem implementado o algoritmo de controle do tipo PID+FF, Proporcional, Integral, Derivativo, Trans-alimentado (FF de *FeedForward*), apresentado na Fig. 153 na sua forma mais simples (NI, 1999). Este algoritmo apresenta outras funções além dos parâmetros do PID clássico, estas são: as ações de trans-alimentação de velocidade ( $V_{ff}$ ), aceleração ( $A_{ff}$ ) e uma realimentação de velocidade ( $K_v$ ).

Os ganhos  $V_{ff}$  e  $A_{ff}$  atuam com os valores derivados da posição de referência, já o ganho  $K_v$ , atua com o valor da posição instantânea lida no transdutor de posição.

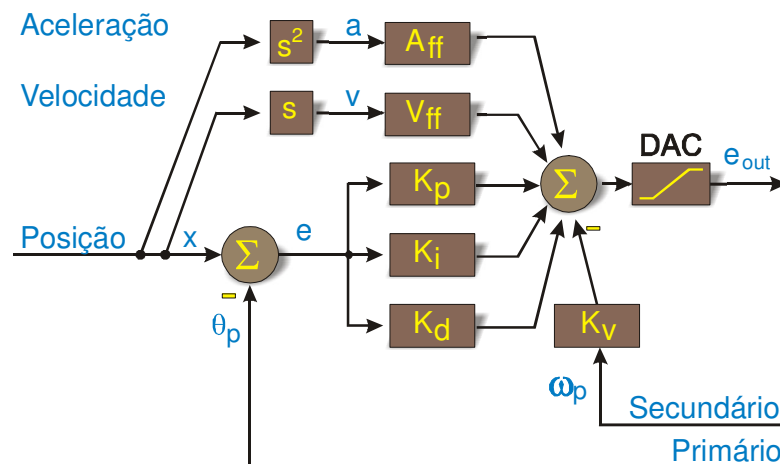


Fig. 153. Algoritmo de controle PID+FF implementável com o módulo (placa) de controle de movimento utilizado no sistema.

Os parâmetros apresentados na Fig. 153 são:

$a$ : Aceleração, pulsos/ $s^2$

$v$ : Velocidade, pulsos/ $s$

$x$ : Referência de posição, pulsos

$\theta_p$ : Realimentação digital do deslocamento angular do eixo do servomotor, pulsos

$e$ : Erro de posição, diferença entre o valor de referência ( $x$ ) e a realimentação ( $\theta_p$ )

$e_{out}$ : Sinal de tensão de saída do DAC, V

$\omega_p$ : Realimentação digital da velocidade angular do eixo do servomotor, pulsos/ $s$

$A_{ff}$ : Ganho de trans-alimentação da aceleração

$V_{ff}$ : Ganho de trans-alimentação da velocidade

$K_p$ : Ganho proporcional

$K_i$ : Ganho integral

$K_d$ : Ganho derivativo

$K_v$ : Ganho de realimentação da velocidade

DAC: Conversor Digital Analógico

No algoritmo de controle PID+FF implementado do módulo de controle de movimentos o **ganho proporcional  $K_p$**  implementado, atua sobre o sistema a cada período de amostragem da malha PID ( $T_a$ ). O controlador calcula o erro de posição ( $e$ ) e o multiplica pelo ganho  $K_p$  para determinar a componente proporcional no sinal de comando de saída ( $e_{out}$ ), do Conversor Digital – Analógico (DAC), Fig. 153.

Como uma **ação integral** muito forte pode causar um aumento de sobre-passagem e de instabilidade do sistema. É recomendado que  $K_i$  seja levado a algum valor próximo do zero até que o sistema esteja estável. Com o sistema estável ir incrementando este valor até conseguir o mínimo o erro de regime estacionário. (NI, 2004).

No sistema implementado a cada período de amostragem da malha de posição, o novo erro de posição ( $e$ ) é adicionado ao valor anterior acumulado, formando um somatório de integração incremental, o qual é multiplicado pelo ganho  $K_i$  para se obter a componente do sinal integral no comando de saída ( $e_{out}$ ) do DAC, Fig. 153.

Este Ganho integral,  $K_i$ , enquanto reduz o erro de regime estacionário, tende a incrementar o erro de seguimento de posição (dinâmico) na aceleração e desaceleração. Este efeito pode ser abrandado através da utilização do parâmetro "Limite de integração ILim", fornecido pela placa de acionamento e explicada a continuação. O ganho  $K_i$  não tem efeito quando ILim é igual a zero.

### **Limite de integração ILim**

Utiliza-se este parâmetro para limitar valores excessivos do ganho  $K_i$  e minimizar os efeitos adversos de atraso que a compensação integral tem durante a aceleração e desaceleração na malha PID. O valor acumulado no somatório de integração incremental é comparado a este limite de integração e o menor dos dois valores é multiplicado pelo ganho  $K_i$  para obter a componente integral no comando de saída ( $e_{out}$ ) do DAC, Fig. 153. O limite de integração ILim não terá efeito quando o ganho  $K_i$  for igual a zero.

Segundo (NI, 2004), o valor do **Ganho derivativo,  $K_d$** , deve ser não nulo em sistemas que utilizam *drives* no modo em torque (como é o caso do sistema impressor cujo sinal de entrada de comando é proporcional ao torque do servomotor), para que a malha de controle de posição do sistema fique estável. Para sistemas que utilizam *drives* no modo velocidade (cujo sinal de entrada de comando define proporcionalmente a velocidade do servomotor) o valor de  $K_d$  deve tender a zero ou usar valores muito pequenos.

Para o ganho  $K_d$ , o sistema implementado calcula a derivada (variação) do erro de posição a cada período de amostragem derivativo ( $T_d$ ) da malha PID (múltiplo do período de amostragem,  $T_a$ ). Este termo derivativo é multiplicado por  $K_d$  a cada período de amostragem PID ( $T_a$ ) para obter a componente derivativa no sinal de comando de saída ( $e_{out}$ ) do DAC.

#### **Período de amostragem derivativo, $T_d$**

Este parâmetro determina o período com que o termo de derivada de posição é calculado (em períodos de amostragem PID,  $T_a$ ). No sistema implementado, para conhecer o valor deste parâmetro em unidades de tempo, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$\text{Período de amostragem derivativo} = (T_d + 1) * T_a$$

onde:

$T_d$ : Período de amostragem derivativo

$T_a$ : Período de amostragem da malha PID

A partir desta fórmula e dos valores da Tabela 13, o menor período de amostragem derivativo será obtido considerando os menores valores de  $T_d$  e  $T_a$

$$\text{Período de amostragem derivativo} = (0 + 1) * 62,5 \mu\text{s} = 62,5 \mu\text{s}$$

Já o maior período de amostragem derivativo será obtido considerando os maiores valores de  $T_d$  e  $T_a$

$$\text{Período de amostragem derivativo} = (63 + 1) * 500 \mu\text{s} = 32 \text{ ms}$$

O ajuste deste período proporciona uma grande flexibilidade na sintonia do termo derivativo da malha PID. Ainda segundo (NI, 2004), à medida em que  $T_d$  é incrementado, pode-se utilizar valores menores de  $K_d$  para resultados similares como explicado a continuação.

Em sistemas de baixa inércia,  $T_d$  deve ser ajustado para valores pequenos, 0 ou 1, de maneira que o termo derivativo é calculado freqüentemente a fim de proporcionar um adequado comportamento da malha de controle.

Sistemas de alta inércia, como é o caso do eixo Y do sistema impressor, podem-se beneficiar de valores maiores de  $T_d$ , já que uma elevada inércia gera um erro de posicionamento que varia muito lentamente, permitindo assim que o termo derivativo seja calculado com menor freqüência. Isto significa que aumentando  $T_d$  podem-se utilizar valores menores de  $K_d$ , para obter um comportamento similar do sistema. Cabe lembrar que o aumento de  $K_d$  é necessário para diminuir a oscilação no sistema, mas, com valores muito elevados, o servomotor começa a gerar ruído audível, assim, a vantagem desta operação é um sistema funcionando mais suave e com menor ruído proveniente do termo derivativo, evitando também um aquecimento do acionamento sem nenhuma melhoria no comportamento dinâmico do sistema.

### **Ganho de realimentação (secundário) de velocidade, $K_v$**

Se em cada eixo de movimento da impressora fosse implementado um segundo sistema de realimentação da posição/velocidade, além da medição indireta por *encoder* acoplado ao eixo do servomotor (neste caso, uma escala translativa para medição direta de deslocamento translativo final) o *encoder* acoplado ao eixo do servomotor (mapeado na placa como secundário) poderia ser utilizado para realimentação secundária da velocidade utilizando o ganho  $K_v$  (Fig. 153), sendo que a escala translativa (seria mapeada para medição primária de velocidade) realizaria a realimentação da posição.

A ação do ganho  $K_v$ , similar ao ganho derivativo  $K_d$ , também atua sobre o amortecimento do sistema. Como observado na Fig. 153, aparece uma segunda malha de realimentação, (realimentação de velocidade), que pode ser utilizado para:

- incrementar a ação de amortecimento no sistema;
- alcançar um bom desempenho e um sistema estável quando se usa medição direta da variável de posição que se encontra no final da cadeia cinemática.

Na implementação na placa de controle de movimento é necessário um valor diferente de zero no ganho de velocidade  $K_v$  para ativar a malha de realimentação de velocidade e fornecer mais esta componente ao DAC para obter a composição do comando de saída ( $e_{out}$ ). Quando se tem só o sistema de medição indireta (*encoder* acoplado no eixo traseiro do servomotor) na malha de posição ainda é possível utilizar na placa de controle de movimento o ganho  $K_v$ , mapeando o *encoder* como sistema de medição primário e secundário simultaneamente. Este recurso só é possível com sistemas de realimentação digital tipo *encoder*.

De igual forma ao termo  $K_d$ , a componente do ganho de realimentação da velocidade  $K_v$  é calculada a cada período de amostragem derivativo ( $T_d$ ) e sua contribuição é atualizada a cada período de amostragem ( $T_a$ ) da malha PID.

### **Ganho de trans-alimentação da aceleração (Acceleration - Feed-Forward)**

O ganho de trans-alimentação da aceleração  $A_{ff}$  implementado no algoritmo da placa de controle de movimentos, é utilizável para reduzir o erro de seguimento de posição durante a aceleração e desaceleração do servomotor, dependente da inércia do sistema.

A trans-alimentação da aceleração  $A_{ff}$  é uma técnica de compensação em malha aberta pelo que não afeta a estabilidade do sistema. Mas a utilização de um valor muito elevado de  $A_{ff}$  pode inverter seu efeito piorando o comportamento do sistema. Segundo ALTAIR (1999) se o erro de seguimento for causado por forças de atrito não linear e/ou perturbações de carga, o ganho  $A_{ff}$  não reduz esta parcela de erro de seguimento.

O ganho de trans-alimentação da aceleração  $A_{ff}$  fornece uma parcela diretamente proporcional à aceleração (segunda derivada do valor de referência de posição), embutida no sinal de comando de saída ( $e_{out}$ ) do DAC.

### **Ganho de trans-alimentação da velocidade (Velocity - Feed-Forward)**

Existe também a possibilidade de usar uma ação de trans-alimentação de velocidade  $V_{ff}$  a qual atua durante trajetos em movimento uniforme. O ganho de  $V_{ff}$  é utilizado para minimizar o erro de seguimento em velocidade uniforme do posicionador, sendo dependente do amortecimento viscoso do sistema.

Comparativamente, um incremento do ganho integral  $K_i$  permite também reduzir o erro de seguimento em velocidade uniforme mas só ao custo de incrementar o erro de seguimento durante a aceleração e desaceleração, e afetando a estabilidade do sistema. É por esta razão que incrementar  $K_i$  não é a solução mais recomendada quando se dispõe da ação de trans-alimentação da velocidade (NI, 2004).

A trans-alimentação de velocidade  $V_{ff}$  (tal como a de aceleração  $A_{ff}$ ), é uma técnica de compensação de malha aberta, e portanto não afeta a estabilidade do sistema. Porém, um valor muito elevado de  $V_{ff}$  pode até piorar o erro de seguimento em velocidade uniforme.

Segundo a NI (2004), a trans-alimentação de velocidade é utilizada tipicamente quando se está operando em modo PI- $V_{ff}$  com um *drive* no modo velocidade ou com um valor muito elevado no ganho de realimentação de velocidade  $K_v$ . Nestes casos, o erro de seguimento não compensado é diretamente proporcional à velocidade desejada e pode ser reduzido com a utilização da trans-alimentação da velocidade. Por outro lado, a trans-alimentação da velocidade é raramente utilizada ao operar em modo PID com o *drive* no modo torque. Neste caso, como o erro de seguimento é proporcional ao torque requerido (não à velocidade), o ganho  $V_{ff}$  é geralmente muito pequeno e a trans-alimentação da velocidade não é requerida.

No sistema implementado, o ganho de trans-alimentação da velocidade  $V_{ff}$  proporciona uma contribuição diretamente proporcional à velocidade (derivada do valor de referência de posição) embutida no sinal de comando de saída ( $e_{out}$ ) do DAC, Fig. 153.

### **Faixas de valores dos parâmetros do algoritmo de controle**

As faixas de valores definidas para o algoritmo de controle e que podem ser empregados nos diversos parâmetros do controlador PID+FF, são apresentadas na Tabela 13, a seguir.

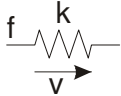
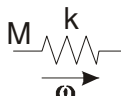
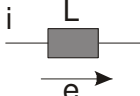
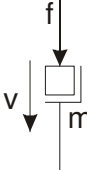
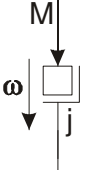
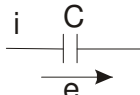
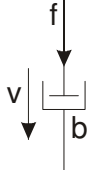
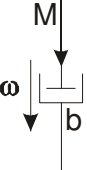
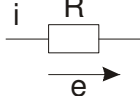
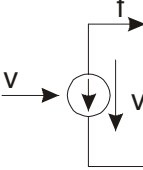
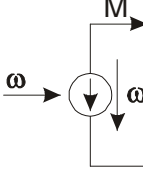
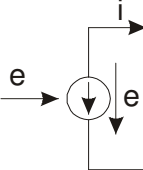
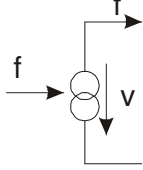
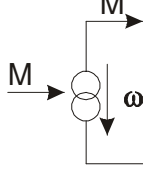
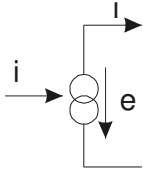


Tabela 13. Faixas de valores dos parâmetros PID+FF para o algoritmo de controle do sistema implementado (NI, 2004).

<b>Parâmetro PID</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Faixa de valores</b>
Ganho proporcional	$K_p$	0 a 32.767
Ganho integral	$K_i$	0 a 32.767
Limite de integração	ILim	0 a 32.767
Ganho derivativo	$K_d$	0 a 32.767
Período de amostragem derivativo	$T_d$	0 a 63
Ganho de realimentação da velocidade	$K_v$	0 a 32.767
Ganho de trans-alimentação da aceleração	$A_{ff}$	0 a 32.767
Ganho de trans-alimentação da velocidade	$V_{ff}$	0 a 32.767
Período de amostragem da malha PID	$T_a$	62,5 - 125 - 188 - 250 312 - 375 - 438 - 500 $\mu$ s

**APÊNDICE 8 Lista de elementos de circuito**

Símbolos esquemáticos utilizados

Tipo	Sistema mecânico translacional	Sistema mecânico rotacional	Sistema elétrico
Armazenador de energia potencial.	Mola 	Mola de torção 	Indutor 
Armazenador de energia cinética.	Massa 	Inércia 	Capacitor 
Dissipador de energia.	Amortecedor 	Amortecedor ang. 	Resistor 
Fonte	Fonte de vel. lin. 	Fonte de vel. ang. 	Fonte de tensão 
Fonte	Fonte de força 	Fonte de torque 	Fonte de corrente 

- i: Corrente
- e: Tensão
- L: Indutância
- k: Cte. da mola
- b: Coeficiente de atrito viscoso
- M: Torque
- f: Força
- C: Capacitância
- m: Massa
- ω: Vel. angular
- v: Velocidade
- R: Resistência
- j: Inércia

	Transformador →	Sistema equivalente
<p>Transformador do sistema elétrico para o sistema mecânico rotacional</p> <p><math>K =</math> Constante do transformador</p>	