



## **O CONTROLE DE SISTEMAS MECÂNICOS**

### **Raul Guenther**

Laboratório de Robótica, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica. Caixa Postal 476 – 88040 – 900 – Florianópolis SC - email: guenther@emc.ufsc.br

***Resumo.** A realimentação é uma técnica muito antiga utilizada para modificar o comportamento de sistemas dinâmicos. Sua aplicação à máquina a vapor, um sistema mecânico, foi historicamente muito importante para a revolução industrial. Apresentam-se aqui alguns conceitos fundamentais e algumas aplicações com o objetivo de difundir a técnica.*

***Palavras-chave:** sistemas dinâmicos, controle*

### **1. INTRODUÇÃO**

Os sistemas mecânicos têm um comportamento dinâmico que depende da sua construção. Quando esse comportamento necessita ser modificado para atender algum requisito de desempenho, na engenharia mecânica, tradicionalmente, busca-se alterá-lo modificando seus aspectos construtivos. Assim, as dificuldades introduzidas pelo atrito, por exemplo, são contornadas alterando o acabamento das superfícies em contato, modificando o lubrificante ou introduzindo um elemento rolante entre as superfícies.

O comportamento dinâmico de um sistema mecânico pode também ser alterado a partir da obtenção (“em funcionamento”) de informações deste comportamento, do processamento dessas informações e da sua utilização para redefinir o funcionamento do sistema. Neste caso estará sendo feita uma *realimentação*.

O erro de posicionamento entre duas superfícies introduzido pelo atrito pode ser diminuído: **(i)** medindo a posição relativa alcançada pelas superfícies (informação “em funcionamento” sobre o comportamento), **(ii)** comparando-a com a posição desejada e calculando uma força proporcional ao erro entre as posições desejada e alcançada, força esta necessária para deslocar as superfícies de forma a diminuir o erro (processamento das informações) e, **(iii)** aplicando essa força entre as superfícies (utilização da informação para redefinir o funcionamento do sistema). Essas três etapas constituem o procedimento denominado *realimentação*.

A utilização da técnica da *realimentação* para modificar o comportamento dinâmico de sistemas mecânicos vem sendo cada vez mais empregada, mas ainda é pouco difundida na área da engenharia mecânica, apesar de, nas suas aplicações iniciais mais conhecidas, ter sido utilizada em sistemas mecânicos.

Este trabalho tem como objetivo apresentar a técnica, alguns conceitos fundamentais e métodos utilizados na *realimentação*, indicando uma bibliografia básica para a iniciação no assunto. Adicionalmente, discutem-se alguns estudos de caso a partir da experiência do Laboratório de Robótica da Universidade Federal de Santa Catarina.

## 2. O CONTROLE DE UM SISTEMA MECÂNICO

Os sistemas mecânicos têm um comportamento dinâmico (também chamado de *resposta*) que depende da forma como ele é acionado, ou seja da *entrada*. Esse comportamento pode ser avaliado pela sua *saída* (variável de interesse).

Em uma máquina a vapor, por exemplo, a entrada é a vazão de vapor e a variável de interesse é a velocidade angular do eixo. Nesta máquina a vazão de vapor é estabelecida através de uma válvula e a velocidade pode ser medida por um tacômetro (*sensor de saída*). A Fig.1 apresenta os elementos deste sistema mecânico.

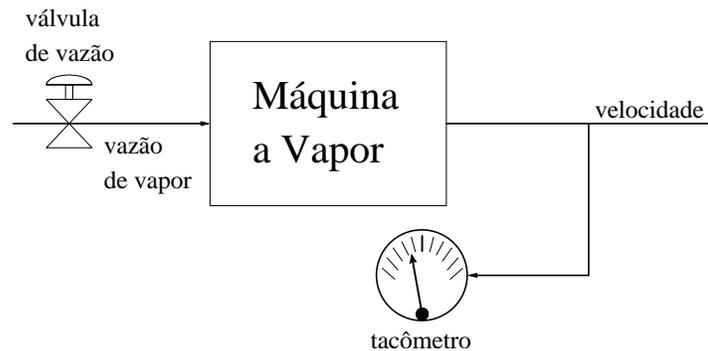


Figura 1. Representação esquemática da instalação de uma máquina a vapor.

Na máquina a vapor funcionando sem carga, uma abertura fixa da válvula define uma vazão de vapor que resulta em uma velocidade no seu eixo de saída. Se uma carga é aplicada, mantendo-se a mesma abertura da válvula e portanto a mesma a vazão, a velocidade da máquina diminui. Este é o comportamento (ou a resposta) da máquina em *malha aberta*.

### 2.1. O Controle em malha fechada

Após abrir a válvula estabelecendo uma vazão de vapor e a conseqüente velocidade, pode-se informar uma pessoa que a máquina deve funcionar à uma velocidade desejada. Além disso, essa pessoa pode ser instruída a observar continuamente o tacômetro e a modificar a abertura da válvula de acordo com a velocidade medida, de forma a manter a velocidade aproximadamente constante, em torno da velocidade desejada.

A pessoa *fecha a malha* introduzindo uma *realimentação* (modificação na abertura da válvula) a partir:

- (i) da definição da velocidade desejada (ou velocidade de *referência*),
- (ii) da medição da velocidade de saída,
- (iii) da comparação entre elas e,
- (iv) da definição da ação sobre a entrada (abrir ou fechar a válvula, ou seja, aumentar ou diminuir a vazão).

A pessoa desempenha o papel de *sistema de controle* dessa máquina, cuja função é modificar o seu comportamento natural (ou em malha aberta), pelo qual a velocidade da máquina tende a diminuir quando atua uma carga. A ação do sistema de controle (abrir mais a válvula) busca modificar esse comportamento. Para este caso isso é possível dentro dos limites de vazão do equipamento. Este papel de sistema de controle pode ser visualizado na Fig. 2, que ilustra o fechamento da malha de controle.

Cabe destacar que o fechamento da malha reduz o efeito da ação externa (atuação da carga) sobre o sistema, algumas vezes caracterizada como *perturbação*.

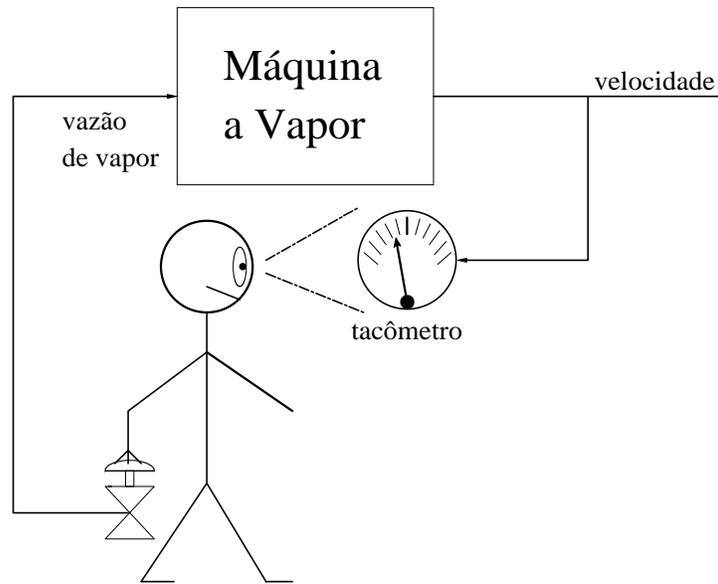


Figura 2. Fechamento da malha de controle.

## 2.2. O Controle automático em malha fechada

Realizar o controle da velocidade de uma máquina sem a intervenção de uma pessoa, ou seja, automaticamente, é um objetivo perseguido desde o século XIII. Uma das primeiras aplicações de que se tem notícia é o controle automático de velocidade em moinhos de farinha movidos pela energia aeólica, utilizando um sistema de controle centrífugo. O sistema de controle centrífugo ficou famoso, no entanto, pela sua aplicação na máquina a vapor realizada por James Watt em 1788.

Este sistema de controle (Fig.3) é composto de um eixo acoplado ao eixo da máquina cuja velocidade deseja-se controlar. Nesse eixo estão rotuladas duas hastes com duas esferas de massa  $m$  posicionadas a uma distância  $l$  da rótula.

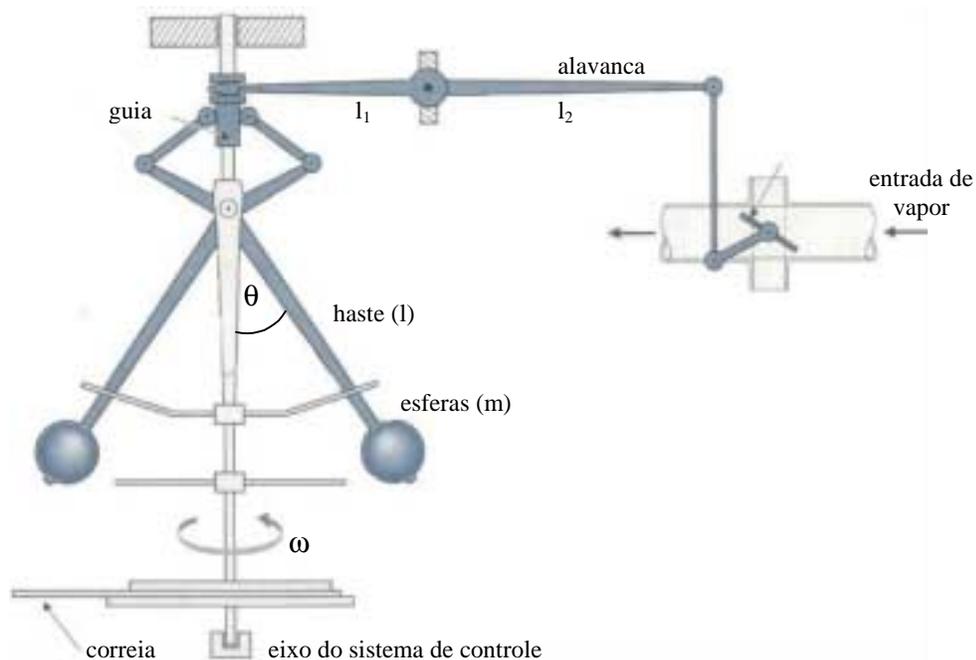


Figura 3. Sistema de controle centrífugo.

A rotação do eixo do sistema de controle origina uma força centrífuga que posiciona as esferas a um ângulo  $\theta$  do eixo. Se o eixo está na vertical a velocidade angular do eixo ( $\omega$ ) é dada por  $\omega = l \cos \theta / g$ , em que  $g$  é a aceleração da gravidade (as massas das hastes não são consideradas e os atritos são desprezados). Fica claro que, para um dado posicionamento  $l$  das esferas ao longo da haste, o ângulo  $\theta$  pode ser usado para medir a velocidade.

O sistema de controle é completado por uma guia, movimentada pelo deslocamento angular das hastes, que aciona uma alavanca que, através de outro conjunto de alavancas, movimenta a válvula de vazão.

Ajustando a posição das esferas da haste fica estabelecida a velocidade de referência para um determinado ângulo  $\theta$ , em conjunto com a abertura da válvula correspondente.

Considere a máquina e o sistema de controle funcionando em equilíbrio nestas condições.

Quando uma carga é aplicada repentinamente, a velocidade da máquina cai e o ângulo das hastes com o eixo do sistema de controle diminui. Essa diminuição do ângulo movimenta a guia e as alavancas, que provocam uma abertura na válvula de vazão. Aumentando a vazão de vapor a tendência é restaurar a maior parte da velocidade perdida.

Cabe observar que, sob a ação da carga, o novo equilíbrio exige uma abertura maior da válvula com um ângulo correspondente menor, o que significa uma velocidade de equilíbrio menor. Para restaurar completamente a velocidade é necessário reajustar o posicionamento das esferas.

O sistema de controle centrífugo substitui a pessoa mencionada no controle de velocidade discutido na seção 2.1 e *fecha a malha* introduzindo uma *realimentação automática* (modificação automática na abertura da válvula) com base na:

- (i) definição da velocidade de referência através do ajuste da posição de equilíbrio dos elementos mecânicos (esferas e alavancas);
- (ii) medição da velocidade de saída, dada pela posição angular das esferas;
- (iii) comparação entre a velocidade de referência ajustada e a velocidade medida (erro); e
- (iv) ação sobre a entrada, abrir ou fechar a válvula, executada pela guia e alavancas.

A Fig.4 apresenta uma representação dos elementos básicos deste sistema de controle.

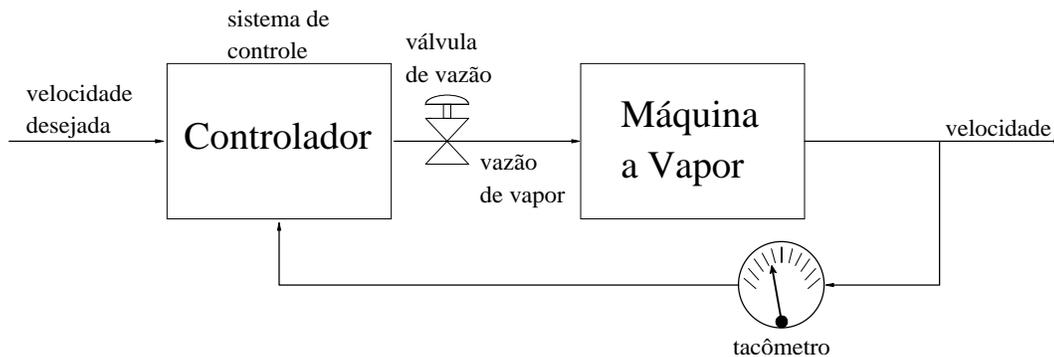


Figura 4. Elementos básicos de um sistema de controle em malha fechada.

É importante destacar que a ação sobre a entrada da máquina a vapor (ação de controle) é definida pela alavanca mostrada na Fig.3. A mudança no ângulo (ou o deslocamento da guia) mede o erro na velocidade e a alavanca transforma esse erro em uma ação de controle (abertura da válvula). Essa ação de controle é proporcional à razão entre os braços de alavanca ( $K_p = l_1 / l_2$ ), denominada ganho proporcional.

A abertura da válvula será tanto maior quanto maior for o ganho proporcional. Como a abertura da válvula define o comportamento da máquina, pode-se afirmar que o ganho proporcional  $K_p$  influencia este comportamento, tornando a resposta mais rápida à medida que seu valor aumenta.

Do que foi exposto nas subseções 2.1 e 2.2 verifica-se que o fechamento da malha cumpre duas funções: **(i)** reduzir o efeito de perturbações e, **(ii)** modificar a resposta dinâmica do sistema mecânico. Uma terceira é **(iii)** tornar o sistema menos sensível às variações nos seus parâmetros.

Essa última função pode ser entendida lembrando que a vazão de vapor depende não só da abertura da válvula. A vazão também depende da pressão de fornecimento de vapor que, por sua vez, é função da produção de vapor. A pressão de fornecimento é um parâmetro do sistema sujeito à variações. Em malha aberta, se a pressão diminuir, mantida a abertura da válvula, a velocidade diminui. Havendo realimentação, a diminuição da pressão pode ser compensada por uma maior abertura da válvula, tornando o sistema menos sensível à variação da pressão.

### **3. O CONTROLADOR DE UM SISTEMA MECÂNICO E SEU PROJETO**

O elemento que relaciona o erro entre a referência e a saída de um sistema mecânico e a ação de controle é denominado *controlador*. No caso do sistema de controle da máquina a vapor o controlador é a alavanca, cujas dimensões definem seu ganho proporcional.

Para o sistema de controle centrífugo da velocidade o projeto do controlador consiste na escolha adequada do ganho proporcional. De uma forma geral o projeto também envolve a escolha da relação entre o erro e a ação de controle, que não precisa ser apenas proporcional e, portanto, não precisa ser definida por uma alavanca. Para a obtenção da resposta desejada em malha fechada pode ser necessária uma relação dinâmica entre o erro e a ação de controle.

De uma maneira geral pode-se dizer que o projeto do controlador consiste na escolha da dinâmica entre o erro e a ação de controle e dos respectivos ganhos envolvidos.

Watt utilizou o sistema de controle centrífugo da velocidade de forma intuitiva, sem realizar nenhuma análise teórica. Só em 1840 Airy discutiu a possibilidade deste controlador induzir um comportamento instável na malha fechada. Segundo Fuller (1976), citado em Frankling et al. (2001), Airy foi o primeiro pesquisador que discutiu a estabilidade em sistemas de controle e o primeiro a modelá-los utilizando equações diferenciais.

As equações diferenciais podem ser usadas para modelar os sistemas mecânicos. Com isso pode-se substituir o projeto intuitivo utilizado por Watt por uma análise sistematizada do comportamento do sistema em malha fechada. Neste caso o controlador é projetado representado por uma equação diferencial. Uma vez estabelecida a dinâmica do controlador necessária para que o sistema em malha fechada tenha a resposta desejada, o sistema de controle é construído tal que seu comportamento dinâmico corresponda ao definido por essa equação diferencial.

O controlador pode, mas não precisa, ser mecânico, como o de Watt. Pode-se construí-lo eletronicamente, de forma analógica ou digital. Basta que seu comportamento corresponda ao comportamento necessário para obter a resposta desejada em malha fechada.

### **4. ALGUNS CONTROLADORES DE SISTEMAS MECÂNICOS**

A escolha de um controlador para um sistema mecânico pode ser feita através da síntese ou da análise. Na síntese a estrutura dinâmica do controlador é estabelecida a partir do comportamento desejado em malha fechada. Pela metodologia da análise escolhe-se um controlador e analisa-se o comportamento do sistema em malha fechada. Nesta seção apresentam-se alguns dos controladores mais utilizados em sistemas mecânicos, classificados em dois grandes grupos: os controladores lineares e não lineares.

#### **4.1. Os controladores lineares**

Quando a relação entre o erro (diferença entre a referência e o sinal medido) e a ação de controle é linear, diz-se que o controlador é linear. Quando o sistema também é linear, o projeto e a

análise da resposta em malha fechada podem ser realizados usando as técnicas do lugar das raízes, da resposta em frequência e da representação no espaço de estados (Frankling et al., 2001). Os controladores lineares mais comuns são os controladores PID e os controladores de estados.

Os controladores em que o sinal de controle ( $u$ ) é proporcional ao erro entre o sinal de referência ( $y_r$ ) e o sinal medido ( $y$ ), ou seja, em que  $u = K_p(y - y_r)$ , são chamados de *controladores proporcionais* (P), e a constante  $K_p$  é denominada ganho proporcional. Quando, adicionalmente, existe uma parcela do sinal de controle que depende do erro entre as derivadas do sinal de referência ( $\dot{y}_r$ ) e do sinal medido ( $\dot{y}$ ), o controlador é chamado de *proporcional-derivativo* (PD). Neste caso o sinal de controle é calculado como  $u = K_p(y - y_r) + K_d(\dot{y} - \dot{y}_r)$ , onde  $K_d$  é o ganho derivativo. Se, além disso, existe uma parcela do sinal de controle que depende da integral do erro entre a referência e o sinal medido, o controlador é denominado *proporcional-integral-derivativo* (PID), e o sinal de controle é calculado por  $u = K_p(y - y_r) + K_d(\dot{y} - \dot{y}_r) + K_i \int_0^t (y - y_r) d\eta$ , e  $K_i$  é o ganho integral.

A parcela proporcional influencia a velocidade de resposta da malha fechada. Quanto maior o ganho proporcional mais rápida é a resposta em malha fechada. Ganhos proporcionais grandes podem levar à respostas oscilatórias ou mesmo instáveis. As oscilações na resposta podem ser diminuídas através da parcela derivativa, que introduz um amortecimento adicional na malha fechada.

A parcela proporcional diminui também a influência de perturbações externas no sistema mas, algumas vezes, não consegue eliminá-la completamente em regime permanente, como foi observado no exemplo da máquina a vapor, apresentado na seção 2. A parcela integral da ação de controle auxilia a eliminação de erros de saída em regime.

Um outro controlador linear importante é o *controlador de estados*. Para entender seu funcionamento é preciso recordar que o conjunto de variáveis que definem completamente um sistema mecânico em um determinado instante de tempo é definido como *estado do sistema*.

Se o sistema é linear e tem uma estrutura dinâmica tal que sua saída pode ser completamente determinada por esse conjunto de variáveis, o sistema é dito *controlável*. Para os sistemas controláveis é possível obter a resposta desejada em malha fechada a partir de uma realimentação adequada dos estados. Neste caso tem-se um o controlador de estados.

Se o sistema é controlável o controlador de estados sempre possibilita a obtenção da resposta desejada, ao preço de ter que dispor de todos os estados e de um atuador que tenha possibilidade de fornecer o sinal de controle necessário para tanto.

## 4.2. Os controladores não-lineares

O controlador é não linear quando a relação entre o erro e o sinal de controle é não linear. Neste caso o projeto do controlador e a análise da resposta em malha fechada são feitos usando métodos para sistemas não lineares, com destaque para o método desenvolvido por Lyapunov e publicado pela primeira vez em 1892 (veja Khalil, 1996, Vidyasagar, 1998).

Dentre as técnicas desenvolvidas a partir dos métodos não lineares podem-se citar a linearização por realimentação, o controle a estrutura variável, o controle adaptativo e o controle baseado na passividade. Em diversos sistemas essas técnicas possibilitam melhorar o desempenho dinâmico, tornar o sistema menos sensível às perturbações e às variações nos parâmetros, objetivos básicos da realimentação (veja seção 2).

A técnica em que através de uma realimentação de estados adequada busca-se linearizar um sistema é conhecida como *linearização por realimentação* (Khalil, 1996). Essa técnica é baseada no modelo do sistema, a partir do qual a linearização é realizada. Por isso, os resultados obtidos com a linearização por realimentação dependem fortemente de um conhecimento preciso do modelo. A linearização por realimentação é usada buscando obter um desempenho dinâmico melhor e mais uniforme.

No *controle a estrutura variável* (Slotine and Li, 1991, Edwards and Spurgeon, 1998) a estrutura dinâmica da malha fechada é adequadamente alterada segundo uma lei de chaveamento, com o objetivo de tornar a resposta da malha fechada robusta (insensível) a perturbações externas e a variações nos parâmetros do sistema. O chaveamento entre as diferentes estruturas pode induzir vibrações de alta frequência na resposta, o que pode limitar a aplicação da técnica. O controle a estrutura variável é utilizado objetivando tornar o sistema em malha fechada menos sensível à perturbações e à variações nos seus parâmetros.

O *controle adaptativo* é utilizado quando os parâmetros do sistema não são completamente conhecidos e são identificados durante o funcionamento. Esse processo de identificação é também chamado de adaptação de parâmetros (Sastry and Bodson, 1989, Slotine and Li, 1991, Narendra et al., 1991). O controle adaptativo é empregado para superar o desconhecimento dos parâmetros do sistema durante o projeto do controlador e tornar o sistema menos sensível à variações nesses parâmetros.

Muitos sistemas mecânicos são passivos, ou seja, são sistemas em que não existe geração de energia entre sua entrada e sua saída. Essa propriedade pode ser útil no projeto da lei de controle e quando ela é utilizada diz-se que o controle é *baseado na passividade* (De Wit et al., 1996, Ortega et al., 1998).

## **5. ESTUDOS DE CASO: Os controladores para alguns sistemas mecânicos**

Apresenta-se a seguir uma breve discussão sobre o projeto de controladores para sistemas de posicionamento e para robôs manipuladores, que reúnem características presentes em uma série de outros sistemas mecânicos.

### **5.1. Os controladores de sistemas de posicionamento pneumáticos e hidráulicos**

Os sistemas que possibilitam posicionar uma carga mecânica localizada através de uma coordenada “y” são chamados de sistemas de posicionamento. Esta localização pode ser fixa ou variável no tempo, ou seja,  $y(t)$ , e nestes casos os sistemas de posicionamento são chamados de seguidores.

Os sistemas de posicionamento são utilizados em diversas aplicações dentre as quais podem-se citar laminadores, turbinas hidráulicas, máquinas agrícolas, lemes de aeronaves, antenas, telescópios, direcionadores de foguetes, máquinas de precisão e robôs manipuladores.

Um componente importante do sistema é o elemento que aplica a força sobre a carga mecânica para levá-la até a posição desejada. Este elemento é chamado de motor ou acionamento e pode ser elétrico, hidráulico ou pneumático. Uma discussão sobre as características e aplicações de cada um desses motores pode ser encontrada em Bollmann e Guenther (1997). Aqui discutem-se algumas características do funcionamento e do controle dos sistemas com acionamentos pneumáticos e hidráulicos.

#### **5.1.1. Os controladores de sistemas de posicionamento pneumáticos**

Os sistemas pneumáticos de posicionamento são relativamente baratos, leves e de fácil instalação, apresentando também uma boa relação entre a força aplicada e o seu peso. Isso os torna bastante atraentes para diversas aplicações.

Os elementos básicos de um sistema de posicionamento pneumático estão esquematizados na Fig. 5. Este sistema é composto por uma servoválvula direcional e por um cilindro de dupla ação com transmissão de movimento por fita, cujo êmbolo é conectado a uma carga inercial ( $M$ ).

A carga inercial é deslocada utilizando a energia pneumática armazenada em um vaso de pressão, onde o ar é mantido a uma pressão de suprimento  $p_s$ . O fluxo de ar sob pressão é

direcionado através da servoválvula. Deslocando o carretel da servoválvula de  $x_v$  para a esquerda, por exemplo, a câmara 1 é conectada com o reservatório e a câmara 2 é conectada com a atmosfera. Como a pressão no reservatório ( $p_s$ ) é maior do que a pressão na câmara 1 ( $p_1$ ), surge uma vazão mássica de ar da válvula para a câmara 1 ( $q_{m1}$ ). Simultaneamente, como a pressão na câmara 2 ( $p_2$ ) é maior do que a pressão atmosférica ( $p_{atm}$ ), surge uma vazão mássica de ar da câmara 2 para a atmosfera ( $q_{m2}$ ). Com isso a pressão na câmara 1 aumenta e a pressão na câmara 2 diminui. A diferença de pressões ( $p_\Delta = p_1 - p_2$ ) gera a força que provoca o deslocamento do êmbolo e, conseqüentemente, da carga.

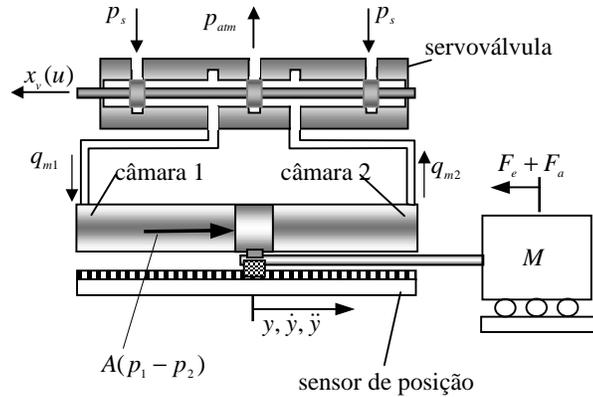


Figura 5 – Elementos de um sistema de posicionamento pneumático.

Muitas vezes o deslocamento do carretel da válvula ( $x_v$ ) é provocado por uma tensão ( $u$ ) aplicada em um solenóide. Desta forma, a dinâmica deste sistema tem como entrada a tensão  $u$  e como saída o deslocamento  $y$  do êmbolo do cilindro (ou da massa  $M$  acoplada).

A estrutura dinâmica do sistema com parcelas oscilatórias introduzidas pela compressibilidade do ar, as não linearidades associadas ao escoamento do ar na servoválvula e ao atrito entre o êmbolo e a camisa do cilindro em conjunção com os atrasos devidos à baixa velocidade de propagação das ondas de pressão no ar, tornam os sistemas pneumáticos de posicionamento difíceis de serem controlados de forma a obter-se o desempenho necessário para algumas tarefas de posicionamento.

O objetivo de desenvolver sistemas pneumáticos de posicionamento rápidos e precisos tem motivado diversos trabalhos em controle. Busca-se superar os problemas inerentes aos sistemas pneumáticos empregando técnicas de controle adequadas. Uma revisão bibliográfica do emprego de diversas técnicas, lineares e não lineares pode ser encontrada em Guenther e Perondi (2002).

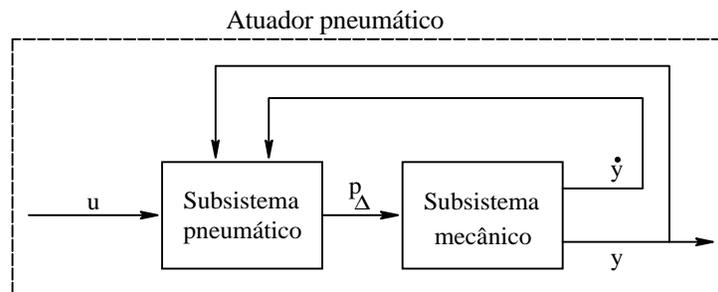


Figura 6 – O sistema de posicionamento pneumático interpretado como dois subsistemas interconectados.

Aqui apresenta-se uma técnica de controle não linear em cascata recentemente desenvolvida e testada com sucesso. A técnica parte da interpretação do sistema de posicionamento pneumático como dois subsistemas interconectados: um subsistema mecânico comandado pela força gerada em um subsistema pneumático (Fig. 6).

A partir dessa interpretação projeta-se uma força a ser aplicada ao subsistema mecânico tal que ele siga a posição desejada  $y_d(t)$ . Tal força é denominada de força desejada e é gerada pela diferença de pressão entre as câmaras multiplicada pela área do êmbolo ( $F_d = Ap_{\Delta d}$ ), caracterizando uma diferença de pressão desejada ( $p_{\Delta d}$ ). Essa força desejada, projetada para que o subsistema mecânico tenha a resposta desejada, é a lei de controle do subsistema mecânico.

Em seguida projeta-se uma entrada (deslocamento da servoválvula) para o subsistema pneumático tal que o mesmo gere a diferença de pressão desejada e, conseqüentemente, a força desejada para que o sistema como um todo tenha a resposta desejada  $y_d(t)$ .

A combinação da entrada de controle para o subsistema pneumático com a entrada do subsistema mecânico constitui o controlador do sistema pneumático de posicionamento.

Essa técnica permite superar as não linearidades associadas ao escoamento do ar na servoválvula, manter limitadas as oscilações devido à compressibilidade do ar e compensar satisfatoriamente o atrito entre o êmbolo e a camisa do cilindro pneumático. Com isso o desempenho do sistema, em termos do erro de posicionamento e do erro de seguimento, resulta bastante superior ao obtido utilizando controladores clássicos.

Os detalhes desse projeto podem ser encontrados em Guenther e Perondi (2002).

### **5.1.2. Os controladores de sistemas de posicionamento hidráulicos**

Neste caso a carga inercial é deslocada utilizando a energia hidráulica e o funcionamento é semelhante ao descrito acima para os sistemas pneumáticos.

As dificuldades de obter respostas rápidas, precisas e sem oscilações remanescentes têm origem na estrutura dinâmica do sistema, que tem parcelas oscilatórias pouco amortecidas introduzidas pela compressibilidade do fluido hidráulico, e nas não linearidades associadas ao escoamento do fluido através da servoválvula e ao atrito entre o êmbolo e a camisa do cilindro.

Um caminho para superar essas dificuldades é o desenvolvimento de técnicas de controle apropriadas para tanto. Uma revisão bibliográfica sobre o emprego dessas técnicas pode ser encontrada em Edge (1997) e mais recentemente em Cunha (2001).

Resultados muito satisfatórios foram obtidos utilizando uma técnica de controle em cascata semelhante à descrita para os sistemas com acionamento pneumático na seção 5.1.1. Detalhes sobre o funcionamento deste controlador em cascata estão apresentados em Guenther e De Pieri (1997), e o seu projeto está descrito em Cunha et al. (2002).

Utilizando esse controlador em cascata o desempenho dinâmico resulta melhor do que o obtido com controladores clássicos. Além disso, empregando uma combinação das técnicas de controle adaptativo e controle a estrutura variável, consegue-se tornar a malha fechada menos sensível à variações nos parâmetros do sistema (Guenther et al., 1998, 2000).

### **5.2. Os controladores de robôs manipuladores**

Os robôs manipuladores são sistemas que possibilitam posicionar uma carga ( $m$ ) localizada através de um vetor “ $Y$ ”, cujas componentes são as posições “ $x, y, z$ ” e mais três orientações em um dado sistema de coordenadas. São, em última análise, sistemas de posicionamento, como os descritos no item 5.1, com mais possibilidades. O vetor “ $Y$ ”, que define a localização, pode ser fixo ou variável no tempo, ou seja,  $Y(t)$ .



Figura 7 – Um robô manipulador.

Nos robôs manipuladores a carga mecânica é posicionada mediante a movimentação de cada um de seus elos, realizada pelo respectivo motor, que pode ter acionamento elétrico, hidráulico ou pneumático. Neste caso, além das dificuldades inerentes ao controle de cada um de seus acionamentos, influem a natureza não linear da dinâmica do robô, provocada pelo efeito da gravidade, das forças centrífugas e de Coriolis, e o funcionamento acoplado dessa dinâmica.

Um problema adicional, conhecido como cinemática inversa, é calcular as posições das juntas necessárias para atingir uma dada posição e orientação da carga, normalmente definida no espaço cartesiano. Esse problema envolve um sistema de equações não lineares e, comumente, tem soluções múltiplas, mesmo quando o robô é não redundante. Os robôs não redundantes são os que têm o número de movimentos independentes (graus de liberdade) igual ao número de coordenadas necessário para definir a posição e a orientação da carga.

Quando, por exigência da tarefa, faz-se necessária a utilização de um robô redundante, ou seja, com um número de movimentos independentes maior do que o número de coordenadas necessário para definir a posição e a orientação da carga, o número de soluções é infinito. Isso, por um lado, dificulta a cinemática inversa mas, ao mesmo tempo, introduz a possibilidade de agregar critérios que flexibilizam a definição do movimento.

### 5.2.1. Os controladores de posição

Quando a tarefa do robô envolve o posicionamento da carga sem que a ferramenta (ou a carga) esteja em contato com o meio durante o movimento, diz-se que o controle do robô é de posição.

Este problema vem sendo bastante estudado, principalmente para o caso de robôs não redundantes em que a dinâmica dos motores do robô pode ser desconsiderada. Uma discussão específica bastante completa pode ser encontrada em De Wit et al. (1996), e uma abordagem teórica sistemática complementar em Ortega et al. (1998).

Para robôs redundantes uma revisão bibliográfica pode ser encontrada em Martins (2002), onde é desenvolvida uma nova metodologia para a solução da cinemática inversa. Uma aplicação desta metodologia esta implementada no robô especial para soldagem com sete movimentos independentes, construído no Laboratório de Robótica da UFSC, Roboturb, mostrado na Fig. 8.



Figura 8 – O Roboturb.

### 5.2.1. Os controladores de força

Diversas operações industriais tais como montagem, usinagem, rebarbação, esmerilhamento, polimento, levantamento de um perfil, são realizadas mediante o contato de uma ferramenta com o meio. Se a ferramenta é fixada na extremidade de um robô para a realização de uma operação desta natureza, o robô se movimenta em contato com o meio. Este contato altera substancialmente o sistema dinâmico resultante, que passa a ser constituído pelo braço do robô e pela parcela do meio em contato com ele (Fig. 9).

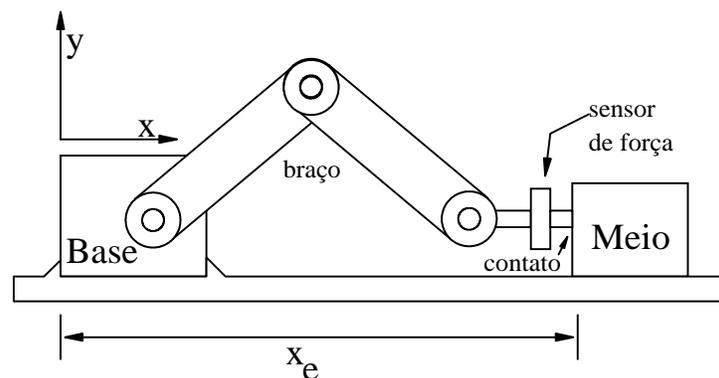


Figura 9 – Robô em contato com o meio.

O estudo dessa interação entre o robô e o meio, da dinâmica do sistema resultante e do controle durante o contato tem despertado o interesse da comunidade científica constituindo-se numa área de pesquisa conhecida como controle de força em robôs (uma relação dos trabalhos mais recentes é encontrada em Amaral, 2000).

Uma forma de controlar o contato é controlar a força de contato. Isso pode ser feito especificando a força desejada na região de contato, medindo a força aplicada através de um sensor e processando essas informações em um controlador cuja incumbência é fazer com que a força aplicada “siga” a força especificada.

O contato com o meio introduz dificuldades adicionais no problema de controle de robôs, vinculadas à redefinição do sistema dinâmico robô-meio que deve incluir também o sensor, à necessidade de considerar as restrições ao movimento após o contato e ao impacto que ocorre no instante do contato (uma discussão mais detalhada pode ser encontrada em Guenther e De Pieri, 1997 e Amaral et al. 2000).

Por outro lado, a solução dessas questões cria a possibilidade de uso de robôs em novas tarefas. Além disso, e talvez mais importante, é preciso notar que a inclusão do sensor de força entre o braço e o meio cria uma comunicação com o meio, inexistente nos robôs ora em uso industrial. Este sensor permite, por exemplo, detectar a posição de um objeto no meio, ou mesmo a forma de um objeto. A Fig. 10 apresenta um robô detectando a forma de um objeto (veja Guenther et al., 2000).

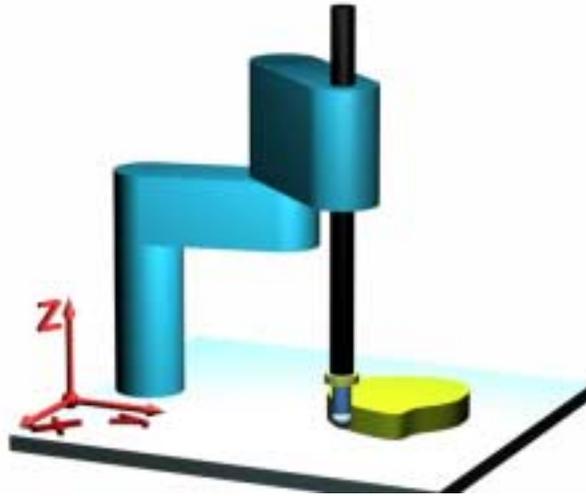


Figura 10 – Robô Scara detectando a forma de um objeto.

## 7. CONCLUSÕES

Mostra-se, através de um exemplo, que a utilização da realimentação possibilita reduzir o efeito de perturbações, modificar a resposta dinâmica e tornar um sistema mecânico menos sensível às variações de seus parâmetros.

Descreve-se o funcionamento e as características de alguns dos controladores mais utilizados e apresentam-se estudos de caso que comprovam a utilidade da realimentação em alguns sistemas mecânicos.

## 8. REFERÊNCIAS

- Amaral, S., “Controle a estrutura variável de robôs manipuladores em ambientes cinemáticos e/ou dinâmicos”. Tese de doutorado, Programa de Pós graduação em Engenharia Elétrica, UFSC, 2000.
- Amaral, S., E. R. De Pieri e R. Guenther, “Controle a estrutura variável de robôs manipuladores interagindo em Ambientes Cinemáticos”. Controle e Automação, vol.11, no.2, pp. 117-127, maio/agosto, 2000.
- Bollmann, A. e R. Guenther, “Posicionadores hidráulicos e pneumáticos: características e técnicas de controle”. Anais do 5º Seminário Nacional de Hidráulica e Pneumática, pp. 57-78, Florianópolis, SC, 1997.
- Cunha, M. A. B., “Controle em Cascata de um Atuador Hidráulico: Contribuições Teóricas e Experimentais”. Tese de doutorado, Programa de Pós graduação em Engenharia Elétrica, UFSC, 2001.

- Cunha, M. A. B., R. Guenther, E. R. De Pieri and V. J. De Negri, "Design of Cascade Controllers of a Hydraulic Actuator", International Journal of Fluid Power, to appear, 2002.
- De Wit, C. C., B. Siciliano and G. Bastin, "Theory of Robot Control", Springer Verlag London Limited, Great Britain, 1996.
- Edge, K.A., "The Control of Fluid Power Systems – Responding to Challenges", Instn Mech Engrs, vol.211, pp. 91-110, 1997.
- Edwards, C. And S. K. Spurgeon, "Sliding Mode Control: Theory and Applications", Taylor & Francis Ltd, London, UK, 1998.
- Fuller, A. T., "The Early Development of Control Theory", J. Dyn. Sys. Meas. Control, vol.98, pp.109-118, 224-235, 1976.
- Frankling, G. F., J. D. Powell and A. E. Naeini, "Feedback Control of Dynamic Systems – fourth edition", Addison-Wesley Publishing Company, 2001.
- Guenther, R. e E. R. De Pieri, "A Simulação de Robôs em Contato com o Meio", Anais do Workshop de Robótica Inteligente, Brasília, pp. 195-206, agosto, 1997.
- Guenther, R. e E. R. De Pieri, "Cascade Control of the Hydraulic Actuators", Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, vol.19, no.2, junho, pp. 108-120, 1997.
- Guenther, R., Cunha, M. A. B., E. R. De Pieri and V. J. De Negri, "Experimental Implementation of the Variable Structure Adaptive Cascade Control of Hydraulic Actuators", in Power Transmission and Motion Control, ed. C R Burrows, K A Edge, Suffolk: Professional Engineering Publishing, pp. 349-361, 1998.
- Guenther, R., Cunha, M. A. B., E. R. De Pieri and V. J. De Negri, "VS-ACC Applied to a Hydraulic Actuator", Proc. of the American Control Conference, pp. 4124-4128, june, Illinois, USA, 2000.
- Guenther, R., E. R. De Pieri e C. C. Bier, "Seguimento de Contornos Planos utilizando Controle de Força em Robôs Industriais", Revista Ciência e Tecnologia, ano 9, no.2, pp.70-77, 2000.
- Guenther R. e E. A. Perondi, "Controle em Cascata de um Sistema de Posicionamento Pneumático", Revista Controle e Automação, 2002.
- Khalil, H. K., "Nonlinear Systems", Macmillan Publishing Company, New York, 1996.
- Martins, D., "Análise Cinemática Hierárquica de Robôs Manipuladores", Tese de doutorado, Programa de Pós graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, 2002.
- Narendra, K. S., R. Ortega and P. Dorato, "Advances in Adaptive Control", IEEE Press, New York, 1991.
- Ortega, R., a Loria, P. J. Nicklasson and H. Sira-Ramirez, "Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems", Springer Verlag London Limited, 1998.
- Sastry S. and M. Bodson, "Adaptive Control", Prentice-Hall International, USA, 1989.
- Slotine, J. J. E. and W. Li, "Applied Nonlinear Control", Prentice-Hall International Editions, USA, 1991.
- Vidyasagar, M., "Nonlinear Systems Analysis – second edition", Prentice-Hall International Editions, USA, 1993.