

AEC – PARTE 02: INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DE CONTROLE

2.1 INTRODUÇÃO

O controle automático tem desempenhado um papel fundamental no avanço da engenharia e da ciência. Além da extrema importância em sistemas de veículos espaciais, sistemas de direcionamento de mísseis, sistemas robóticos e similares, o controle automático tem se tornado de grande importância e parte integrante dos modernos processos industriais e de produção. Por exemplo, o controle automático é essencial no controle numérico de máquinas-ferramenta nas indústrias manufatureiras, no projeto de sistemas de piloto automático na indústria aeroespacial e no projeto de carros e caminhões na indústria automotiva. É essencial também em operações industriais, como o controle de pressão, de temperatura, de umidade, de viscosidade e de vazão nos processos industriais.

Como os avanços no controle automático, na teoria e na prática, vêm produzindo meios para otimizar o desempenho dos sistemas dinâmicos, melhorar a produtividade, diminuir o trabalho árduo de várias rotinas de operações manuais repetitivas, entre outros. A maioria dos engenheiros e dos cientistas deve ter agora bons conhecimentos nessa área.

2.2 REVISÃO HISTÓRICA

O primeiro trabalho significativo de controle automático foi o regulador centrífugo construído por James Watt para o controle de velocidade de uma máquina a vapor, no século XVIII.

Outros trabalhos importantes nos primeiros estágios do desenvolvimento da teoria de controle se devem a Minorsky, Hazen e Nyquist, entre muitos outros.

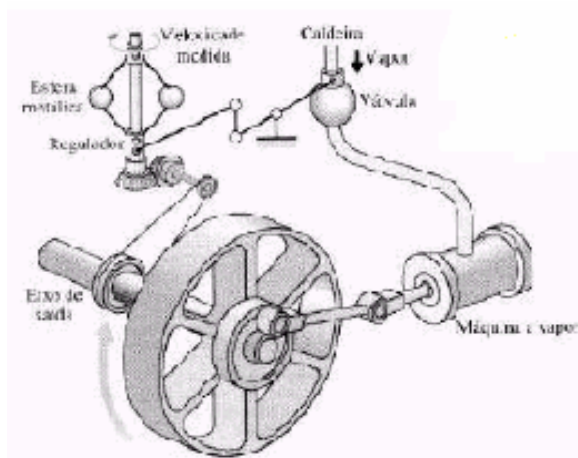


Figura 1 - Regulador Centrífugo.

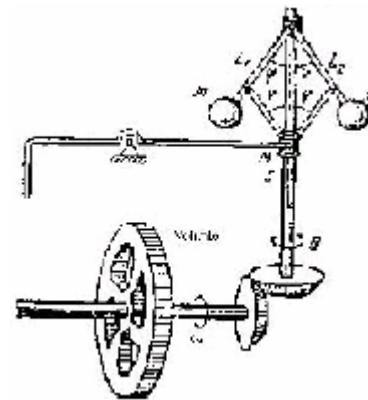


Figura 2 - Máquina a Vapor

Em 1922, Minorsky trabalhou em controladores automáticos para pilotagem de embarcações e demonstrou como a estabilidade poderia ser determinada a partir de equações diferenciais que descrevem o sistema.

Em 1932, Nyquist desenvolveu um procedimento relativamente simples para a determinação da estabilidade de sistemas de malha fechada com base na resposta de malha aberta a excitações senoidais estacionárias.

Em 1934, Hazen, que introduziu o termo *servomecanismo* para sistemas de controle de posição, discutiu o projeto de servomecanismos a relé, capaz de acompanhar de perto uma variação de entrada.

UNIP – Ciência da Computação Prof. Marcelo Nogueira

Durante a década de 40, métodos de resposta em frequência (especialmente os métodos com base nos diagramas de Bode) tornaram possível aos engenheiros projetar sistemas de controle linear de malha fechada que satisfizessem o desempenho requerido.

Do final da década de 40 ao início de 50, o método de lugar das raízes, graças a Evans, foi plenamente desenvolvido.

Os métodos de resposta em frequência e de lugar das raízes, os quais são as essências da teoria clássica de controle, conduziram a sistemas que são estáveis e satisfazem a um conjunto de condições de desempenho relativamente arbitrárias.

Esses sistemas são, em geral, aceitáveis, mas não são ótimos no sentido estrito desse termo.

Desde o final da década de 50, a ênfase nos problemas com projetos de controle foi deslocada do projeto de um dentre muitos sistemas que funcionam para o projeto de um sistema que seja ótimo em um aspecto relevante.

À medida que os sistemas modernos com muitas entradas e saídas se tornam mais e mais complexos, a descrição de um sistema de controle moderno requer um grande número de equações. A teoria clássica de controle, que trata somente de sistemas com uma entrada e uma saída, tornou-se insuficiente para sistemas com múltiplas entradas e saídas. A partir de 1960, uma vez que a disponibilidade dos computadores digitais possibilitou a análise de sistemas complexos diretamente no domínio do tempo, a teoria de controle moderno, com base na análise e na síntese de domínio de tempo com o emprego de variáveis de estado, foi desenvolvida para lidar com a crescente complexidade dos sistemas modernos e seus rigorosos requisitos relativos à precisão, a importância e ao custo em aplicações militares, espaciais e industriais.

Entre o período de 1960 e 1980, o controle ótimo de sistemas determinísticos e estocásticos, bem como o controle adaptativo e de aprendizagem de sistemas complexos, foram amplamente pesquisados. De 1980 em diante, os desenvolvimentos na teoria de controle moderno se voltaram para o controle robusto, o controle H^∞ e tópicos associados.

Agora que os computadores digitais se tornaram mais baratos e compactos, eles são utilizados como parte integrante dos sistemas de controle. Recentes aplicações da teoria de controle moderno incluem sistemas voltados a outras áreas, além da engenharia, como sistemas biológicos, de biomedicina, econômicos e socioeconômicos.

2.3 DEFINIÇÕES

Antes de discutirmos os sistemas de controle, é necessário que seja definida uma terminologia básica.

Variável Controlada e Variável Manipulada: A *Variável Controlada* é a grandeza ou a condição que é medida e controlada. A *Variável Manipulada* é a grandeza ou a condição modificada pelo controlador, de modo que afete o valor da variável controlada. Normalmente, a variável controlada é a saída do sistema. *Controlar* significa medir o valor da variável controlada do sistema e utilizar a variável manipulada ao sistema para corrigir ou limitar os desvios do valor medido a partir de um valor desejado.

No estudo da engenharia de controle, é preciso definir termos adicionais que são necessários à descrição dos sistemas de controle.

Sistemas a controlar ou plantas: Um sistema a controlar pode ser parte de um equipamento ou apenas um conjunto de componentes de um equipamento que funcione de maneira integrada, com o objetivo de realizar determinada operação. Denominaremos de sistema a controlar

UNIP – Ciência da Computação
Prof. Marcelo Nogueira

qualquer objeto físico a ser controlado (como um componente mecânico, um forno, um reator químico, ou uma espaçonave).

Processos: O dicionário *Merriam-Webster* define um processo como uma operação natural de progresso contínuo ou de desenvolvimento caracterizado por uma série de modificações graduais que se sucedem umas às outras de modo relativamente estável, avançando em direção a determinado resultado ou objetivo; ou uma operação contínua progressiva, artificial ou voluntária, que consiste em uma série de ações ou movimentos controlados, sistematicamente destinados a atingir determinados fins ou resultados. Neste contexto, designaremos processo como toda operação a ser controlada. Entre os exemplos estão os processos químicos, econômicos e biológicos.

Sistemas: É a combinação de componentes que agem em conjunto para atingir um determinado objetivo. A idéia de sistema não fica restrita apenas a algo físico. O conceito de sistema pode ser aplicado a fenômenos abstratos dinâmicos, como aqueles encontrados na economia. Dessa maneira, a palavra ‘sistema’ pode ser empregada para se referir a sistemas físicos, biológicos, econômicos e outros.

Distúrbios: É um sinal que tende a afetar de maneira adversa o valor da variável de saída de um sistema. Se um distúrbio for gerado dentro de um sistema, ele será chamado de distúrbio *interno*, enquanto um distúrbio *externo* é aquele gerado fora do sistema e que se comporta como um sinal de entrada no sistema.

Controle com realimentação: Controle com realimentação ou de malha fechada refere-se a uma operação que, na presença de distúrbios, tende a diminuir a diferença entre a saída de um sistema e alguma entrada de referência e atua com base nessa diferença. Aqui, serão considerados apenas distúrbios não previsíveis, uma vez que distúrbios conhecidos ou previsíveis podem sempre ser compensados no sistema.

2.4 EXEMPLOS DE SISTEMAS DE CONTROLE

Apresentaremos vários exemplos de sistemas de controle

Sistema de controle de velocidade: O princípio básico de um regulador Watt de velocidade para um motor está ilustrado no diagrama esquemático da Figura 1.1. A quantidade de combustível fornecida ao motor é ajustada de acordo com a diferença entre a velocidade esperada e a velocidade efetiva do motor.

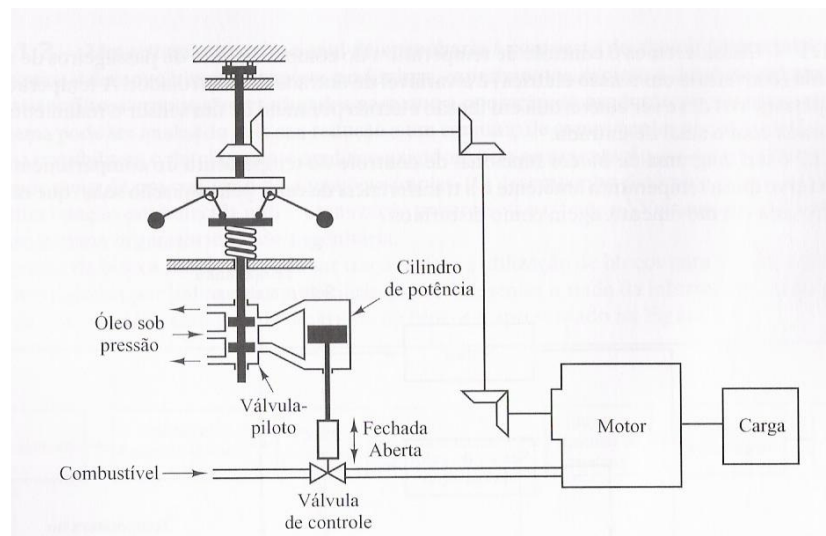


Figura 1.1 Sistema de controle de velocidade

UNIP – Ciência da Computação
Prof. Marcelo Nogueira

A seqüência de ações pode ser estabelecida da seguinte maneira: o regulador de velocidade é ajustado de modo que, à velocidade desejada, não haja fluxo de óleo sob pressão em ambos os lados do interior do cilindro de potencia. Se a velocidade real cai abaixo do valor desejado, devido a um distúrbio, então a diminuição na força centrífuga do regulador de velocidade faz com que a válvula de controle se mova para baixo, fornecendo mais combustível, e a velocidade do motor aumente até atingir o valor desejado. Por outro lado, se a velocidade do motor aumenta acima do valor desejado, então o aumento na força centrífuga do regulador de velocidade faz com que a válvula de controle se desloque para cima. Isso diminui o suprimento de combustível, e a velocidade do motor é reduzida até atingir o valor esperado.

Nesse sistema de controle de velocidade, a planta (sistema a controlar) é o motor e a variável controlada é a velocidade do eixo do motor. A diferença entre a velocidade desejada e a velocidade real é o sinal de erro. O sinal de controle (a quantidade de combustível) a ser aplicado à planta (motor) é o sinal atuante. A grandeza externa que perturba a variável controlada é o distúrbio. Uma mudança inesperada na carga é um distúrbio.

Sistema de Controle de Temperatura: A figura 1.2 mostra um diagrama esquemático de controle de temperatura de um forno elétrico. A temperatura do forno elétrico é medida por um termômetro, que é um dispositivo analógico. O sinal analógico de temperatura é convertido em sinal digital por um conversor A/D (analógico-digital). O sinal digital obtido é fornecido ao controlador por meio de uma interface. Esse sinal digital é comparado com uma temperatura programada de referência e, se houver alguma divergência (erro), o controlador envia um sinal ao aquecedor, por meio de uma interface, um amplificador e um relé, fazendo com que a temperatura do forno atinja o valor desejado.

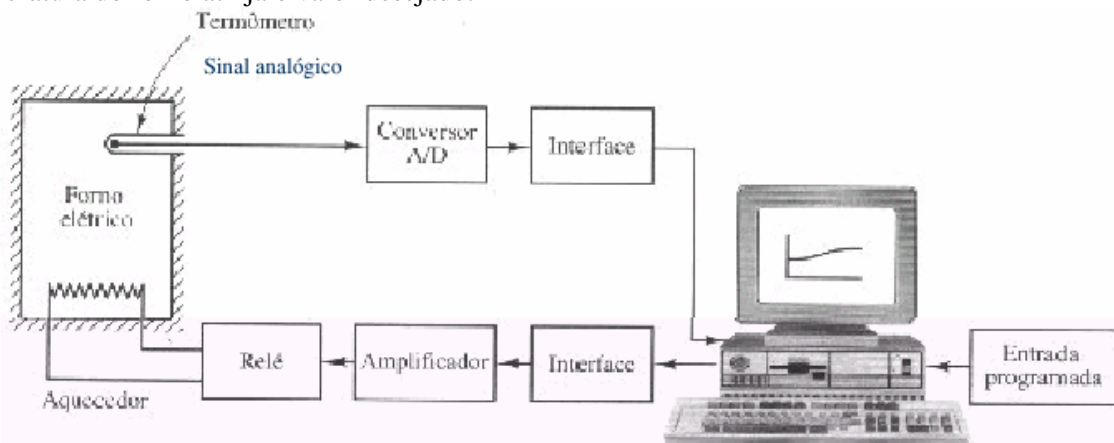


Figura 1.2 Sistema de controle de temperatura

Exemplo 1.1 Considere o controle de temperatura do compartimento de passageiros de um carro. A temperatura desejada (convertida em tensão elétrica) é a variável de entrada do controlador. A temperatura real do compartimento de passageiros deve ser convertida em tensão elétrica por meio de um sensor e realimentar o controlador, para ser comparada com o sinal de entrada.

A Figura 1.3 é um diagrama de blocos funcional de controle de temperatura do compartimento de passageiros de um carro. Observe que a temperatura ambiente e a transferência de calor pela radiação solar, que não são constantes enquanto o carro está em movimento, agem com distúrbios.

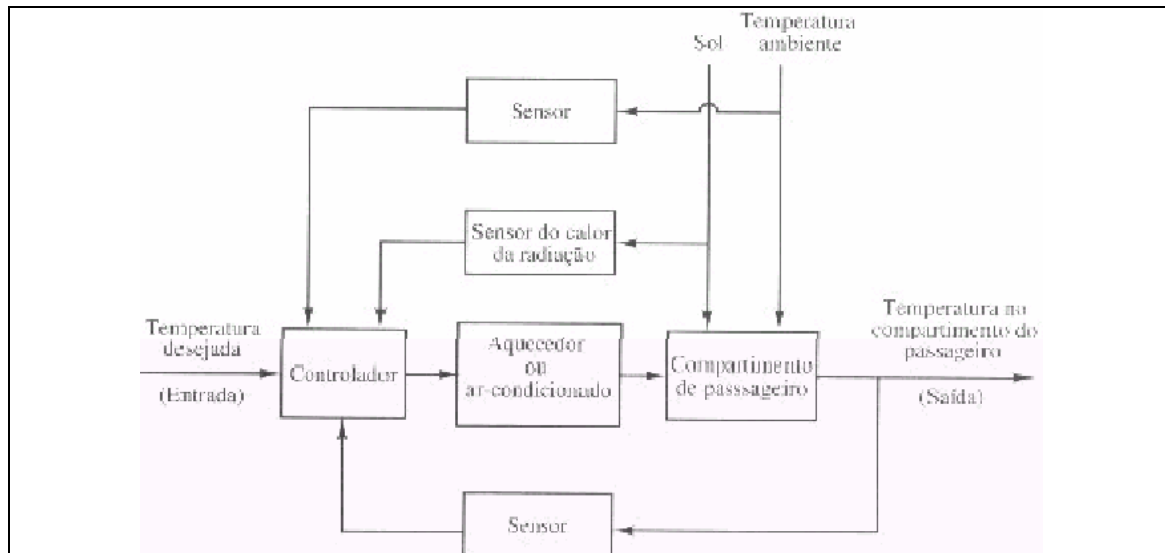


Figura 1.3 Controle de temperatura do compartimento de passageiros de um carro

A temperatura do compartimento de passageiros difere consideravelmente de um ponto para outro. Em vez de utilizar múltiplos sensores para a medição de temperatura nos vários pontos e calcular a média dos valores obtidos, é mais econômico instalar um pequeno exaustor no lugar onde os passageiros normalmente sentem a temperatura. A temperatura do ar proveniente do exaustor é uma indicação da temperatura do compartimento de passageiros e é considerada a saída do sistema.

O controlador recebe o sinal de entrada, o sinal de saída e os sinais dos sensores das fontes de distúrbios e gera um sinal otimizado de controle. Esse sinal é enviado ao aparelho de ar-condicionado ou ao aquecedor, visando controlar o resfriamento ou o aquecimento do ar, de maneira que a temperatura do compartimento de passageiros se torne o mais próxima possível da desejada.

Sistemas Empresariais: Um sistema empresarial pode consistir em vários grupos. Cada tarefa atribuída a um grupo vai representar um elemento dinâmico do sistema. Métodos com realimentação de informações das realizações de cada grupo devem ser estabelecidos, de modo que esse sistema tenha um desempenho apropriado. O inter-relacionamento entre os grupos funcionais deve ser minimizado, de modo que reduza atrasos indesejáveis no sistema. Quanto menor esse inter-relacionamento, menor o fluxo de informações e de materiais utilizados.

Um sistema empresarial é um sistema de malha fechada. Um projeto bem planejado vai reduzir o controle administrativo necessário. Deve-se considerar que distúrbios nesse sistema correspondem à carência de mão-de-obra ou matéria-prima, à interrupção de comunicação, a erros humanos e a outros fatores.

Para um gerenciamento apropriado, é fundamental o estabelecimento de um sistema de previsão com base em dados estatísticos. Sabe-se que um sistema pode ser otimizado pela utilização do *lead time* ou antecipação.

Para aplicar a teoria de controle com o objetivo de melhorar o desempenho de determinado sistema, devemos representar as características dinâmicas dos grupos componentes desse sistema por meio de um conjunto relativamente simples de equações.

Embora exista certo grau de dificuldade em determinar representações matemáticas dos grupos componentes, a aplicação de técnicas de otimização em sistemas empresariais melhora significativamente o desempenho desses sistemas.

UNIP – Ciência da Computação
Prof. Marcelo Nogueira

Exemplo 1.2 Um sistema organizacional de engenharia é composto de alguns grupos principais, como gerenciamento, pesquisa e desenvolvimento, projeto preliminar, experimentos, projeto e desenho de produtos, fabricação e montagem e testes. Esses grupos são interligados para que a operação de produção se processe satisfatoriamente.

Esse sistema pode ser analisado pela sua redução a um conjunto de componentes necessários tão elementares quanto possível, que possibilitem o detalhamento analítico exigido, e pela representação das características dinâmicas de cada componente por meio de um conjunto de equações simples. (O desempenho dinâmico desse sistema pode ser determinado por uma relação estabelecida entre a realização progressiva e o tempo). Veja um diagrama de blocos funcional que mostra um sistema organizacional de engenharia.

Um diagrama de blocos funcional pode ser traçado com a utilização de blocos para representar atividades funcionais, que são interligados por linhas de comunicação para representar a saída da informação ou do produto resultante da operação do sistema. Um exemplo de diagrama de blocos, é apresentado na Figura 1.4.

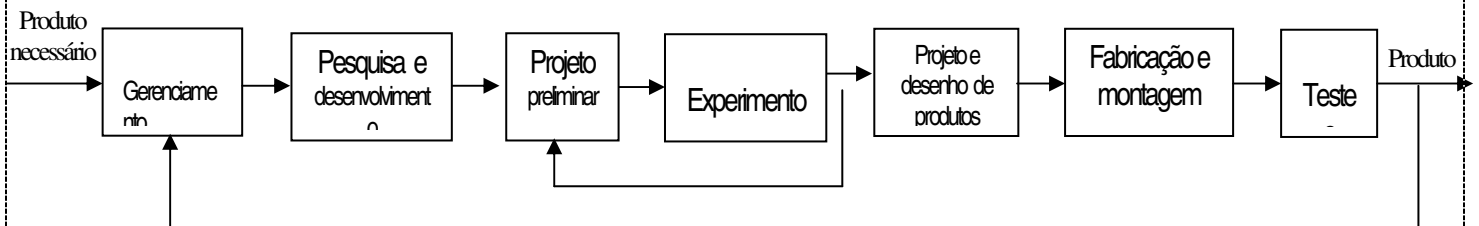


Figura 1.4 Diagrama de blocos de um sistema organizacional de engenharia.

2.5 Controle de Malha Fechada Versus Controle de Malha Aberta

Sistemas de Controle com Realimentação: Um sistema que estabeleça uma relação de comparação entre a saída e a entrada de referência, utilizando a diferença como meio de controle, é denominado *sistema de controle com realimentação*. Um exemplo poderia ser o sistema de controle de temperatura de um ambiente. Medindo-se a temperatura ambiente real e comparando-a com a temperatura de referência (temperatura desejada), o termostato ativa ou desativa o equipamento de aquecimento ou resfriamento, de modo que assegure que a temperatura ambiente permaneça em um nível confortável, independentemente das condições exteriores.

Os sistemas de controle com realimentação não estão limitados à engenharia, podendo ser encontrados em várias outras áreas. O corpo humano, por exemplo, é um sistema extremamente desenvolvido de controle com realimentação. Tanto a temperatura corporal como a pressão sanguínea são mantidas constantes por meio da realimentação de ordem fisiológica. Neste caso, a realimentação realiza uma função vital: faz com que o corpo humano seja relativamente insensível a perturbações externas, permitindo seu perfeito funcionamento nos casos de mudanças no ambiente.

Sistemas de Controle de malha fechada: Os sistemas de controle com realimentação são, com frequência, denominados também *sistemas de controle de malha fechada*. Na prática, os termos controle com realimentação e controle de malha fechada são usados indistintamente. Em um sistema de controle de malha fechada, o sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de

UNIP – Ciência da Computação
Prof. Marcelo Nogueira

entrada e o sinal de realimentação (que pode ser o próprio sinal de saída ou uma função do sinal de saída e suas derivadas e/ou integrais), realimenta o controlador, de modo que minimize o erro e acerte a saída do sistema ao valor desejado. O termo ‘controle de malha fechada’ sempre implica a utilização do controle com realimentação para efeito de reduzir o erro do sistema.

Sistemas de Controle de malha aberta: Os sistemas de controle de malha aberta são aqueles em que o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle no sistema. Isso quer dizer que em um sistema de controle de malha aberta o sinal de saída não é medido nem realimentado para comparação com a entrada. Um exemplo prático é o da máquina de lavar roupas. As operações de colocar de molho, lavar e enxaguar em uma lavadora são executadas em uma seqüência em função do tempo. A lavadora não mede o sinal de saída, isto é, não verifica se as roupas estão bem lavadas.

Em qualquer sistema de controle de malha aberta, a saída não é comparada com a entrada de referência. Assim, a cada entrada de referência corresponde uma condição fixa de operação. Dessa maneira, a precisão do sistema depende de uma calibração. Na presença de distúrbios, um sistema de controle de malha aberta não vai executar a tarefa desejada. O sistema de controle de malha aberta somente poderá ser utilizado na prática se a relação entre a entrada e a saída for conhecida e se não houver nenhum distúrbio interno ou externo. É claro que esses não são sistemas de controle realimentados. Note que a qualquer sistema de controle cujas operações são efetuadas em uma seqüência em função do tempo é um sistema de malha aberta. Por exemplo, o controle de tráfego por meio de sinais, operado em função do tempo, é outro exemplo de controle de malha aberta.

Sistemas de Controle de malha fechada versus malha aberta: uma vantagem do sistema de controle de malha fechada é o fato de que o uso da realimentação faz com que a resposta do sistema seja relativamente insensível a distúrbios e variações internas nos parâmetros do sistema. Dessa maneira, é possível a utilização de componentes relativamente imprecisos e baratos para obter o controle preciso de determinado sistema, ao passo que isso não é possível nos sistemas de malha aberta.

Do ponto de vista da estabilidade, o sistema de controle de malha aberta é mais fácil de ser construído, devido ao fato de a estabilidade ser um problema menos significativo. Por outro lado, a estabilidade constitui um problema importante nos sistemas de controle de malha fechada, que podem apresentar uma tendência de correção de erros além do necessário, causando oscilações de amplitude constante ou variável.

Deve ser enfatizado que, para sistemas em que as entradas são conhecidas com antecipação e que são isentos de distúrbios, é conveniente o uso do controle de malha aberta. Sistemas de controle de malha fechada são mais vantajosos somente nos casos em que houver distúrbios e/ou alterações não previsíveis nos componentes do sistema. Note que a potência de saída determina parcialmente o custo, o peso e as dimensões de um sistema de controle. O número de componentes utilizados em um sistema de controle de malha fechada é maior do que em um sistema correspondente de malha aberta. Assim, no sistema de controle de malha fechada, o custo e a potência são geralmente maiores. Visando a diminuição da potência necessária à operação do sistema, deve-se optar pelo controle de malha aberta, sempre que possível. Uma combinação apropriada do controle de malha aberta e malha fechada é normalmente mais econômica e vai apresentar um desempenho satisfatório do sistema como um todo.

Exemplo 1.3 A maioria das análises e dos projetos de sistemas de controle aqui apresentado refere-se a sistemas de controle de malha fechada. Sob certas circunstâncias (tais como quando não existem distúrbios ou dificuldades de medida da saída), os sistemas de controle de malha aberta podem ser apropriados. Assim, é conveniente resumir as vantagens e as desvantagens de utilizar sistemas de controle de malha aberta.

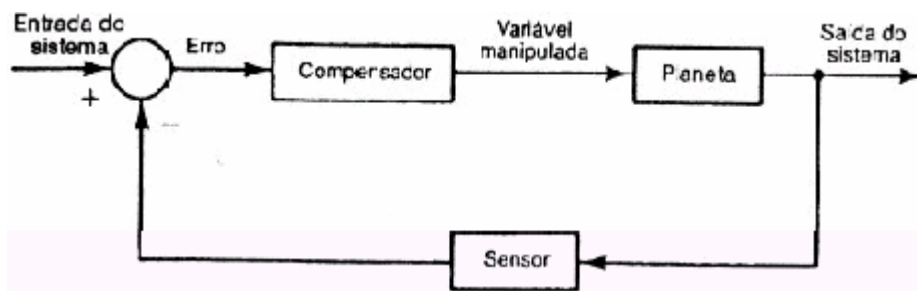
UNIP – Ciência da Computação
Prof. Marcelo Nogueira

Eis as principais vantagens dos sistemas de controle de malha aberta:

1. São simples de ser construídos e têm fácil manutenção.
2. São menos dispendiosos do que um sistema correspondente de malha fechada.
3. Não apresentam problemas de estabilidade.
4. São apropriados quando existem dificuldades de avaliação da saída ou quando a medição precisa da saída não é economicamente possível. (por exemplo, no caso da máquina de lavar roupas, seria bastante dispendiosa a instalação de um dispositivo para avaliar se as roupas foram bem lavadas).

Eis as principais desvantagens dos sistemas de controle de malha aberta:

1. Distúrbios e mudanças na calibração causam erros, e a saída pode apresentar diferenças em relação ao padrão esperado.
2. Para que a saída mantenha a qualidade requerida, é necessária uma regulagem periódica.



sistema de controle com realimentação.

Referências Bibliográficas

OGATA, KATSUHIKO, Engenharia de Controle Moderno, Pearson – Prentice Hall, São Paulo, 2005, 4ª Edição, P 1-6.

NISE, NORMAN S. , Engenharia de Sistemas de Controle, LTC Editora, Rio de Janeiro, 2002, 3ª Edição.