

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1. Contribuições neste Trabalho

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um manipulador pneumático flexível de longo alcance que pode ser utilizado na realização de diversos tipos de tarefas, em ambientes de difícil acesso e que requeiram uma interação física mais suave com o meio de atuação, permitindo, inclusive, o acoplamento de ferramentas à sua extremidade.

Foram apresentados alguns tipos de sistemas robóticos flexíveis, examinando seus princípios de atuação. Estes princípios foram fonte de motivação para o desenvolvimento do manipulador proposto. Foi apresentado o conceito de Músculos Pneumáticos Flexíveis, sendo estes os principais mecanismos de atuação de robôs flexíveis. As características básicas destes músculos, assim como as classes existentes, através das quais eles se subdividem, foram comentadas. O tipo de músculo que mais se adequou aos princípios de funcionamento do manipulador flexível foi o músculo trançado (também conhecido como músculo de *McKibben*), devido à sua geometria, por ser um músculo compacto mesmo sob pressão e pela possibilidade de adquiri-lo comercialmente.

Foram desenvolvidos modelos da cinemática 2D e 3D do elo do manipulador para que a etapa seguinte de desenvolvimento dos atuadores pudesse ter início. Nesta fase, foram desenvolvidos e aprimorados, através de experimentos, músculos pneumáticos flexíveis que pudessem ser utilizados como atuadores do manipulador proposto, já que até então não se tinha conhecimento de algum produto comercial com características similares. A partir da detecção de problemas relacionados ao desgaste dos materiais do músculo durante o ciclo de pressurização e despressurização, novas soluções eram buscadas e implementadas no sistema. Novos testes então eram feitos a partir das melhorias e, dessa forma, o desenvolvimento mecânico foi sendo aperfeiçoado. Os modelos analíticos de cada atuador foram apresentados. A partir desses modelos, foi possível verificar os dados obtidos a partir dos experimentos realizados com cada geração de

músculos. Dos músculos desenvolvidos, o que apresentou melhor relação comprimento/pressão foi o músculo reforçado com um fio rígido de polipropileno, chegando a deformações aproximadamente lineares de até 100% do seu comprimento inicial. Porém, o efeito de segunda ordem verificado durante a sua deformação, proveniente da disposição espiral do fio utilizado para reforço, inviabilizou o uso do músculo para fins deste projeto. Com isso, o músculo que melhor se adequaria para a construção do protótipo seria o músculo reforçado com anéis rígidos e flexíveis, principalmente por não apresentar o efeito de segunda ordem verificado com o caso anterior e por apresentar melhorias mecânicas com relação aos seus precursores. Músculos com esta técnica de construção chegaram a ser acoplados na formação de um elo do manipulador para que novos experimentos fossem realizados com o sistema completo. Contudo, a partir do momento em que tomou-se conhecimento da existência de músculos similares vendidos comercialmente, por se tratar de um produto já confiabilizado, o projeto voltou-se para a elaboração de mecanismos que permitissem o acoplamento desses músculos na formação do elo do manipulador.

A partir desta etapa, deu-se início a construção dos protótipos. Cada elo é formado pela junção de três atuadores pneumáticos, resultando em um sistema com 3 graus de liberdade em sua extremidade, sendo apenas 2 deles com grande mobilidade. A evolução dos protótipos é descrita através de gerações. O desempenho das gerações era avaliado segundo alguns critérios estabelecidos. Foi avaliado o menor raio de curvatura conseguido com o protótipo através da inserção da maior pressão que estivesse dentro da faixa utilizada nos experimentos. O teste do menor raio era feito para a pior condição, com o protótipo suspenso, recebendo a ação da gravidade. Quanto menor fosse o raio de curvatura obtido, melhor seria a performance do protótipo. Um outro critério utilizado para qualificar um protótipo era com relação à sua integridade mecânica e técnicas de montagem. Protótipos que não apresentassem repetibilidade e robustez durante os experimentos eram modificados e aprimorados. Foram analisados diferentes mecanismos para acoplar os atuadores. O mecanismo (espaçador) que melhor se adequou aos músculos utilizados foi constituído a partir de mangueiras siliconadas intercaladas. Por ser flexível e ao mesmo tempo contínuo ao longo de todo o comprimento do manipulador, este tipo de espaçador permitia a expansão radial e a contração longitudinal dos músculos, fazendo com

que a posição relativa dos mesmos permanecesse inalterada. O sistema foi reforçado com uma mangueira externa flexível que contribuiu para o aumento da rigidez à torção do manipulador, servindo também como proteção da parte interna com relação ao meio externo. Os melhores resultados foram obtidos utilizando-se uma mangueira de PVC reforçada com um fio de aço cobreado. Das mangueiras testadas, esta foi a que menos restringiu a movimentação do sistema por conta de sua flexibilidade, contribuindo também positivamente para o aumento da rigidez do manipulador. Os principais problemas de cada geração foram comentados e aprimoramentos foram realizados nas gerações seguintes.

A partir do desenvolvimento de um protótipo final que apresentasse características de acordo com objetivos traçados, experimentos foram realizados com o objetivo de analisar aspectos da sua movimentação e de mensurar o posicionamento da sua extremidade. Foram incorporadas ao sistema servo-válvulas pneumáticas que garantiram o controle das pressões inseridas em cada atuador do elo. Um programa utilizando a plataforma *LabView* foi implementado para fornecer os sinais de controle para as servo-válvulas. Foi elaborado um modelo cinemático estático do protótipo final e os resultados obtidos foram comparados aos resultados experimentais, resultando em previsões com erros máximos de posicionamento de menos de 6%.

Finalmente, foi apresentada uma aplicação do sistema em inspeção de reservatórios de combustíveis. O sistema pode ser adaptado para a realização de inspeções visuais no interior de tanques de combustível cheios, em operação. Os tipos de tanques existentes foram apresentados para que se pudesse avaliar em quais tanques seria possível realizar uma inspeção com o manipulador em questão. Dentre os tipos de tanques existentes, o sistema poderia ser aplicado à tanques atmosféricos de teto fixo, sendo este suportado ou autoportante, e tanques de postos de serviço. Devido ao fato do sistema em questão ser extremamente versátil, com uma estrutura modular, podendo ser aplicado com diversos tipos de funcionalidades, outras possíveis soluções foram referenciadas e as vantagens do sistema proposto foram comentadas.

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Alguns aspectos envolvendo a construção do manipulador robótico flexível, assim como aprimoramentos da modelagem do sistema, podem ser sugeridos visando um melhor desempenho do manipulador.

No desenvolvimento mecânico do protótipo, foram dadas soluções para a fixação das extremidades dos músculos. Esta fixação é um fator muito importante e que influencia diretamente na movimentação do elo. A incorporação de acessórios de apoio para serem acoplados na base e na extremidade do elo tornariam a montagem mais simples, modular e evitariam que houvesse uma movimentação relativa entre os músculos. Um aprimoramento da construção do espaçador do elo também faria com que os erros e vícios provocados por imperfeições resultantes do processo de montagem fossem diminuídos. É importante que o espaçador seja construído de forma simétrica para evitar tendências de movimentos do manipulador. No ANEXO encontram-se algumas sugestões com melhoramentos dessas estruturas.

A partir do desenvolvimento de acessórios para a base e para a extremidade do elo, será possível a inclusão de mais elos com o objetivo de se obter mais graus de liberdade em sua extremidade. Com a inclusão de mais elos, novos testes terão que ser realizados para comprovar a funcionalidade de um sistema com um comprimento maior.

O desenvolvimento do modelo analítico do músculo MAS da FESTO pode contribuir para um melhor entendimento e aperfeiçoamento do modelo do elo. A inclusão do efeito da atadura elástica no revestimento do elo também contribuiria significativamente para a diminuição do erro relacionado à previsão do posicionamento da extremidade do sistema. Outras contribuições que podem ser feitas no modelo analítico são a inclusão dos efeitos de gravidade e empuxo.