



DEM - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE MOVIMENTOS VERTICAIS COM ATUAÇÃO PNEUMÁTICA

*Allan Nogueira de Albuquerque¹,
Marco Antonio Meggiolaro².*



¹ Aluno de Graduação do curso de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

² Eng. Mecânico, Ph.D., Professor Assistente do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	3
2. OBJETIVOS.....	6
3. METODOLOGIA / RESULTADOS.....	6
4. CONCLUSÕES / TRABALHOS FUTUROS.....	17
AGRADECIMENTOS.....	19
REFERÊNCIAS.....	20

1. INTRODUÇÃO

O projeto baseia-se no desenvolvimento de um robô paralelo controlado eletronicamente através de servo-válvulas eletro-pneumáticas. O equipamento em questão é conhecido como Plataforma Stewart. Esta plataforma foi originalmente desenvolvida em 1965 como um simulador de vôo. Desde então, uma vasta variedade de aplicações se utilizam deste invento. Isto porque produz uma melhor atuação, maior rigidez, maior razão carga-peso e uma distribuição de carga mais uniforme. Basicamente, ela é usada no controle de posicionamento e é constituída de uma base fixa acoplada em seis pontos a um platô móvel na parte superior através de cilindros pneumáticos, ou seja, é uma estrutura articulada acionada por seis atuadores lineares.

Estes robôs paralelos são definidos como um dispositivo multifuncional e reprogramável projetado para mover e manipular materiais, partes ou ferramentas através de movimentos programados para a realização de uma variedade de tarefas especificadas. Um robô paralelo é composto por uma cadeia cinemática fechada, na qual cadeias seriais separadas se conectam a uma plataforma fixa e, em sua extremidade oposta, se conectam a uma plataforma móvel. Também são chamados de manipuladores.

Este tipo de manipulador apresenta grandes vantagens quando comparado aos manipuladores seriais, como melhor estabilidade e precisão, capacidade de manipular cargas relativamente grandes, altas velocidades e acelerações e baixa força de atuação.

O desenho dos manipuladores paralelos se remonta há várias décadas atrás, em 1962, quando Gough e Withehall desenharam um sistema paralelo para ser usado em uma máquina de provas universais. Stewart em 1965 projetou um manipulador de plataforma para ser usado em simuladores de vôo. Em 1983 Hunt realizou um estudo da estrutura cinemática dos manipuladores paralelos. Desde então vão se desenrolando inúmeros estudos por diversos pesquisadores. Entre os mais recentes se destacam J.P. Merlet e L.W. Tsai.

A figura 1.1a abaixo mostra o primeiro simulador de vôo com uma estrutura de seis graus de liberdade e a figura 1.1b mostra um robô paralelo empregado na montagem de peças, também com seis graus de liberdade.

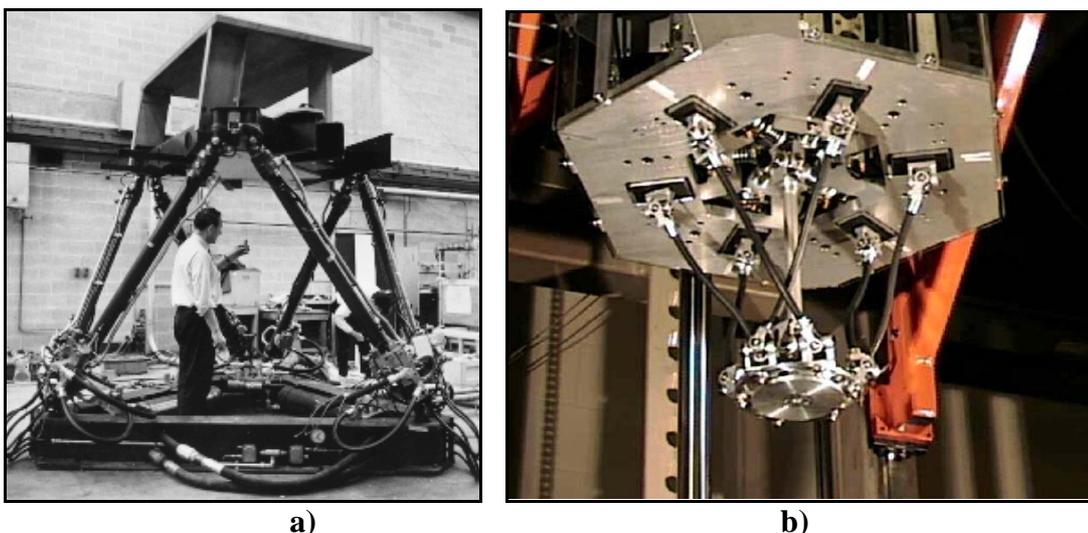


Figura 1.1 Exemplos de robôs paralelos baseados na plataforma de Stewart. a) Simulador de vôo; b) Robô montador.

Existem outras configurações de plataforma, como a Delta, com três graus de liberdade. Foi inventada por Clavel em 1988 e é usada em robôs como os mostrados na figura 1.2.

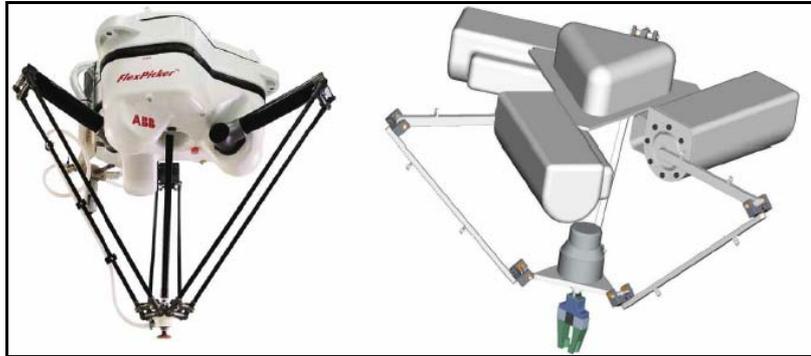


Figura 1.2 Robôs paralelos de quatro graus de liberdade, baseados na plataforma Delta.

Um limitante importante que existe nestes manipuladores (tipo Delta) é seu reduzido espaço de trabalho, sendo este uma das tendências nos rumos das pesquisas futuras destes robôs.

Os manipuladores paralelos podem ser classificados como planares, esféricos e espaciais, de acordo com as características de movimento. Na figura 1.3 pode-se distinguir esta classificação.

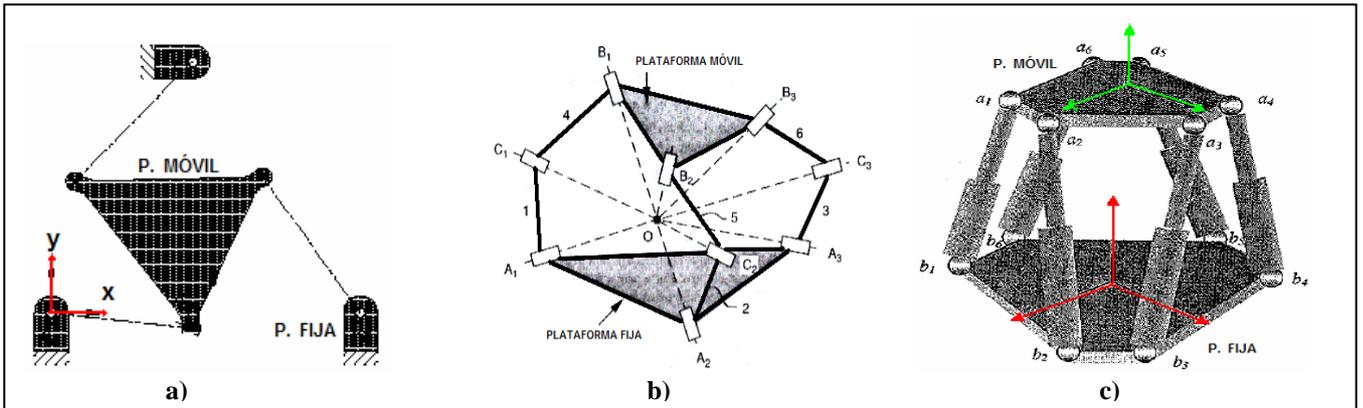


Figura 1.3 Classificação de robôs paralelos de acordo com seus movimentos: a) planar; b) esférico; c) espacial.

Também podem se classificar de acordo com suas características estruturais como simétricos e assimétricos. Um manipulador paralelo é chamado de simétrico se segue as seguintes condições: O número de encadeamentos deve ser igual ao número de graus de liberdade da plataforma móvel; o tipo e número das articulações em todos os encadeamentos devem estar fixos em um modelo idêntico; o número e a localização das articulações e dos atuadores devem ser os mesmos. Quando as condições mencionadas não se cumprem, o manipulador é chamado assimétrico. Pode-se observar então que nos robôs paralelos simétricos o número de encadeamentos, m , é igual ao número de graus de liberdade F , cujo qual é igual ao número total de cadeias cinemáticas, L . Isto pode se expressar como $m=F=L$.

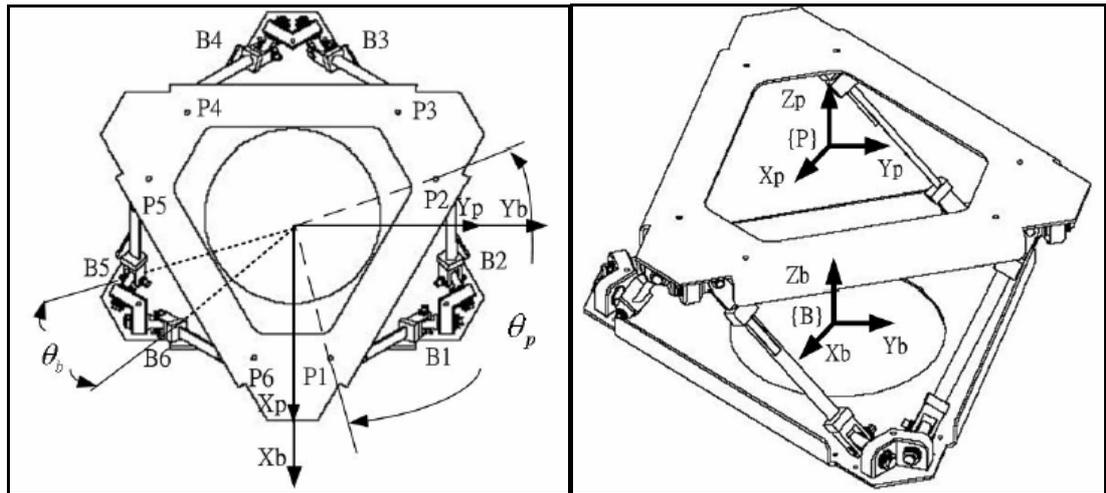


Figura 1.4 Posição e orientação das juntas na Plataforma Stewart.

Sistemas pneumáticos como o usado no desenvolvimento da Plataforma Stewart em questão, são constituídos pelos seguintes elementos:

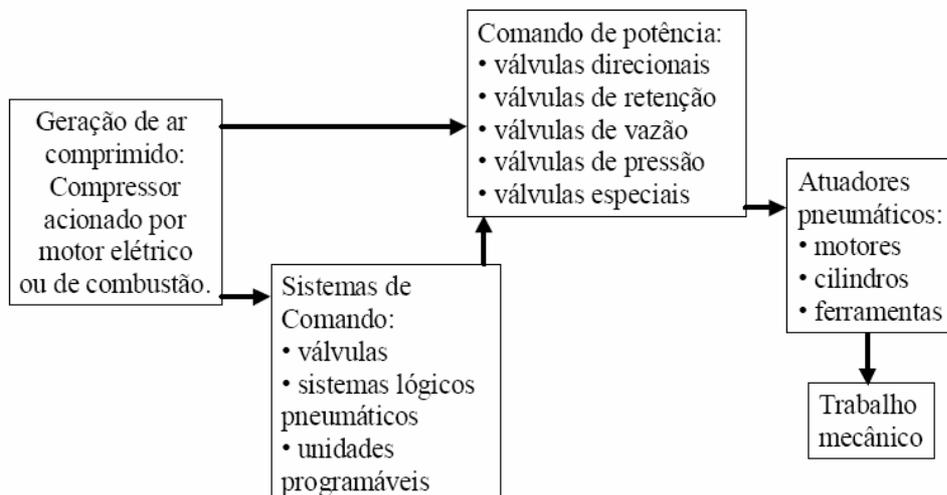


Figura 1.5 Elementos de um sistema de acionamento pneumático.

Os sistemas de comando são os responsáveis por controlar o atuador pneumático mediante a informação dos sensores. Pode consistir num microcomputador, por exemplo. Já o sistema de comando de potência converte os sinais recebidos do sistema de comando em sinais de níveis de energia para acionar os atuadores.

Entre as vantagens da utilização do ar comprimido, temos: facilidade de obtenção (volume “ilimitado”); não apresenta riscos de faísca em atmosfera explosiva; fácil armazenamento; não contamina o ambiente (sistema limpo e atóxico); não necessita de linhas de retorno (escape para a atmosfera), ao contrário de sistemas elétricos e hidráulicos; acionamentos podem ser sobrecarregados até a parada.

No entanto, o ar apresenta vapor d’água (umidade). Esse vapor pode se condensar ao longo da linha pneumática dependendo das condições de pressão e temperatura ao longo da linha. Se não houver um sistema para retirar a água, ela pode se acumular causando corrosão das tubulações.

O ar apresenta também uma baixa viscosidade. Um fluido que tem baixa viscosidade pode escoar por pequenos orifícios e, portanto a chance de ocorrer vazamentos é muito grande. Assim, vazamentos de ar em linhas pneumáticas são muito comuns.

Os equipamentos pneumáticos (principalmente as válvulas) são constituídos de mecanismos muito delicados e sensíveis e para que possam funcionar de modo confiável, com bom rendimento, é necessário assegurar determinadas exigências de qualidade do ar comprimido, entre elas: pressão; vazão; teor de água; teor de partículas sólidas; teor de óleo.

As grandezas de pressão e vazão estão relacionadas diretamente com a força e velocidade, respectivamente, do atuador pneumático. Cada componente pneumático tem sua especificação própria de pressão e vazão de operação. Para atender a essas especificações é necessária suficiente vazão no compressor, correta pressão na rede e tubulação de distribuição corretamente dimensionada em função da vazão. Já água, óleo e impurezas têm grande influência sobre a durabilidade e confiabilidade de componentes pneumáticos. O óleo em particular é usado para lubrificar os mecanismos dos sistemas pneumáticos. Dependendo da aplicação as exigências do ar com relação à água, óleo e impurezas são diferentes.

2. OBJETIVOS

Com o objetivo de motivar os alunos está sendo desenvolvida para o Laboratório de Engenharia de Controle e Automação uma série de equipamentos para testes, avaliação e experimentação comuns em veículos reais, mas nesse caso em escala reduzida, empregando os mesmos conceitos básicos e dispositivos dos equivalentes em tamanho real. Logo, o objetivo deste trabalho é desenvolver um equipamento com atuação pneumática e controle digital a ser empregado para testes e demonstrações no Laboratório de Engenharia de Controle e Automação. Tal equipamento, o simulador, é um sistema mecatrônico que reproduz as principais atitudes e movimentos de um veículo, comandado pelos mesmos elementos do sistema real.

Sobre a plataforma propriamente dita é montada a cabine ou carroceria do veículo, dentro da qual o piloto (ou motorista) comanda o sistema e, deste modo, tem as mesmas sensações de estar controlando o veículo real, sem riscos ou temor de acidentes. O mecanismo articulado, com 6 graus de liberdade, é capaz de reproduzir os três ângulos de atitude - rolagem, arfagem e guinada - e os deslocamentos lineares - lateral, vertical e longitudinal - com limitações, porém com amplitude suficiente de modo a possibilitar as principais sensações associadas ao veículo real em condições normais de operação e até em algumas situações consideradas de risco, como a perda de sustentação em aeronaves, ou o início da capotagem em veículos terrestres.

3. METODOLOGIA / RESULTADOS

Inicialmente foi estudado o sistema de monitoramento e controle de um conjunto válvula-atuador pneumático-transdutor já desenvolvido e disponível no laboratório (figura 3.1) e as arquiteturas comumente empregadas nos simuladores de movimento.



Figura 3.1 Conjunto válvula-atuador pneumático-transdutor já desenvolvido.

Com base nos atuadores deste conjunto, foi realizado um projeto para a plataforma utilizando o software *SolidWorks*, um programa de modelagem tridimensional (figura 3.2). Com esta ferramenta pôde-se observar o comportamento geométrico e cinemático da plataforma.

Em seguida o protótipo foi construído. O topo, a base e a parte interna de cada atuador foram feitos em madeira. A parte externa dos atuadores foi feita com tubos de PVC e as juntas usadas são de plástico com elementos de ligação metálicos. Também foram usados parafusos com porcas borboletas para formar o elemento de fixação de cada atuador no protótipo, que se encontra no Laboratório de Engenharia de Controle e Automação (figura 3.2).

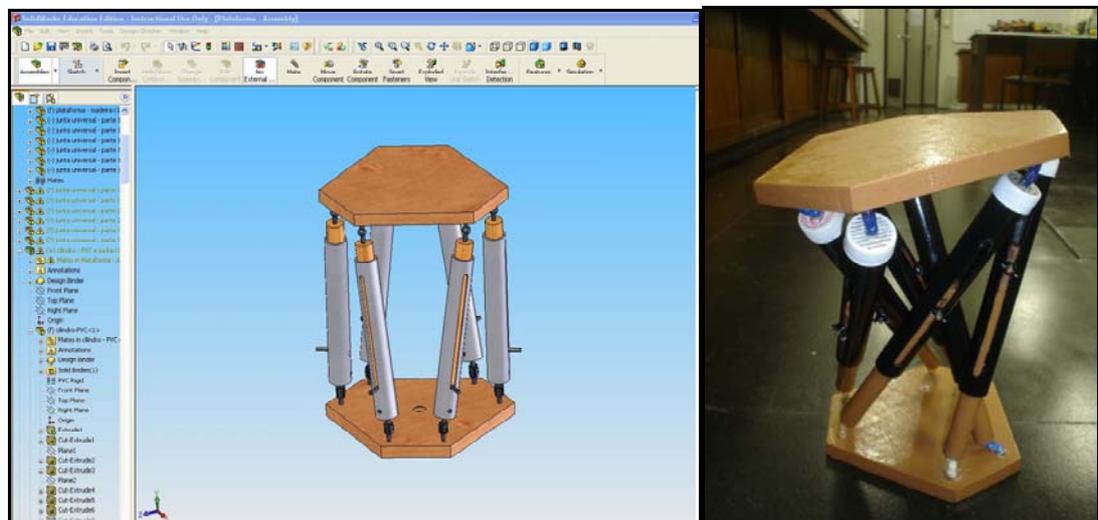


Figura 3.2 Protótipo virtual e protótipo da Plataforma Stewart construído.

Também foi feito um projeto da Plataforma Stewart utilizando o conjunto válvula-atuador pneumático-transdutor anteriormente citado. A figura 3.3 mostra o desenho tridimensional do projeto.

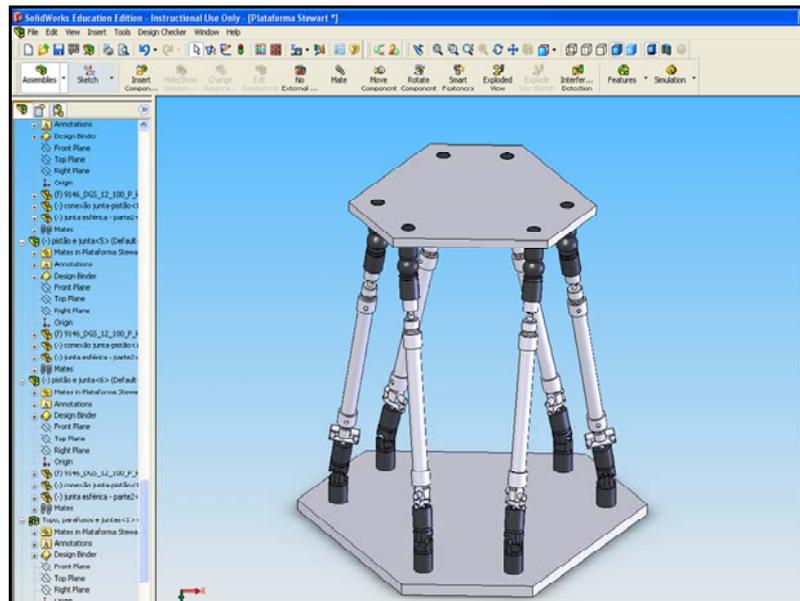


Figura 3.3 Modelo de Plataforma Stewart.

Uma vez estudado o sistema composto por válvula-atuador, um novo conjunto de atuadores e válvulas foi adquirido para ser estudado, a fim de se conhecer suas capacidades de posicionamento e resposta a frequências diferentes. O conjunto adquirido é semelhante ao mostrado na figura 3.4. Assim, construiu-se uma bancada que está disponível no laboratório (figura 4.1).

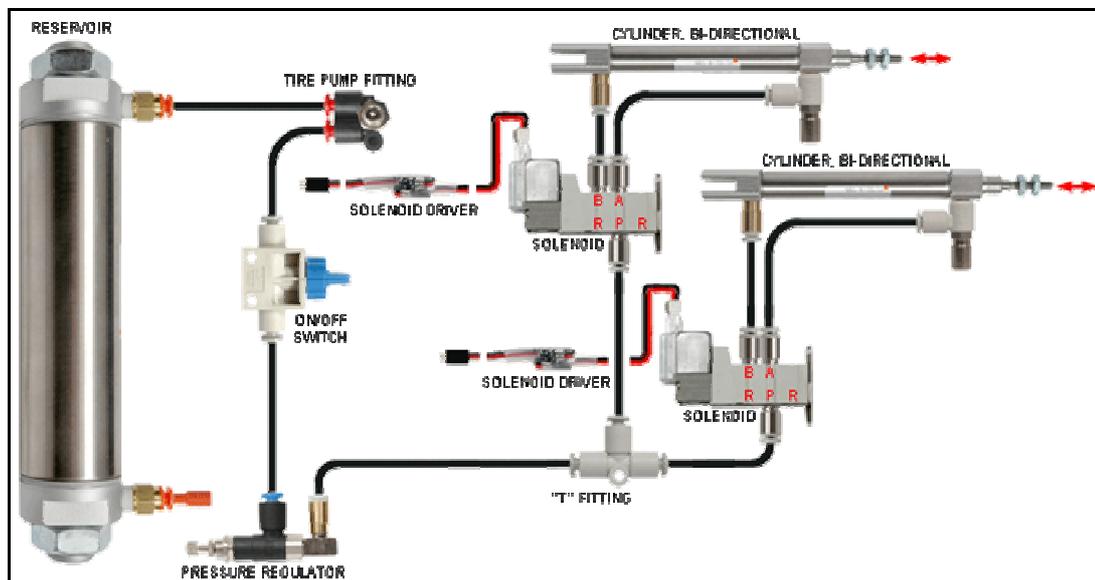


Figura 3.4 Conjunto adquirido.

Nos atuadores (produzidos pela SMC), a pressão máxima de trabalho é 100 psi, com diâmetro do êmbolo de 10 mm, curso de 50 mm e força máxima aplicável de 54 N (5,51 kgf).

A figura 3.5 descreve esse tipo de atuador juntamente com o seu símbolo e características construtivas. A atuação é feita por ar comprimido nos dois sentidos. Entre as suas características temos: atuação de força nos dois sentidos, porém com força de avanço maior do que a de retorno; não permite cargas radiais na haste. O curso não pode ser muito grande, pois surgem problemas de flambagem.

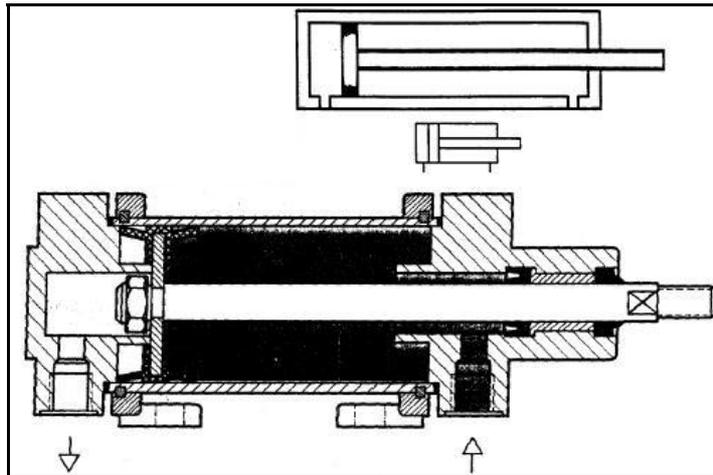


Figura 3.5 Cilindro de dupla ação.

A válvula reguladora de pressão (*pressure regulator*) tem a função de manter constante a pressão no equipamento. Ela somente funciona quando a pressão a ser regulada (pressão secundária) for inferior que a pressão de alimentação da rede (pressão primária). Assim essa válvula pode reduzir a pressão, mas jamais aumentá-la. A figura 3.6 descreve uma válvula reguladora juntamente com o seu símbolo.

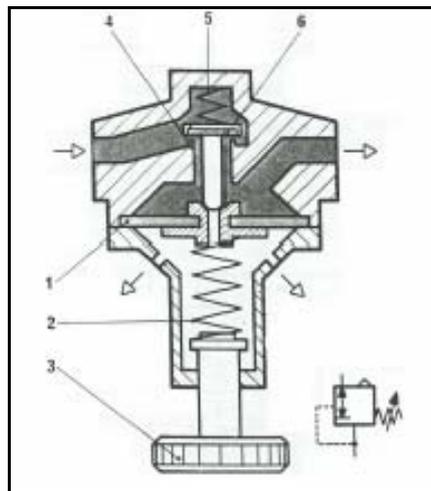


Figura 3.6 Válvula reguladora de pressão.

O seu funcionamento ocorre da seguinte forma. Se a pressão secundária diminui em relação a um valor especificado a mola 2 empurra o êmbolo 6 que abre a comunicação com a pressão primária. Se a pressão secundária aumenta, em relação a um valor especificado (por exemplo, devido a um excesso de carga no atuador) então a membrana 1 é atuada pressionando a mola 2 e o êmbolo 6 fecha a comunicação até que a pressão secundária diminua. Se a pressão secundária aumentar demais, então além de ocorrer a situação anterior, a membrana 1 se separa do êmbolo 6, abrindo a comunicação com os furos de exaustão, ocorrendo o escape de ar, o que reduz a pressão secundária. O parafuso 3 permite regular a rigidez da mola 2 e, portanto, a pressão secundária.

As válvulas direcionais (solenóides) têm a função de comandar a partida, a parada e o sentido de movimento do atuador.

Neste sistema, as válvulas solenóides (eletromecânicas) são comandadas por um micro-controlador, uma placa onde a rotina de programação era praticada. A esta placa associava-se um programa da *VEX* (o software *EasyC*) no qual os programas são implementados, compilados e “baixados” para a placa, que por sua vez, transmite as informações diretamente para a válvula através de interface apropriada. O sistema é alimentado por um compressor (uma adaptação feita com um compressor de geladeira – figura 3.7) que o alimenta com uma pressão que oscilava em torno de 60 psi.

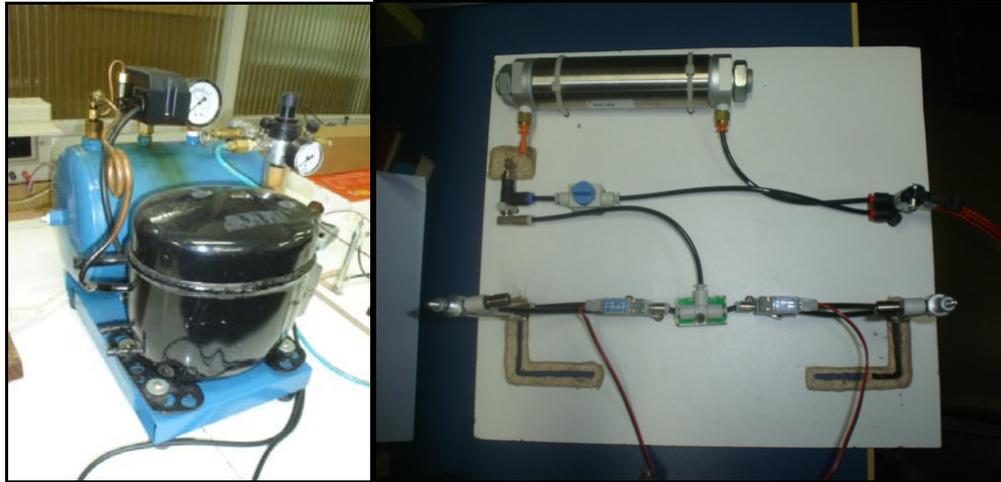


Figura 3.7 Compressor utilizado para alimentar o sistema e bancada para testes do sistema válvula-atuador.

Este software tinha como base de programação a linguagem computacional C e, depois de implementados vários tipos de programas, pôde-se aferir as propriedades do sistema pneumático em questão. Primeiramente, foi desenvolvido um programa para simplesmente testar o funcionamento da válvula.

Vários tipos de testes foram realizados. Um deles foi o teste de reposta a diversas frequências, variando de 1 a 60 Hz. Com estes testes pôde-se observar a variação máxima de amplitude do atuador com o aumento da frequência, para assim poder projetar suas condições ideais de uso. Outro programa realizado possibilitou o controle dos atuadores através de um controle remoto, também da *VEX* (figura 3.8). Um último programa compilado com esta ferramenta utiliza os vários canais do controle remoto para fazer com que os atuadores elaborem diferentes funções.

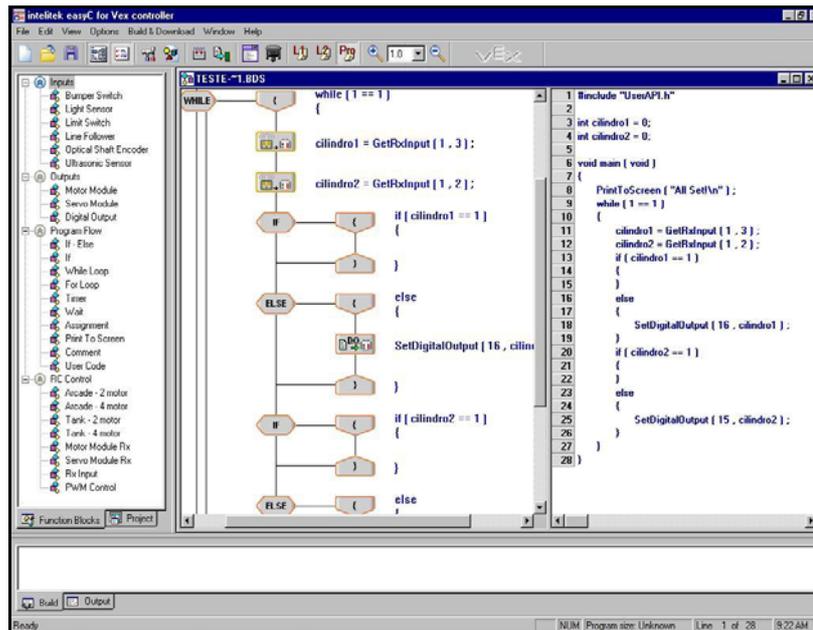


Figura 3.8 Programa para controle da válvula através de um controle remoto VEX.

Em paralelo com o estudo do sistema pneumático, realizou-se o desenvolvimento do projeto da plataforma em um ambiente virtual de modelagem tridimensional. O software utilizado foi o *SolidWorks*. Com os resultados obtidos nos testes com o sistema pneumático, foram escolhidos e modelados os componentes necessários para se construir o equipamento usando a modelagem tridimensional. Usando esta modelagem tridimensional pôde-se construir o aparato em ambiente virtual e testá-lo, quanto a seus graus de liberdade e quanto aos limites de sua geometria (figuras 3.9 e 3.10).

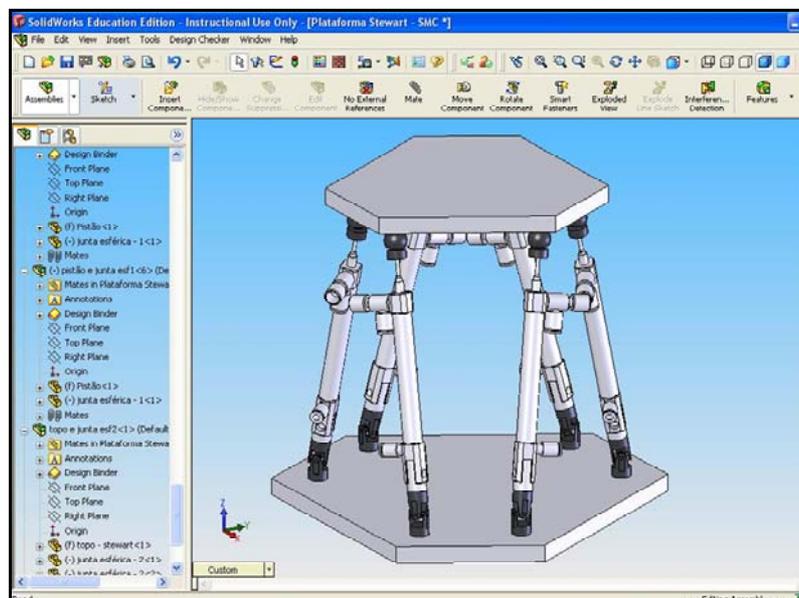


Figura 3.9 Plataforma Stewart utilizando atuadores SMC.

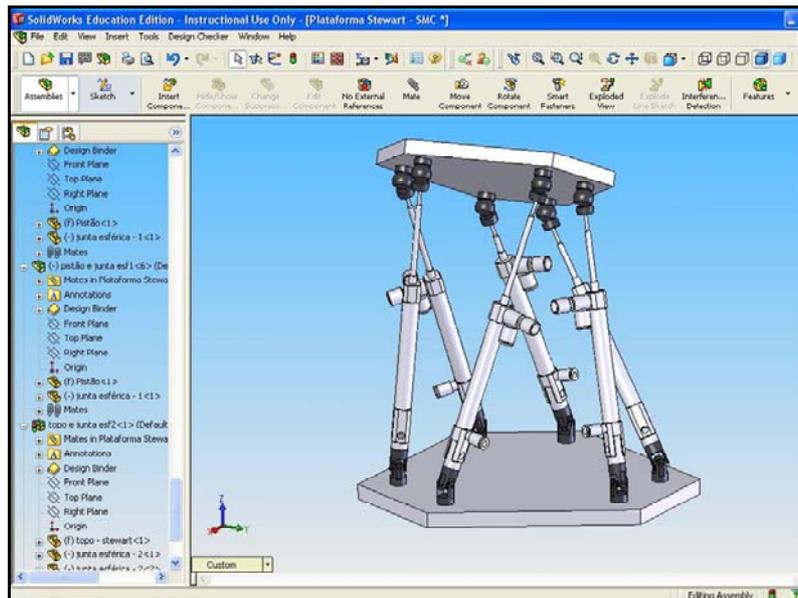


Figura 3.10 Plataforma Stewart utilizando atuadores SMC (movimento angular).

Para realizar este modelo, cada peça precisou ser modelada separadamente, tais como o topo, a base, cada uma das partes móveis das juntas universais e esféricas, os parafusos e outras peças de acoplamento, o corpo do atuador e seu cilindro.

Também se fez um projeto de um simulador vertical para sistemas de suspensão veicular em escala. Este simulador vertical também segue a linha dos robôs paralelos, porém, este consiste em quatro atuadores com apenas um grau de liberdade posicionados de forma a se conectar com as rodas do veículo a ser testado. Cada atuador fica preso a uma roda e, através de válvulas eletro-mecânicas, suas posições são controladas, possibilitando assim a simulação de diversos tipos de terrenos e situações num veículo em escala (figuras 3.11).

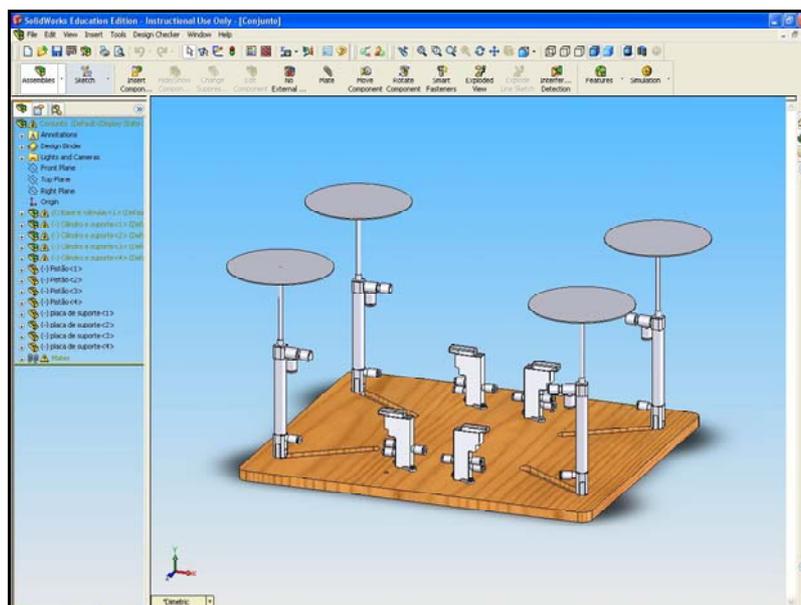


Figura 3.11 Simulador Vertical utilizando válvulas e atuadores SMC.

Em seguida foi estudado o programa *LabView* para desenvolver rotinas de controle e monitoramento do simulador, substituindo o *EasyC*, por se tratar de um programa mais

completo e que atende melhor as especificações para o controle da plataforma de simulação. Para controlar a plataforma utilizando este programa, foram adquiridas placas de aquisição de dados da NI (*National Instruments*), que têm uma função similar a do micro-controlador anteriormente usado. Neste sistema, dois tipos de placas foram utilizados: placas de recepção (aquisição) e de emissão de dados.

Como a válvula usada funciona apenas com entradas digitais, ou seja, recebe apenas comandos de aberto ou fechado em cada uma de suas vias para controlar a posição do pistão, a placa de emissão (NI 9476) é digital. Possui 32 canais, para assim enviar sinais para cada um dos dois lados das seis válvulas usadas na Plataforma Stewart e mais as quatro da Plataforma Vertical. Esta saída é de 24 V, pois é esta a tensão de trabalho da válvula. Esta válvula tem um período de envio de dados de 500 μ s.

Já na aquisição de dados, serão obtidos dados de potenciômetros lineares (LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*). Os LVDT são sensores para medição de deslocamento linear. O funcionamento de este sensor é baseado em três bobinas e um núcleo cilíndrico de material ferromagnético de alta permeabilidade. Ele dá como saída um sinal linear, proporcional ao deslocamento do núcleo, que está fixado ou em contato com o que se deseja medir. A bobina central é chamada de primária e as demais são chamadas de secundárias. Para esta medição, uma corrente alternada é aplicada na bobina primária, fazendo com que uma tensão seja induzida em cada bobina secundária proporcionalmente à indutância mútua com a bobina primária. A frequência da corrente alternada está geralmente entre 1 e 10 kHz. De acordo com a movimentação do núcleo, esta indutância mútua muda, fazendo com que as tensões nas bobinas secundárias mude também.

As bobinas são conectadas em série reversa. Com isso a tensão de saída é a diferença entre as duas tensões secundárias. Quando o núcleo está na posição central, equidistante em relação às duas bobinas secundárias, tensões de mesma amplitude, porém opostas são induzidas nestas duas bobinas, assim, a tensão de saída é zero. Quando o núcleo é movimentado em uma direção a tensão em uma das bobinas secundárias aumenta enquanto a outra diminui, fazendo com que a tensão aumente de zero para um máximo. Esta tensão está em fase com a tensão primária.

Quando o núcleo se move em outra direção, a tensão de saída também aumenta de zero para um máximo, mas sua fase é oposta à fase primária. A amplitude da tensão de saída é proporcional à distância movida pelo núcleo (até o seu limite de curso), sendo por isso a denominação "linear" para o sensor. Assim, a fase da tensão indica a direção do deslocamento.

Como o núcleo não entra em contato com o interior do tubo, ele pode mover-se livremente, quase sem atrito, fazendo do LVDT um dispositivo de alta confiabilidade. Além disso, a ausência de contatos deslizantes ou girantes permite que o LVDT esteja completamente selado das condições do ambiente.

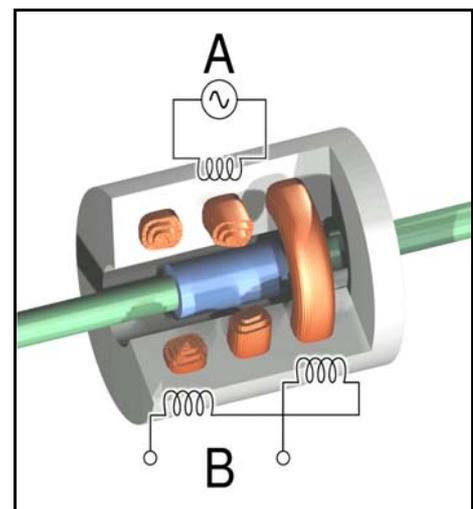


Figura 3.12 LVDT.

Para adquirir estes dados, serão usadas placas com entradas de sinal analógico (NI 9205), uma vez que a posição da haste do pistão é uma variável contínua. Serão 32 canais

independentes ou 16 diferenciais, 16 bits de resolução, com tensões de ± 10 V (valores máximo e mínimo, podendo-se trabalhar dentro desta faixa) e taxa de amostragem de 250kS/s.



Figura 3.13 Placas NI adquiridas para o controle da plataforma (NI 9205 a esquerda e NI 9476 a direita).



Figura 3. Sistema de controle montado ao chassis.

O circuito analógico para tratar o sinal a ser enviado usado com o sensor para captar o sinal do cilindro é mostrado na figura 3.14.

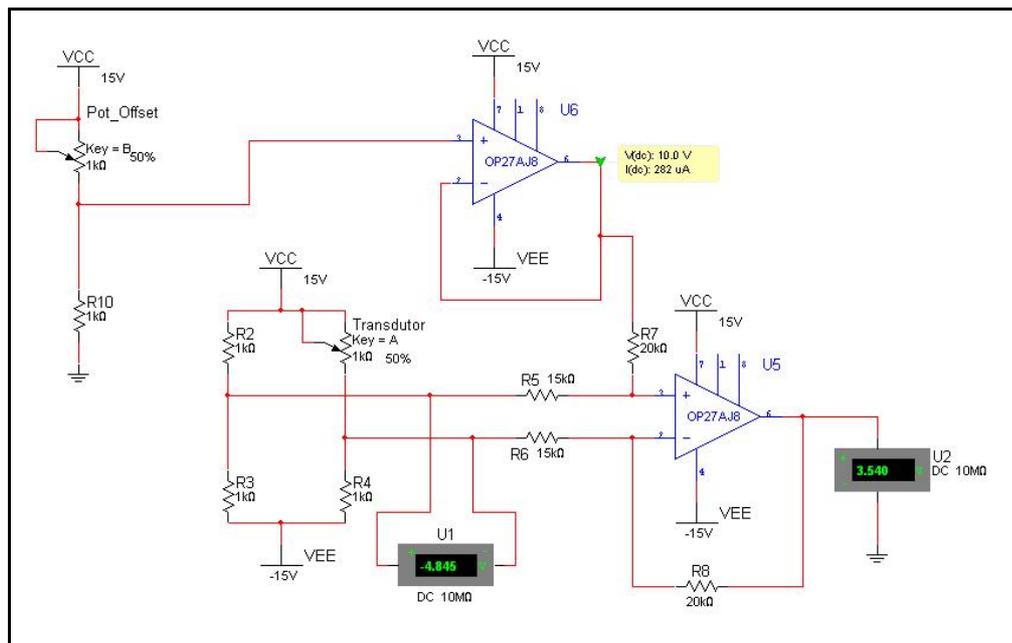


Figura 3.14 Circuito para tratamento do sinal de entrada.

O potenciômetro será colocado em uma ponte de Wheatstone e os terminais da ponte ligados em um amplificador operacional setado em função diferencial de ganho 1,33.

O sinal que deve entrar na placa de aquisição de dados usada deve variar entre 10 e -10 Volts para aproveitarmos a maior resolução possível. Para isso precisamos de uma alimentação de no mínimo $V_{cc} = +10V$ e $V_{ee} = -10V$. Porém, como provavelmente não iremos utilizar amplificadores *Rail-to-Rail*, usaremos $V_{cc} = +15V$ e $V_{ee} = -15V$.

Para o melhor funcionamento da ponte de Wheatstone, os resistores que a completam (R2, R3 e R4) deverão ter a mesma resistência do potenciômetro a ser usado como sensor. O amplificador operacional *U6* dará um ganho de Offset no sistema definido pelo potenciômetro *Pot_offset*.

Junto a isto, foram construídas as plataformas projetadas. Estas plataformas são feitas em aço, fenolite e outros materiais, como os plásticos usados nas juntas universais. As duas plataformas (a Stewart e a Plataforma Vertical, com três graus de liberdade) estão no LECA, como proposto. Para estas plataformas, foram adquiridas novas válvulas solenóides 5/3 vias (5 conexões e 3 posições) com posição central bloqueada para melhorar seu controle e posicionamento.

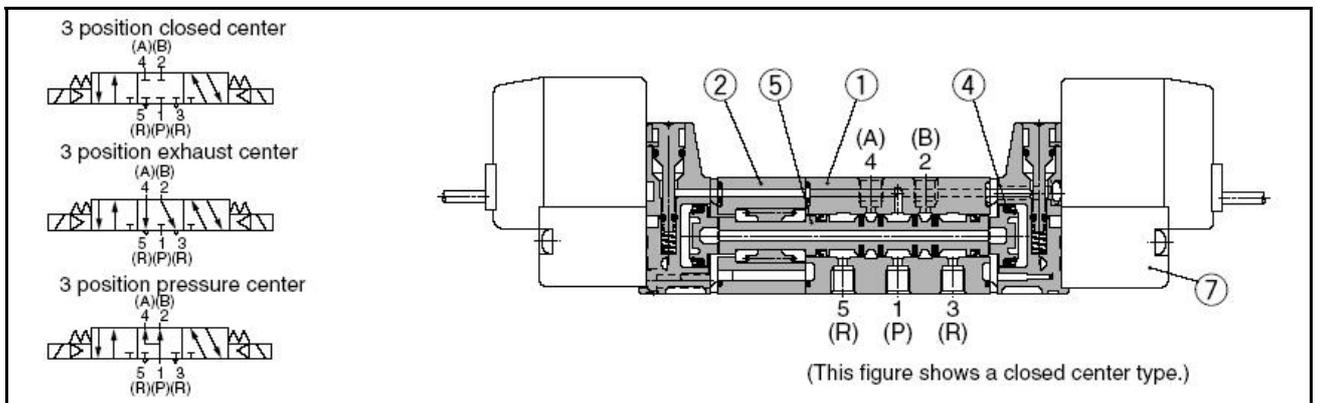


Figura 3.15 Válvula 5/3 vias com centro fechado SMC.

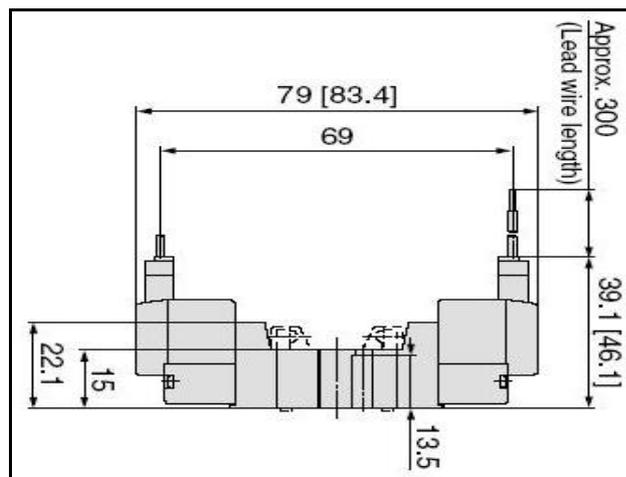


Figura 3.16 Válvula 5/3 vias - dimensões.

Os circuitos pneumáticos da Plataforma Stewart e da Plataforma Vertical, ficaram como mostrados nas figuras 3.17 e 3.18. A numeração dos componentes segue o seguinte padrão: os elementos atuadores recebem seus números na seqüência 1.0, 2.0, *et cetera*. Para as

válvulas, o primeiro número está relacionado a qual elemento de trabalho elas influem . No caso, como são válvulas de comando, que acionam diretamente o pistão, recebem o número 1 a direita do ponto. Para os elementos de regulação, o número a direita do ponto é um número par maior que zero. Para os elementos de alimentação o primeiro número é 0 e o número depois do ponto corresponde à seqüência com que eles aparecem.

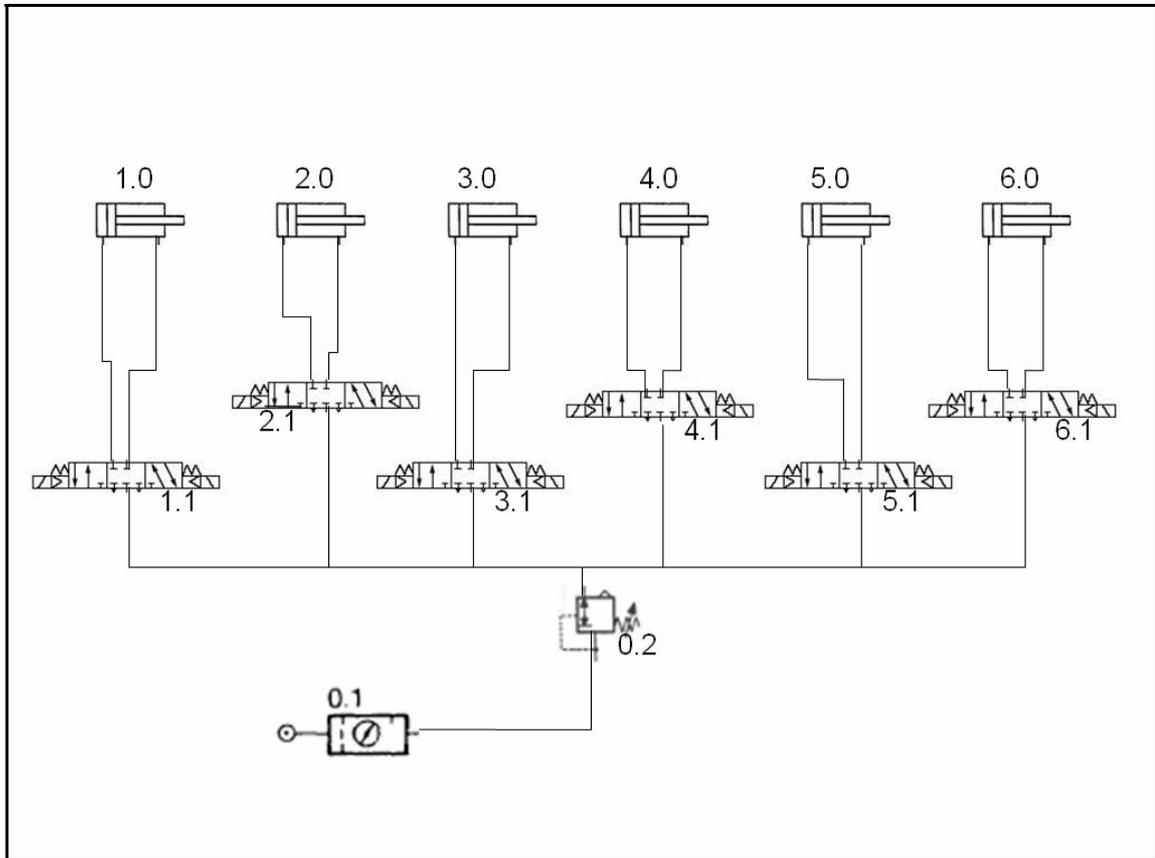


Figura 3.17 Circuito pneumático da Plataforma Stewart.

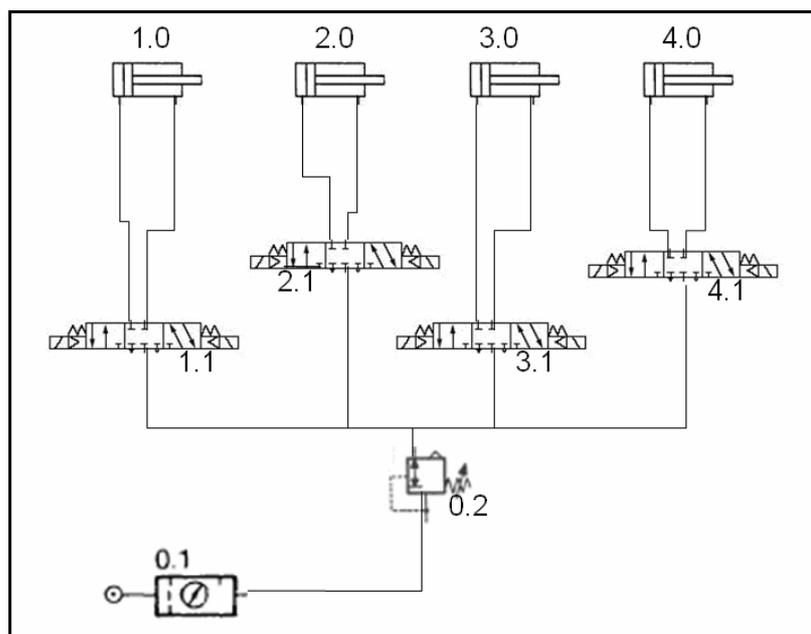


Figura 3.18 Circuito pneumático da Plataforma Vertical.

Para testar a movimentação da Plataforma Stewart, um VI (*Virtual Instrument*) foi feita no *LabView* (figura 3.19).

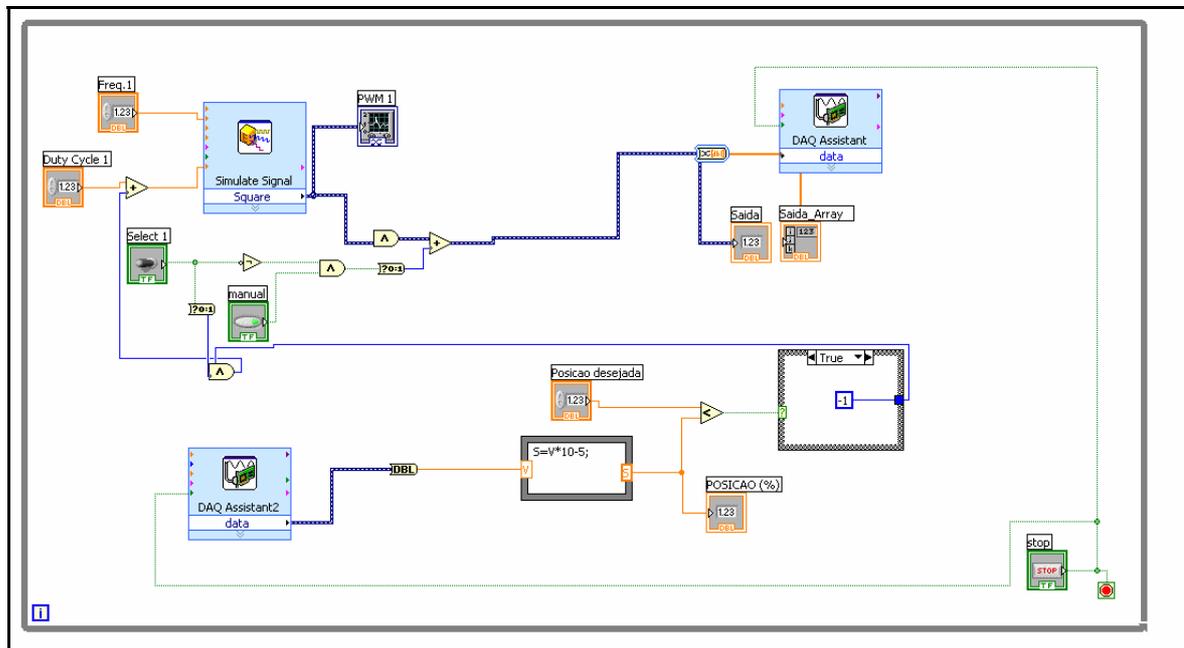


Figura 3.19 VI para testar a movimentação de cada cilindro (em malha fechada).

Deve-se ter dois *DAQ Assistant* – um para ler o sinal do circuito com o sensor de posição e outro para escrever nos atuadores o sinal com o comando a ser enviado às válvulas.

Um “*Case Structure*” deve ser montado para transferir o dado que vem do circuito de tensão para posição. Uma realimentação dessa informação deve chegar à lógica do PWM (*Pulse Width Modulation* – Modulação por largura de banda) fazendo assim a malha fechada do sistema.

4. CONCLUSÕES / TRABALHOS FUTUROS

Com esta parte do projeto concluída, o desenvolvimento segue para uma última etapa. Nesta próxima etapa a Plataforma Stewart será testada e avaliada. Também será projetada uma plataforma em tamanho real, para acomodar uma pessoa (piloto ou motorista, na simulação). As etapas iniciais geraram diversos equipamentos que podem ser usados para fins acadêmicos. Entre estes estão a bancada de teste do sistema de atuadores pneumáticos controlados por válvulas solenóides (figura 4.1), protótipo da plataforma em madeira e polímero (PVC, no caso) movida manualmente (figura 3.2), uma Plataforma Stewart em escala (figura 4.2) e uma Plataforma Vertical, que pode ser usada na análise de suspensões em carros em escala (1:8, no caso; figura 4.3). Todos estes se encontram no Laboratório de Engenharia de Controle e Automação (LECA).



Figura 4.1 Bancada de testes do sistema de atuadores pneumáticos.



Figura 4.2 Plataforma Stewart construída.

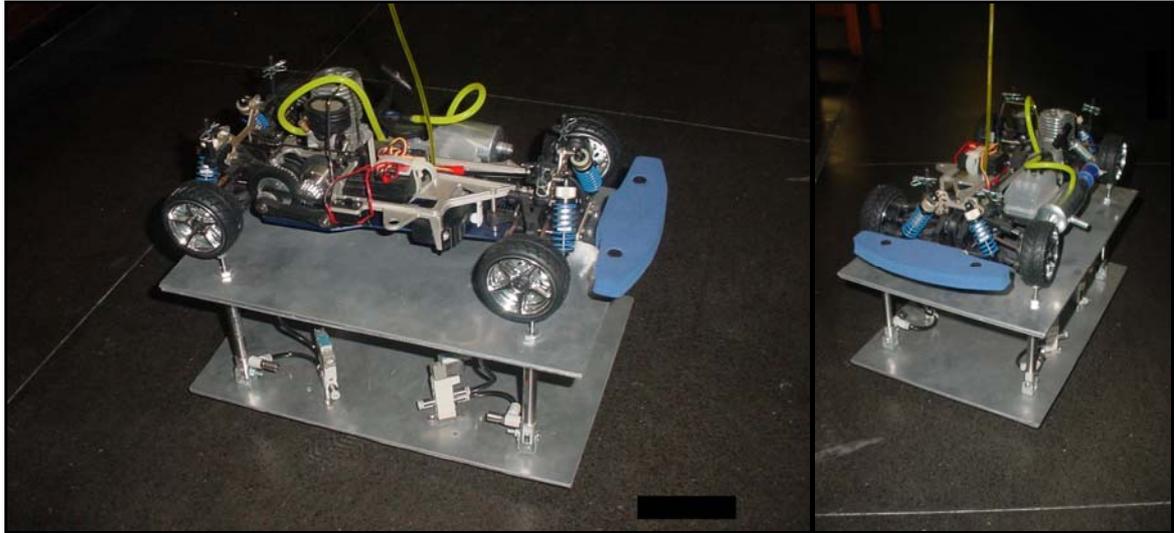


Figura 4.3 Plataforma Vertical construída.

AGRADECIMENTOS

O autor deste trabalho gostaria de agradecer ao CNPq, CAPES e FAPERJ pelo seu apoio financeiro, aos seus orientadores Mauro Speranza Neto e Marco Antonio Meggiolaro pelo apoio pedagógico e pela oportunidade, ao aluno Guilherme Moura e aos funcionários do ITUC – Instituto Tecnológico da Universidade Católica pelo apoio técnico.

REFERÊNCIAS

- LEBRET, G., LIU, K. e LEWIS, F. L. **Dynamic analysis and control of a Stewart platform manipulator.** J.Robot. Syst., vol. 10, no. 5, pp.629–655, 1993.
- GOUGH, V. E. e WHITEHALL, S. G. **Universal type test machine.** Em Proc.9th Int. Tech. Congress FISITA, 1962, pp. 117–137.
- Chin-I HUANG, Chih-Fu CHANG, Ming-Yi YU e Li-Chen FU. **Sliding-mode tracking control of the Stewart Platform.** Department of Electrical Engineering and Department of Computer Science and Information Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, R.O.C.
- SMITH, Natalie e WENDLANDT, Jeff. **Creating a Stewart Platform model using SimMechanics.** MATLAB Digest - Newsletters, The MathWorks.
- TAPIA, Benjamín Cortés e MÉNDEZ, Sergio Javier Torres. **Robot paralelo planar para ensamble.** División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Puebla, Maravillas, Col. (<http://www.itpuebla.edu.mx>)
- DASGUPTA, Bhaskar e MRUTHYUNJAYA, T. S. **The Stewart platform manipulator: a review.** Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur 208 016, Índia e Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore 560 012, Índia. Received 13 January 1998; accepted 18 December 1998. Available online 2 September 1999.
- VEX Robotics Inventor's Guide. Innovation One, Inc. TX, USA. 11/04.
- SPERANZA NETO, M. e DA SILVA, F. R. **Modelagem e análise de sistemas dinâmicos.** Julho de 2005.
- GHIRARDELLO, Ariovaldo. **Apostila sobre modulação PWM.** Curso Técnico em Eletrônica, Eletrônica industrial, Colégio Politec.
- NELLI SILVA, Emílio Carlos. **Apostila de pneumática – sistemas fluido mecânicos.** Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2002.
- BERTOTTI, Fabio L. **Apostila LVDT – Linear Variable Differential Transformer.** Laboratório BIOTA.