4 Resultados Experimentais com o Manipulador

Os experimentos realizados com os protótipos anteriores, construídos com diversos tipos de materiais e técnicas, permitiram evoluir para um protótipo final. Esse protótipo atendeu aos objetivos almejados através das seguintes características:

- apresentou uma alta rigidez à torção;
- a movimentação foi satisfatória, realizando curvaturas próximas a 180°;
- os materiais utilizados e as técnicas de montagem viabilizaram uma padronização na fabricação dos elos.

A próxima seção descreve os equipamentos utilizados para realização dos experimentos com o protótipo final em conjunto com as servo-válvulas proporcionais controladas por computador.

4.1. Montagem do sistema

O protótipo final, concebido através das várias gerações de protótipos do Capítulo 3, foi submetido a alguns testes com o objetivo de verificar as suas qualidades mecânicas e estudar o comportamento do sistema a partir de um controle feito por computador. Foram utilizadas servo-válvulas como atuadores, sendo responsáveis pelo controle das pressões fornecidas a cada um dos músculo do manipulador. O programa de controle foi desenvolvido utilizando a plataforma *LabView* (National Instruments, 2000). A comunicação entre o programa e as servo-válvulas foi feita através de uma placa D/A.

Foi incorporado ao protótipo da 8ª geração (reforçado com atadura elástica, ver seção 3.5.2) uma mangueira reforçada de poliuretano (ver seção 3.5.3) para aumentar a rigidez à torção do elo. O manipulador foi montado em um

perfil de alumínio, como mostra a Fig 101. A Fig. 102 destaca a extremidade do manipulador.



Figura 101: Protótipo final utilizado nos experimentos com as servoválvulas



Figura 102: Protótipo final; detalhe da montagem com a mangueira de poliuretano reforçada

Foi utilizado um tubo de poliuretano azul de 6mm de diâmetro externo para simular a resistência dos tubos que futuramente irão fornecer as pressões para os elos seguintes.

Servo-válvulas

Válvulas pneumáticas proporcionais (servo-válvulas) controladas por tensão foram implementadas ao sistema, vide Fig. 103. A servo-válvula possibilita a regulagem contínua de uma pressão pneumática. A variação da pressão é efetuada através de uma membrana, cuja posição é influenciada por uma força variável, gerada pelo solenóide proporcional. A magnitude da pressão de saída é proporcional à força magnética ou também à corrente do solenóide. Se a pressão de saída supera o valor ajustado, há a exaustão através de uma saída secundária. A combinação da válvula proporcional com um amplificador eletrônico (intrínseco à válvula) permite modificar a pressão de saída por intermédio de um sinal de referência. Como geradores de sinais de referência podem ser utilizados: potenciômetros, reguladores, computadores e controladores de processos.

As principais características da servo-válvula utilizada são comentadas na Tabela 9 (as especificações completas encontram-se no ANEXO):

Fabricante	BOSCH-REXROTH		
Vazão Nominal	1000 l/min		
Voltagem de alimentação	24V DC ± 20 %		
Consumo de Corrente (máx)	1,3A		
Pressão de Alimentação	7 bar		
Pressão de Saída (mín/máx)	0/6 bar		
Sinal de Entrada Nominal	0-10V		
Sinal de Saída Real	0-10V		

Tabela 9: Principais características da válvula proporcional



Figura 103: Válvula proporcional controlada por tensão (Bosch-Rexroth)

Compressor

As principais características do compressor utilizado (Fig. 104) são apresentadas na Tabela 10 (as especificações completas encontram-se no ANEXO).

Marca/Modelo	Schulz/ CSI 7,4/50		
Larg x Alt x Comp	380 x 680 x 730 mm		
Peso Líquido	39kg		
Deslocamento teórico	153 l/min		
Pressão de Operação	Mínima – 6,9 bar		
	Máxima – 9,7 bar		
Potência	1,5 hp		
Volume do Reservatório	46 1		



Figura 104: Compressor CSI 7,4/50 (SCHULZ)

Utilizou-se uma placa *ISA Bus Servo I/O Card* compatível com computadores PC convencionais, ilustrada na Fig. 105. As principais características da placa são (para as informações completas, consultar ANEXO):

• Saídas Analógicas

- o até 8 saídas analógicas
- \circ amplitude do sinal variando de + 10 V até 10 V
- o 13 bits de resolução

• Entradas analógicas

- o 8 canais de entradas analógicas
- o 13 bits de resolução
- o configurável em faixas de +/-10V ou +/-5V
- Saídas e entradas digitais
 - 32 *bits*, configuráveis em várias combinações de entradas e saídas
 - o compatível com Opto-22



Figura 105: Placa ISA Bus Servo I/O Card utilizada nos experimentos

Programa em LabView

Foi desenvolvido um programa utilizando a plataforma *LabView* (National Instruments, 2000) para fazer o controle das servo-válvulas. A Fig. 106 mostra a interface do programa.



Figura 106: Interface do programa de controle desenvolvido em LabView

O painel à esquerda (Fig. 106) permite atuar em cada uma das três câmaras do elo independentemente fornecendo pressões desejadas. Como comentado anteriormente (ver seção 3.5.2, 6^a geração), a pressão mínima estipulada para cada um dos músculos foi de 1,5 bar. Desta forma, o músculo poderia receber pressões pneumáticas entre 1,5 e 6 bar através de sinais de referência analógicos fornecidos pela placa D/A. As pressões eram transformadas em tensões elétricas de 2,5 a 10V e fornecidas às servo-válvulas. No painel à direita (Fig. 106), foram implementadas duas rotinas diferentes de programação que atuavam simultaneamente nos três músculos do elo. O sinal de referência da primeira rotina era composto por senóides defasadas de 120º (como um sistema trifásico), fazendo com que a extremidade do elo seguisse uma trajetória circular.

A segunda rotina implementa uma movimentação tipo pêndulo, com dois músculos recebendo o mesmo sinal senoidal de referência e o terceiro músculo com o sinal senoidal defasado de 180°. Nas duas situações é possível ajustar a freqüência e a amplitude do movimento realizado pelo manipulador. A Fig. 107 mostra a bancada onde foram feitos os experimentos. Na Fig. 108, alguns dos equipamentos utilizados são apresentados.



Figura 107: Bancada de experimento



Figura 108: Equipamentos utilizados nos experimentos (da esquerda para a direita – servoválvulas, fonte de alimentação e o sistema manual de válvulas)

O sistema manual de válvulas (à direita da Fig. 108) foi utilizado durante os experimentos feitos com os protótipos iniciais.

A modelagem matemática a ser apresentada a seguir é referente ao elo do manipulador projetado no plano vertical que faz um ângulo θ em relação ao eixo

x. Como o desenvolvimento dos modelos depende muito das características de cada protótipo, esta modelagem só pode ser elaborada depois de concluído o desenvolvimento mecânico do manipulador.

4.2. Modelagem

Como descrito anteriormente no Capítulo 3, o raio de curvatura do elo do manipulador é aproximado por um arco de círculo de raio R e ângulo α , como mostra a Fig. 109. Os tubos termo-retráteis acoplados às extremidades do elo possuem comprimento t. A corda associada d é dada pela eq. (2). O elo faz um ângulo $\alpha/2$ em relação ao eixo x. O comprimento L' deformável do elo é dado por

$$L' = L - 2t \tag{77}$$

uma vez que os tubos termo-retráteis impedem a deformação das partes em contato com ele. A área total da seção reta das quatro mangueiras siliconadas (espaçador) é

$$A_0 = \pi \left(D_{ext}^2 - D_{int}^2 \right)$$
(78)



Figura 109: Aproximação da curvatura do elo por um arco de círculo

A Fig. 110 ilustra um corte em perfil do elo. Cada mangueira siliconada possui área $\frac{A_0}{4}$, representada em azul. O momento de inércia de flexão *I* associado ao espaçador é dado por

$$I = 4I_0 + \frac{A_0}{4} D_e^2 + 2\frac{A_0}{4} \left(\frac{D_e}{2}\right)^2$$
(79)

$$I = 4I_0 + \frac{\pi \left(D_e^2 - D_i^2\right)}{4} D_e^2 + 2\frac{\pi \left(D_e^2 - D_i^2\right)}{4} \left(\frac{D_e}{2}\right)^2$$
(80)

onde D_e e D_i são os diâmetros externo e interno das mangueiras e I_0 é o momento de inércia de flexão de cada mangueira, igual a

$$I_0 = \frac{\pi \left(D_e^4 - D_i^4 \right)}{64} \tag{81}$$

A distância d_v (Fig. 110) entre o centro de cada músculo (MAS-10) e o centro do espaçador varia de acordo com o diâmetro externo de cada músculo, que por sua vez é influenciado diretamente pela pressão interna. Dessa forma, foi feita uma interpolação linear com a deformação ε_i (i = 1,2,3) de um músculo m_i para se obter o valor da distância d_{vi} em milímetros, dada por

$$d_{\nu_i} = \frac{D_e}{2} + \frac{\left(14 + 30\varepsilon_i\right)}{2} \tag{82}$$

A Fig. 110 apresenta um corte em perfil do elo com algumas medidas descritas.



Figura 110: Corte transversal do elo, com os músculos pneumáticos em preto e o espaçador em azul

As forças F_i , produzidas por cada músculo a partir de uma pressão interna P_i e de uma deformação ε_i , foram obtidas através de uma interpolação linear realizada a partir de uma aproximação polinomial das curvas da Fig. 56 (ver seção 3.4.2), geradas experimentalmente. Os polinômios são

$$y_0 = -1,7375x^3 - 0,6068x^2 - 49,831x - 0,6516$$
(83)

$$y_1 = -0,9974x^3 + 4,5916x^2 - 41,634x + 75,253$$
(84)

$$y_2 = -0,4272x^3 + 5,4858x^2 - 41,207x + 152,94$$
(85)

$$y_3 = -0,1228x^3 + 3,1252x^2 - 38,565x + 226,05$$
(86)

$$y_4 = -0,0636x^3 + 2,1311x^2 - 35,869x + 295,33$$
(87)

$$y_5 = -0.0333x^3 + 1.3151x^2 - 31.318x + 354.87$$
(88)

$$y_6 = -0,0204x^3 + 0,9165x^2 - 29,607x + 416,33$$
(89)

onde y_i representa a força (em Newtons) associada a uma deformação compressiva de x% sob uma pressão de i bar ($0 \le i \le 6$). A força F_i gerada por cada músculo será dada por uma interpolação linear das eqs. (83) a (89):

$$F_{i} = \left(y_{j} \cdot (j+1-P_{i}) + y_{j+1} \cdot (P_{i}-j)\right)$$
(90)

para i = 1,2,3 e j é um intervalo tal que $j \le P_i \le j+1$ bar. Foram consideradas deformações entre – 5 e 23%. A partir dessas forças, é possível calcular o momento de inércia M_i associado a cada músculo:

$$M_i = F_i d_{\nu_i} \tag{91}$$

Assim, como as mangueiras estão dispostas em um arranjo de 120°, tem-se que o momento fletor total dos músculos é

$$M = \sqrt{M_1^2 + M_2^2 + M_3^2 - M_1M_2 - M_1M_3 - M_2M_3}$$
(92)

O ângulo θ entre o eixo projetado x' e o eixo x (ver Fig. 3, seção 3.5.1) pode ser obtido através das eqs. (93) e (94):

$$\sin\theta = \frac{-M_{1} + \frac{(M_{2} + M_{3})}{2}}{M}$$
(93)

$$\cos\theta = \frac{(-M_2 + M_3)\frac{\sqrt{3}}{2}}{M}$$
(94)

A deformação ε_s do material siliconado do espaçador é dada por

$$\varepsilon_s = \frac{\left(F_1 + F_2 + F_3\right)}{A_0 E} \tag{95}$$

onde E é o módulo de elasticidade do material siliconado.

Como o espaçador possui um comprimento menor do que o comprimento dos músculos (quando pressurizados com a mínima pressão de trabalho), foi definido uma constante *offset* que faz com que a contração do silicone somente aconteça depois que a deformação do elo ε_{elo} ultrapassar o valor deste parâmetro. A deformação do elo será então

$$\varepsilon_{elo} = \varepsilon_s - offset \tag{96}$$

Sendo L_0 o comprimento inicial do elo, o seu comprimento L final será dado por

$$L = L_0 - \varepsilon_{elo} L_0 \tag{97}$$

O ângulo α da extremidade do elo, considerando as extremidades do elo fixas através dos termo-retráteis, será

$$\alpha = \frac{(L-2t)}{R} \tag{98}$$

Para valores de R muito maiores que o diâmetro do elo, as deformações dos músculos poderiam ser consideradas aproximadamente iguais (modelo simplificado). No entanto, como os raios obtidos nos experimentos podem ser comparáveis ao diâmetro do elo, as diferenças entre as deformações de cada músculo durante as curvaturas precisam ser consideradas. Tem-se então:

$$\varepsilon_1 = \frac{L_0 - 2t - \alpha \left(R + d_{\nu_1} \sin \theta \right)}{L_0} \tag{99}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{L_0 - 2t - \alpha \left(R + d_{\nu_2} \cos \theta \frac{\sqrt{3}}{2} - d_{\nu_2} \frac{\sin \theta}{2} \right)}{L_0} \tag{100}$$

$$\varepsilon_{3} = \frac{L_{0} - 2t - \alpha \left(R + d_{v_{3}} \cos \theta \frac{\sqrt{3}}{2} - d_{v_{3}} \frac{\sin \theta}{2}\right)}{L_{0}}$$
(101)

O cálculo das deformações é então feito de forma iterativa. O item a seguir apresenta a modelagem do protótipo final e os resultados obtidos a partir de experimentos realizados.

4.3. Resultados Experimentais

O objetivo do experimento realizado com o manipulador foi a obtenção da posição *xy* da sua extremidade em função de certas combinações de valores de pressão. O manipulador foi colocado sobre uma bancada e preso pela sua base, como mostra a Fig. 111. Como o manipulador encontra-se totalmente apoiado

sobre a mesa, o efeito da gravidade pode ser desprezado. Dessa forma, será possível comparar os resultados obtidos experimentalmente com as previsões do modelo analítico (ver seção 4.2).



Figura 111: Obtenção de medidas da extremidade do manipulador

Cada tubo termo-retrátil acoplado às extremidades do elo possui 20mm de comprimento. O material siliconado do espaçador possui E = 6,5 MPa, medido experimentalmente. As mangueiras do espaçador possuíam diâmetro interno de 9,5mm e diâmetro externo de 15,9mm. Foi medido um *offset* de 8,55% do comprimento do elo até que o espaçador começasse a se contrair. O critério de convergência utilizado para o cálculo das deformações analíticas foi de 10^{-7} . A Tabela 11 mostra a média de três posições *xy* medidas para cada conjunto de pressões *P*₁, *P*₂ e *P*₃, e as respectivas previsões obtidas através do modelo analítico . Os valores apresentam uma margem de erro de cerca de 4% devido às dificuldades encontradas na realização das medidas. Como o experimento foi realizado apoiando o elo em cima de uma manta de borracha, o manipulador não conseguia se mover livremente devido ao atrito presente. Dessa forma, após a sua pressurização, ele era levantado e movido a favor das forças exercidas pelos músculos até a sua acomodação. Durante os movimentos curvatórios (músculos pressurizados com diferentes pressões), quanto maior era a diferença de pressão,

maior era a precisão alcançada até a sua acomodação. Por esse motivo, foram escolhidos somente pontos que permitissem a medição da posição da sua extremidade dentro de uma margem de erro aceitável. Para pressões iguais dos músculos (movimento retilíneo), não houve grandes dificuldades na realização da medição.

Pressão (bar)		Posição Média (mm)		Previsão (mm)		Erro Máximo da Previsão	
P ₁	P ₂	P ₃	X	Y	X	Y	ua i i cvisao
1,5	1,5	1,5	900,7	0,0	915,0	0,0	1,5 %
3	3	3	872,3	0,0	887,8	0,0	1,6 %
6	6	6	831,0	0,0	829,6	0,0	0,1 %
1,5	6	6	-20,0	510,0	-44,7	454,0	5,7 %

Tabela 11: Posicionamento xy da extremidade do manipulador

Através dos dados da Tabela 11, nota-se que as previsões apresentaram um erro menor que 6% com relação às posições reais medidas. O modelo analítico desenvolvido não previu o efeito da atadura elástica aplicada ao redor do elo. Como a atadura exerce uma influência mais relevante durante os movimentos curvos do manipulador, as primeiras medições realizadas da extremidade do elo com diferenças de pressões entre os músculos apresentaram uma diferença significativa com relação às posições previstas pelo modelo. Dessa forma, foi feita uma medição (para o conjunto de pressões $(P_1, P_2, P_3) = (1,5;6;6)$) com o elo sem a atadura a fim de se avaliar realmente a sua influência na movimentação do sistema. Como a atadura elástica exerce uma função muito importante na integridade do músculo, garantindo o posicionamento dos músculos em relação ao espaçador, não foi possível obter mais pontos com uma precisão aceitável para serem comparados com a previsão do modelo.

Uma aplicação do manipulador desenvolvido é apresentada no próximo capítulo.