SISTEMAS DE CONTROLE

Recompilado em 2000 por Eng° Luiz Antonio Vargas Pinto a
partir de originais publicados pela Revista Nova Eletrônica da Editora Editele

Nos tempos atuais, percebemos a crescente presença de sistemas automáticos a nossa volta. Máquinas ocupam cada vez mais espaço dentro das residências e indústrias, e os termos cibernética, robô e informática não são mais somente da ficção científica. Na verdade, toda essa revolução que vem acontecendo na sociedade contemporânea não passa do desabrochar de uma tecnologia que já é estudada há meio século e continua sendo muito importante:o controle de sistema. O primeiro trabalho significativo no controle de sistemas foi o de *James Watt*, no comando da velocidade de uma máquina a vapor, no século XVIII. Com o avanço dessa tecnologia foi possível a confecção de navios e aviões que de outra forma não estariam no estágio atual. Em 1922, *Minorsky* trabalhou com controle para pilotagem de navios e, em 1932 *Nyquist* desenvolveu um processo bastante simples para verificar a estabilidade de sistemas. Os servomecanismos apareceram em *Hazen*, em 1934 utilizados em controle de posição. Nas décadas seguintes, com o avanço da aviação, e a necessidade de sistemas mais eficientes, provocada pela segunda grande guerra a teoria teve um enorme desenvolvimento, alcançando coeficientes de qualidade muito altas para as máquinas que utilizam este método.

Conquista recente é o uso da teoria de sistemas para estudos em outras áreas além da engenharia, tais como biologia, economia, medicina e sociologia com resultados interessantes e significativos esperados para um futuro próximo.

Sistemas:

- Sistemas são uma combinação de componentes que atuam em conjunto e realizam um certo objetivo. Esse conceito é ilimitado e pode ser aplicado a fenômenos abstratos, tais como sistemas econômicos e sociais. Existem quantidades enormes de sistemas a nossa volta, e todos atuam em conjunto, causando interferências de maior ou menor vulto entre si.

SISTEMA REALIMENTADO OU AUTOMÁTICO:

- Os sistemas assim chamados, são aqueles que realizam suas atividades de uma maneira pré-programada (os passos desejados já são conhecidos de antemão. Para que o leitor entenda precisamente este conceito, vamos descrever um sistema básico, e a partir dai, implementar cada vez mais blocos para torná-lo mais eficiente. Imagine que você deseja construir um canhão desses que vemos nos filmes de ficção científica, onde todos os movimentos são controlados por sistemas elétricos complicados e a distância. Para seguir o exemplo, observe a figura 1 que é o nosso canhão, composto dos seguintes elementos:

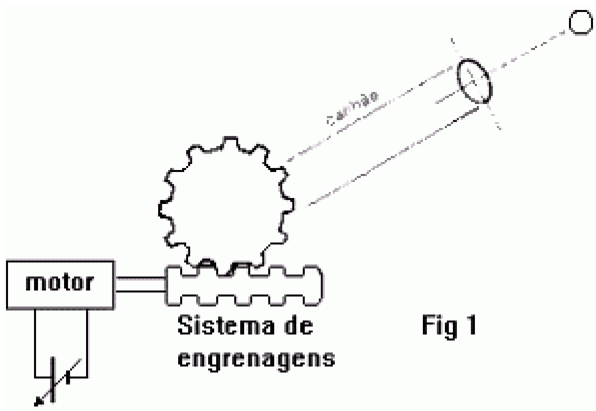


Fig 1

➲ um sistema de engrenagem de movimento;
➲ um motor para acionar o sistema de movimento;
➲ uma fonte de tensão positiva ou negativa.

e desejarmos atirar num determinado alvo, devemos obedecer aos seguintes passos:

1. Localizar o alvo;
2. Ligar o motor através da fonte até que o alvo esteja na mira do canhão;

3. Caso o alvo ultrapasse a posição desejada, devemos inverter a tensão no motor para que o movimento seja contrário e repetir essa operação até que o alvo esteja bem localizado pelo canhão.

Observe que este sistema apresenta todos os conceitos básicos de um controle realimentado manualmente. Existem no exemplo, algumas definições clássicas que podem ser apresentadas:

Variável Controlada ------ A posição do canhão.
Variável Controladora ----- A tensão aplicada ao motor.
Elemento Controlado ----- O motor e o sistema de engrenagens.
Elemento de Medida ------ A mira do canhão.

Nesse caso, o controle é efetuado através de uma operação manual, mas já podemos observar alguns efeitos interessantes, imagine que o motor tenha uma velocidade muito baixa: o operador tenta elevar a tensão, porém o movimento é muito lento, e até o canhão alcançar uma posição eficiente, tranqüilamente o inimigo já nos teria atingido. Esse sistema é denominado **sobreamortecido**, pois nele a variável controlada leva muito tempo para alcançar um valor pré-determinado.

Vamos supor agora o caso contrário: o motor é muito rápido e, logo que o operador deseja uma determinada posição uma pequena elevação de tensão já causa uma movimentação brusca. O alvo não é alcançado, sendo necessário inverter o movimento. Nesse caso o controle é muito complexo, chegando-se ao limite do impossível quando o movimento é tão brusco que não existe uma estabilização no ponto desejado. Esse efeito de o sistema tender para uma estabilização é chamado de **subamortecido**. Caso não se alcance a estabilização dizemos que há oscilação ou instabilidade.

Controle automático

Logicamente, os sistemas podem ser estáveis e de amortecimento crítico, mas existe uma condição intermediária que permite o controle ótimo, no qual o sistema alcança o ponto esperado rapidamente e sem instabilidades. O nosso objetivo é desenvolver um sistema elétrico (em nosso caso particular), no qual o homem não tenha que exercer função alguma e alcance a estabilidade da forma mais rápida possível. Vamos incrementar o nosso sistema e compará-lo ao diagrama de blocos da figura 2.

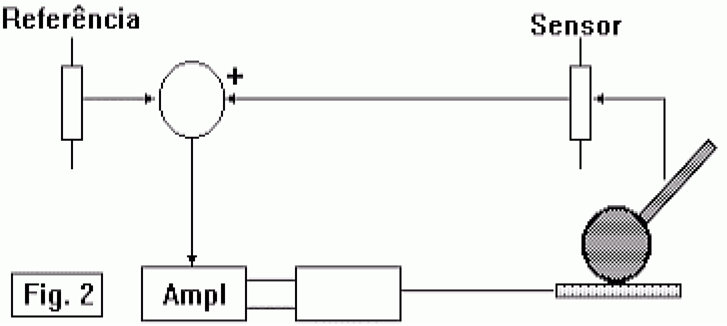


Fig. 2

Suponha a existência de um potenciômetro para transformar em sinal elétrico a posição do canhão, e de um outro potenciômetro para o operador definir a posição que deseja que o canhão alcance. A figura 3 apresenta esse novo aspecto. Podemos criar um sistema que subtrai as tensões dos potenciômetros e amplifica a diferença para alimentar o motor.

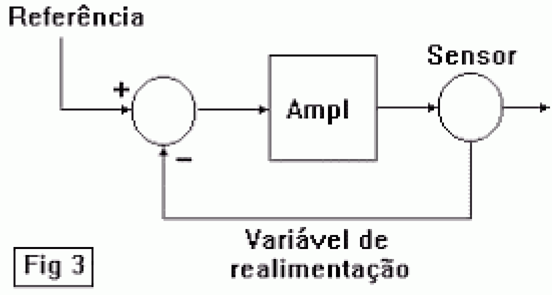


Fig 3

Ao aparecer uma tensão na referência, o motor começa a girar até que não exista mais diferença entre os dois potenciômetros, quando sua alimentação será zero. Este dispositivo é então denominado de controlador automático, e convém lembrar que o sistema é denominado de malha fechada devido a característica da alimentação apresentada. O primeiro sistema visto é chamado de malha aberta, pois se o operador mantiver a posição inicial, o sistema não realizará nenhum tipo de realimentação automática para a correção de distúrbios que possam porventura aparecer. Para que o conceito fique bem concretizado, vamos dar mais alguns exemplo de sistemas realimentados que aparecem constantemente. O mercado de compra e venda de qualquer produto, por exemplo, é um sistema econômico, onde o número de variáveis é enorme e existem realimentações, que podem ser facilmente reconhecidas.

Quando o consumidor começa a comprar, procura os preços mais baixos. Porém se falta um determinado produto, devido ao consumo elevado, o preço tenderá a aumentar e conseqüentemente a procura diminuir. Note que existem vários enlaces de realimentação nesse sistema, o que torna o estudo muito complexo quando existe um número excessivo de variáveis.

Outro exemplo interessante, é o biológico. Em um determinado ambiente podem habitar várias espécies de animais que possuem certas taxas de natalidade e mortalidade; e ainda há a mortalidade causada por predadores e devido a falta de alimento para esses predadores. Considere que existe presas e predadores; portanto, predadores atacam as presas estas diminuem. Logo ocorre a escassez de presas e conseqüentemente a taxa de mortalidade de predadores aumenta e então o número de presas volta a crescer. Assim o sistema continua, a não ser que apareçam novas variáveis não consideradas.

Mais um exemplo interessante é o próprio corpo humano, que pode ser considerado o ápice alcançado pelo sistema de controle. Cada movimento possui uma realimentação via cérebro e existem ainda diversas realimentações que não percebemos. Observe seus olhos, note que o movimento da cabeça não causa oscilação na imagem que você vê. Existe ai um controle de posição com várias dimensões de espaço; e mais, note que quando você anda de carro o movimento do carro também não interfere na imagem. Esse fenômeno é considerado totalmente natural, mas pense em construir um sistema cibernético capaz de reproduzir todos esses controles.

Hoje não só a medicina, mas também o campo da engenharia estuda o corpo humano para entender um pouco mais desse sistema ultra realimentado que nós consideramos tão natural. Esperamos que o conceito de realimentação e controle tenha ficado mais claro após todos esses exemplos, e que o leitor tenha percebido a importância do estudo de sistemas em todos os campos da ciência. Cabe agora estudar uma classe restrita de sistemas pois, do contrário, poderíamos ler livros e mais livros e não conseguiríamos decifrar todos os mistérios referentes a esse assunto.

Desenvolvendo um sistema

Interessa-nos somente os sistemas dinâmicos lineares e fixos, que auxiliam a compreender uma grande parte dos sistemas existentes e a encontrar soluções básicas para os casos mais complexos. Logicamente, para uma análise mais profunda dos sistemas de controle com realimentação, necessitaríamos de uma grande base matemática. Mas para que possamos conhecer os conceitos gerais dessa teoria, basta ter algumas noções de cálculo para a compreensão das equações que vamos apresentar. Consideramos o nosso exemplo inicial do controle da posição do canhão.

Primeiro vamos escrever as equações desse sistema para que os resultados possam ser analisados mais claramente, verificando de uma forma um pouco mais prática, o que temos é descrever. Está claro que as equações não tem relação nenhuma com a teoria de sistemas e servem apenas para tornar mais claro o nosso exemplo. O motor utilizado tem a seguinte equação para representá-lo:

$$V_{arm} = K_m.(\omega) + R.i_{arm}$$

onde:

ω - velocidade de giro do motor;
V - tensão de alimentação do motor,
K_m - constante do motor.

Essa equação é resultado do uso de um motor de corrente contínua com excitação independente. A existência de um conjunto de engrenagens faz com que a velocidade do motor e a velocidade do canhão (ω_1) tenham a seguinte relação:

$$\omega_1 = K_e . \omega$$

onde: ω_1 - velocidade angular do canhão;
K_e- constante da caixa de engrenagem.

Para tornar o problema um pouco mais real, vamos acrescentar uma carga inicial de um atrito estático. essa forma, podemos considerar a existência dos deslocamentos de posição causados pela inércia, que tende a manter a velocidade do corpo constante. Sendo assim, a equação de carga tem o seguinte aspecto:

$$C = K_0 + K_1 \frac{d\varpi}{dt}$$

onde:
K_0 - constante de atrito estático,
K_1 - constante de inércia.

Considerando ainda, que a corrente que o motor consome é proporcional ao conjugado, obtemos mais uma equação completando todo o modelo:

$$C = K.I$$

Programas simuladores

O leitor deve notar que todas as equações mostram apenas o funcionamento do exemplo apresentado, para que possamos realçar simulações por computador e assim obtermos resultados conceituais que só seriam possíveis através de experiências. Oferecemos alguns programas que simulam todas as equações obtendo resultados muito próximos aos reais, e onde podemos alterar todas as constantes para observar seus efeitos dentro de um problema genérico.

Nosso objetivo agora é mostrar como as equações do controle foram colocadas nos programas e depois observar os efeitos de cada tipo de controle. As constantes para a simulação foram escolhidas ao acaso, para melhor entendimento do estudo. O controle proporcional é efetuado da seguinte maneira: a tensão sobre o motor é proporcional ao erro ou desvio do ângulo do canhão com relação ao ângulo de referência. Em outras palavras é proporcional ao desvio entre a variável de controle e a referência pré-estabelecida. O diagrama de blocos desse sistema é o da figura 4.

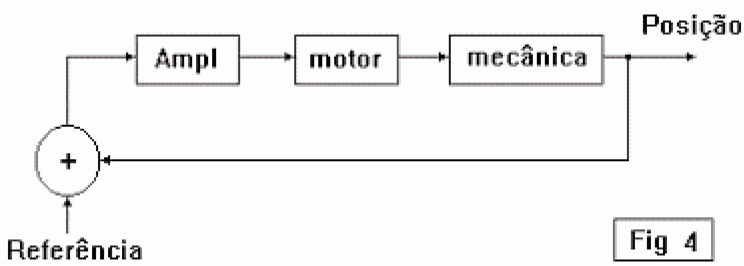


Fig 4

Observe que existe agora uma malha de realimentação que fecha o enlace de maneira a exercer uma correção na tensão do motor através do somador (subtrator) existente. Para simularmos tal efeito, suponhamos agora que a tensão do motor é proporcional ao erro apresentado entre a posição de referência e a em que se encontra o canhão num determinado momento. O controle que estamos conceituando como erro é obtido por meio de um circuito comparador de dois sinais e é empregado para se construir uma função que descreve o valor da variável controlada no tempo.

No exemplo do canhão aparece o erro de posição e a variável controladora é a tensão de alimentação do motor. Logo vamos construir um sistema capaz de gerar uma tensão de alimentação no motor que possa levar, no menor tempo possível, o canhão a posição desejada. O termo **PID** aparece em função do tipo de transformação que causamos nesse sinal erro para gerar a variável controladora. Ou seja, a variável controladora é proporcional á integral do erro, á derivada do erro ou ao próprio erro, sendo que cada tipo de transformação tem suas características de controle que desejamos verificar e conhecer como objetivo principal deste artigo. Os programas no anexo B são capazes de simular os três tipos de transformação apresentados e ainda podem fornecer resultados de como o sistema se portou em função de cada tipo de exemplo.

O programa 1 apresenta somente o efeito **proporcional**, o programa 2 mostra o efeito **proporcional e derivativo** e o programa 3 traz o efeito **proporcional e integrativo**. No último programa 4, apresentamos os três efeitos combinados, tornando o sistema mais complexo.

Existem ainda outros tipos de realimentação que poderemos analisar numa outra ocasião. O sistema enfocado foi definido como sendo o mais genérico possível, permitindo tirar conclusões bastantes expressivas e assim entender outros tipos encontrados na prática como controle de velocidade, de temperatura, de torque etc...

O processo de controle automático, chamado **PID**, é composto por uma associação de efeitos na variável controladora que visam minimizar os efeitos na variável controlada.

Para isso ser melhor entendido, vamos retomar o exemplo do canhão. Suponha que o operador deseje que o canhão mude de posição. Automaticamente, alguma modificação deve ser implementada na tensão de alimentação do motor para que o sistema possa começar a se mover, permitindo assim que o canhão consiga encontrar a sua nova posição. Note que o controle atua sobre a variável controladora e faz com que o canhão se movimente. O controle do tipo **PID** gera uma mudança na variável controladora (no caso, a tensão do motor), proporcional a três características:

- erro;
- integral do erro;
- derivada do erro.

Cada uma dessas parcelas tem uma contribuição diferente na estabilização da variável controlada (no caso, o ângulo do canhão). Existem vários casos onde não são necessárias as três parcelas atuando conjuntamente, mas apenas duas, ou até mesmo uma delas. Podem aparecer ainda, situações particulares, onde são necessárias parcelas diferentes. Porém, não iremos considerar esses casos nessa primeira conceituação.

Proporcional

O **controle proporcional** é o mais simples e evidente, em termos de concepção de projeto; todavia, em caso mais complexos não é eficiente. Imagine que você tenha que projetar um controle automático para manter fixa uma determinada variável sobre uma referência.

A nossa primeira idéia é implementar um sistema que, quando a variável controladora, de modo a corrigir essa distorção. E, na situação oposta, onde a referência é maior, o efeito é contrário ao anterior.

Normalmente alimentamos a variável controlada com um valor proporcional ao desvio existente. Caso a tensão seja positiva no desvio, podemos concluir que a referência está acima do valor ângulo, e, se ela for negativa no motor é porque está abaixo do referido valor (relacionado com o nosso exemplo). Este controle, denominado **proporcional**, pode ser visualizado na figura 1.

Nela apresentamos o diagrama de blocos de um **controle proporcional simples**, onde o desvio entre a referência e a variável controlada é calculado a partir de uma operação de subtração e, a partir dai, amplificado (Kp), passando a alimentar o motor, que gira a caixa de engrenagens e modifica a posição do canhão até que o desvio desapareça.

A constante de amplificação é denominada ganho proporcional. Vale a pena estudar as características desse tipo de controle. A primeira delas é que, quando o desvio for nulo, a tensão sobre o motor também será nula, fato este responsável por um erro na posição desejada. Quando a posição do canhão procura alcançar o valor da referência, observamos que a tensão do motor fica cada vez menor; e quando ela atingir um valor muito pequeno, a ponto de interromper o movimento automático do seu eixo, o desvio entre a posição do canhão e a referência se torna fixo. Disso concluímos que o controle proporcional sempre apresenta um erro que pode ser minimizado, mas nunca eliminado totalmente. Para que este erro possa diminuir, nós aumentamos o ganho Kp, para que a interrupção do movimento do motor dependa de um erro cada vez menor. Assim, a tensão proporcional ao desvio é amplificada com um ganho maior, tornando maior a tensão do motor.

Por isso, para que ele pare é necessário que o desvio seja muito pequeno, as vezes até imperceptível. A primeira vista, basta aumentar cada vez mais o ganho para diminuir o erro proporcional, tornando praticamente perfeito este tipo de controle.

Na verdade, isto não ocorre, pois quando o ganho é muito alto, a tensão do motor permanece em seu valor máximo durante quase todo o tempo em que o desvio existe. Na hipótese de desvio nulo, a inércia presente no sistema faz com que a posição do canhão ultrapasse o valor desejado, o que resulta em instabilidade. Se o ganho for ainda maior, esta característica de oscilação aumenta e o sistema nunca mais encontrar o seu ponto (valor) de equilíbrio.

Outro aspecto importante em nosso presente estudo é a chamada ***Sobreelevação*** - uma característica que é normalmente especificada nos sistemas e que deve ser obedecida na elaboração do projeto. A ***Sobreelevação*** corresponde basicamente ao máximo desvio a que esta sujeita a variável controlada, quando de uma eventual instabilidade. A figura 5 apresenta um **controle proporcional** hipotético ilustrando o seu comportamento para diferentes ganhos proporcionais.

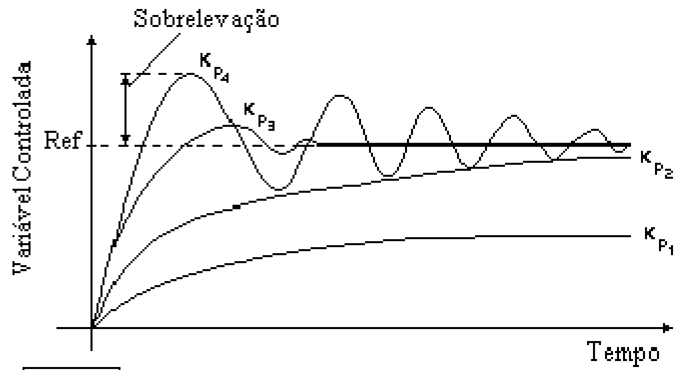


Fig 5

Observe que quando o ganho aumenta, a instabilidade também aumenta, da mesma forma que a ***Sobreelevação***, e, quando o ganho diminui, nunca é alcançado o valor de referência. Percebemos que para esse caso existe um dilema em aumentar ou diminuir demais o ganho proporcional.

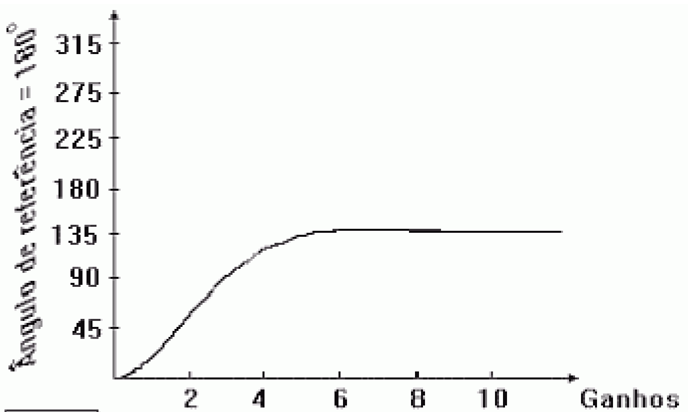


Fig 6

Em certos sistemas que não apresentam características oscilatórias, a não ser para ganhos muito altos, encontramos **controles** do tipo **proporcional simples**, com ganho elevado, para compensar o efeito do erro proporcional. A vantagem desses sistemas é que o projeto se torna muito simples e não requer grandes ajustes e calibrações no momento de colocá-lo em funcionamento. Em posição, há sistemas que podem ser controlados por efeito proporcional, exceto se o ganho for muito baixo o que determina grande margem de erro e tempo elevado para que o valor alcance a referência.

Para tornar o nosso estudo ainda mais completo, anexamos na primeira parte desta série um programa em BASIC (programa 1), que pode ser facilmente transportado para qualquer tipo de computador, sem grandes alterações, e que pode simular o canhão para o **controle proporcional**. Todas as suas linhas estão comentadas e o nome das variáveis é idêntico aos utilizados para explicar as equações do nosso sistema. A partir da posição de referência, e também do ganho proporcional ele pode gerar os valores da posição que o canhão vai ocupar em cada instante de tempo.

Para que os resultados possam ser compactados, além de deixar mais claras as conclusões, traçamos gráficos correspondentes aos pontos fornecidos pelo programa. A figura 6 apresenta o nosso sistema com um ganho proporcional 10. Observe que o canhão demora muito tempo para alcançar o valor da referência.

Elevamos então o ganho proporcional para 100 (figura 7) e o sistema começa a se tornar instável, embora apresente maior velocidade para responder ao comando que no caso anterior. Note que para este caso, o erro proporcional já é muito menor em comparação com o caso anterior.

Para verificarmos as oscilações, delineamos um outro exemplo com ganho proporcional mais alto, ou seja: Kp = 500 (figura 8). Neste caso, a oscilação foi completa e o sistema nunca mais voltará ao equilíbrio.

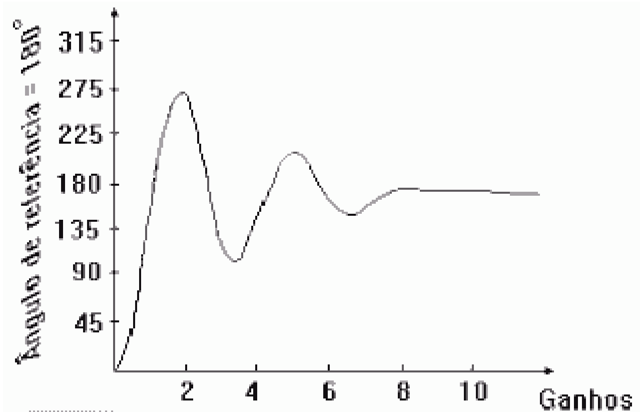


Fig 7 P=100 I=0 D=0

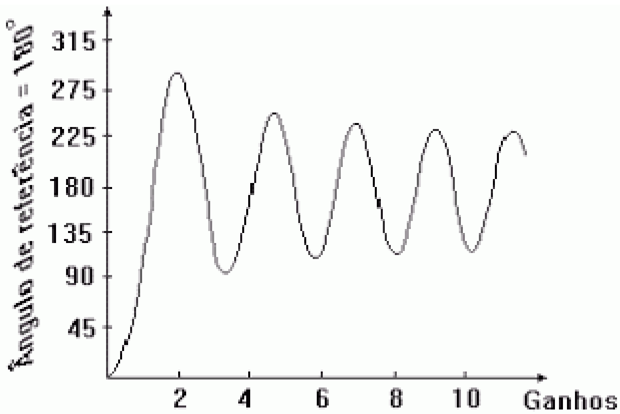


Fig 8 P=500 I=0 D=0

Uma oscilação desta natureza é geralmente muito dispendiosa em se tratando de sistemas industriais e, ás vezes, chega a ameaçar a máquina com danos irreparáveis. Para tornar isto mais visível imagine uma máquina de cortar jornal onde a tração deve ser constante, pois em caso de oscilação, ela rasgará o papel, parando toda a produção.

Na prática sempre deparamos com sistemas estabilizados, onde o ganho proporcional atua para diminuir os erros e tornar o sistema linear em relação á entrada de controle.

Casos como este aparecem em controles de temperatura simples, controle de velocidade e até mesmo em controles de conjugado: Observe pelas figuras 6, 7 e 8 que, a medida que aumenta o ganho proporcional, diminui o erro de posição ampliando-se a condição de instabilidade do sistema.

Há um outro problema que embora não apareça nas figuras, é comum em sistemas com **controle tipo proporcional**. Ele pode ser facilmente entendido observando-se o exemplo a seguir: imagine uma situação em que o nosso canhão tenha que acompanhar um objeto em movimento para tentar alvejá-lo. Os sistemas dotados simplesmente **controle proporcional** não possuem essa característica, uma vez que jamais atingem exatamente um alvo, mesmo em condições de estabilidade. A forma de eliminar esses problemas consiste no uso das outras parcelas **PID**, que estabilizam o sistema, tornando-o rápido e preciso.

Convém lembrar que estas formas de estabilização são muito ligadas á estrutura do sistema e, normalmente, podem parecer como, por exemplo, segundas derivadas, erro de derivadas etc. Estes casos são particulares e, geralmente aparecem, para realçar efeitos da estabilização das parcelas **PID**.

Integrativo

O segundo termo que aparece no **PID** é o ganho integrativo. Este termo vem da operação matemática de cálculo, denominada integral. Esta nada mais é que uma série de acumulações do valor de uma determinada função entre dois limites pré-fixados.

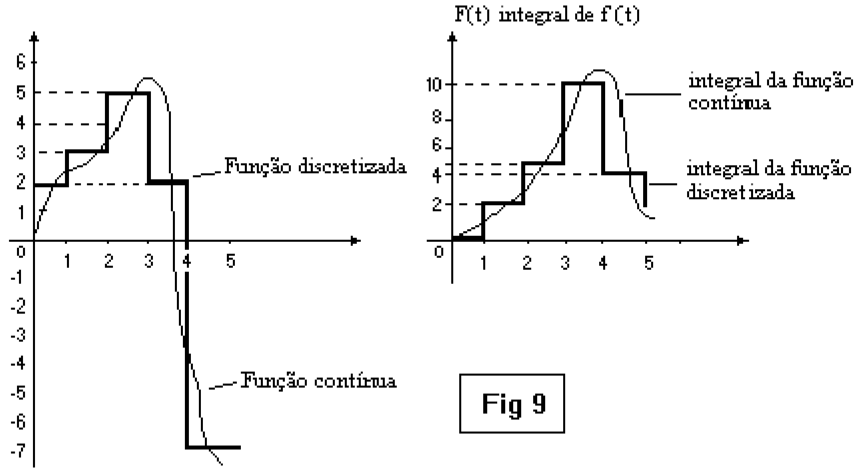


Fig 9

Assim, imagine uma determinada função que apresenta valores 2,3,5,2,4 para instantes de tempo sucessivos. Neste caso, a integral desta função corresponde a soma dos seus próprios valores a cada intervalo de tempo. Portanto, a integral equivaleria a 0, 2, 5, 10, 12, 5 para cada instante de tempo correspondente aos instantes da função. Neste caso, ela é discreta (figura 9), mas, se fosse contínua, a somatória seria instantânea levando em conta a variável tempo. O **controle integrativo** é encarado da mesma forma que proporcional, porém nesse caso a proporcionalidade é a integral do erro ou desvio entre a variável controlada e a de referência.

Este tipo de parcela de controle é muito eficiente na estabilização e também na eliminação do erro de posição que havia no caso de controle puramente proporcional. O **controle integrativo**, devido a condição de acumulação de todos os erros anteriores exerce um papel de filtro, pois evita alterações quando a variável controlada está próxima de seu valor de referência.

Quando o erro é pequeno, o **controle proporcional** com ganho muito alto, tenta corrigir pequenas discrepâncias em relação a referência, porém este efeito causa oscilações, como já vimos na figura 8. No caso do **controle integrativo** ser adicionado a variável controladora, há o surgimento de pequenas contribuições causadas pela acumulação destes pequenos erros.

Estas tornam-se importantes, face aos pequenos sinais provocados pelo **controle proporcional**, e tendem a reduzir o erro gradativamente, até que sua integral chegue á um valor nulo. Talvez esta seja a contribuição mais importante de **controle integrativo**, pois quando a integral do erro for muito pequena, o erro de posição será igualmente muito pequeno.

Outra característica muito importante deste controle é que o erro causado pelo movimento da referência é também bastante amortecido, embora não eliminado por completo. As figuras 1 e 2 do anexo A mostram os gráficos obtidos através do programa 2. Nelas os gráficos incluem um ganho integrativo para o **controle simplesmente proporcional**. É interessante rever o programa 1 e comparar com o 2, observando a existência de poucas diferenças entre eles uma vez que realizamos a operação de integração e somamos esta parcela de controle a tensão de alimentação do motor.

Observe que os resultados não são mais os mesmos para um ganho proporcional 10, onde anteriormente não conseguíamos alcançar o valor de referência em tempo hábil, com **controle integrativo** de ganho 1. Para os casos de ganho proporcional 100 e integrativo 1 o sistema revela uma maior tendência para a instabilidade, pois o **controle integrativo** começa a realçar os erros, tornando o sistema cada vez mais oscilatório.

Mesmo assim, quando o ponto de equilíbrio é alcançado, ficam excluídos os erros de posição, o que já melhora as características. A característica de elevação das instabilidades sempre existe no sistema que contém parcelas diferentes da proporcional. Na realidade, tanto o **controle integrativo** como o **derivativo**, que vamos estudar adiante, tem funcionamento restrito em certa faixa de características do sistema. O fato de que neste nosso sistema exemplo, o **controle integrativo** interfere de maneira a propiciar os efeitos de instabilidade, mas, quando o valor está próximo da referência, a atuação do controle passa a ser evidenciada em relação as outras parcelas. Assim, o efeito de filtragem que comentamos anteriormente assegura uma maior estabilidade em torno do valor de referência. Cada sistema tem um determinado jogo de ganhos no **PID** e, ás vezes, há casos em que a faixa de ajuste de ganhos é muito restrita, de modo que, quando o sistema não está bem ajustado, ele tende a oscilar ou apresentar instabilidades nas transições mais bruscas.

Derivativa

Nos sistemas de controle industrial,normalmente são utilizadas seis ações básicas de controle:

- Duas posições ou ON/OFF;
- Proporcional (P);
- Integral (I);
- Proporcional + Integral (PI);
- Proporcional + DerIvativa (PD);
- Proporcional + Integrativa + Derivativa (PID).

No estudo das características básicas de cada uma destas ações, já detalhamos as quatro primeiras, faltando apenas o estudo mais aprofundado do termo derivativo. As características básicas das ações já abordadas são relembradas a seguir:

ON/OFF

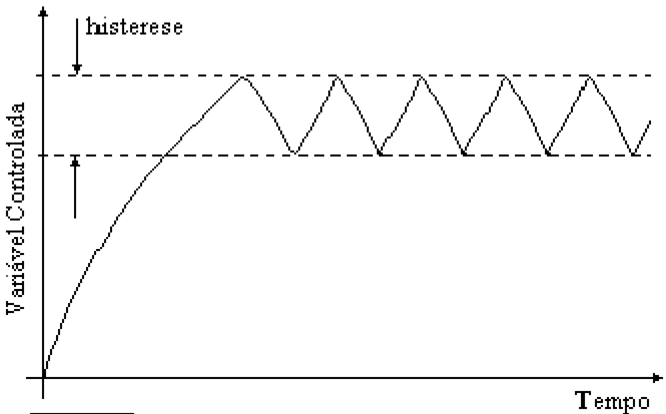


Fig 10

Quando a variável controlada alcança um valor pré-estabelecido, a variável controladora é desligada, e quando ela atinge um valor limite, a controladora é novamente ligada. Este tipo de controle apresenta constantes ligamentos e desligamentos, o que geralmente reduz a sua vida útil, além de apresentar uma histerese diferencial que nem sempre pode ser aceita como funcional para os sistemas mais críticos (Figura 10).

Proporcional

É a mais simples de todas as ações de controle e por isso seu uso é bastante comum nos ambientes industriais. Sua limitação básica esta na incidência do chamado erro proporcional, que só pode ser diminuído com o aumento do ganho proporcional o que muitas vezes implica oscilações no sistema.

Integral

Esta ação dificilmente é utilizada de forma única, estando quase sempre acompanhada de proporcional. Ela realiza basicamente uma função acumulativa do erro existente e propicia a sua anulação, após um determinado tempo de funcionamento.

Geralmente denominada ação de restabelecimento, a integral funciona como um filtro para as altas variações que ocorrem no sistema. Ela normalmente apresenta baixa velocidade (taxa de restabelecimento) de atuação. A figura 11 contém dois diagramas que mostram um degrau na variável controlada e de que forma se altera a variável controladora nas ações proporcional, integral, integral+ proporcional.

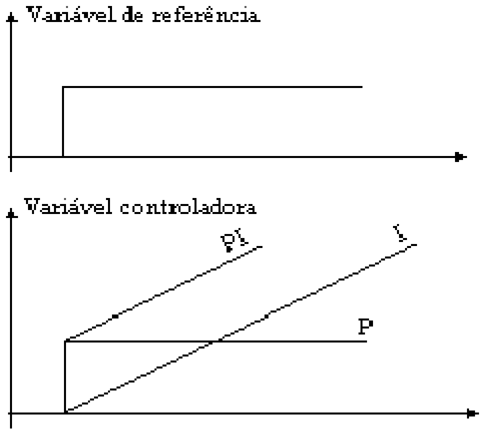


Fig 11

Derivativa

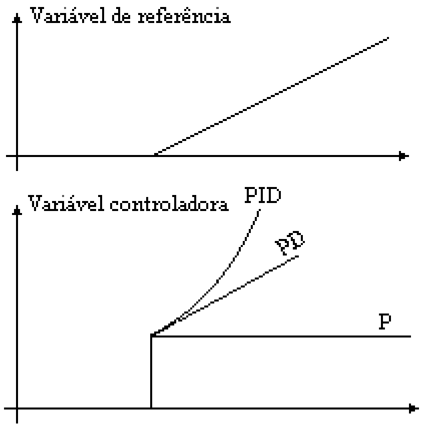


Fig 12

Costuma ser denominada ação de taxa ou controle de taxa, pois atua diretamente na taxa de crescimento da variável controlada. Esta ação é proporcional a derivada do erro existente entre a variável controlada e a de referência.

Em nosso exemplo de canhão (controle de posição), a variável controlada corresponde a posição, enquanto a de referência equivale a posição dada pela mira do canhão. O erro consiste no desvio entre as grandezas. A derivada do erro representa em termos gerais a velocidade de crescimento do mesmo, ou, em caso de valores negativos, a sua taxa de queda. A figura 12 representa o diagrama da variável controlada, sofrendo um desvio da posição de referência em forma de rampa; mostra ainda como esta variável se comporta no tempo.

Observe que, na ação proporcional, a variável controladora cresce na mesma razão que a rampa. Com a ação derivativa aparece um degrau e, em seguida, um crescimento quadrático na ação do **PID**. Como é possível constatar, a ação de controle derivativa tem a enorme vantagem de predizer as variações, operando antecipadamente a variável controladora (degrau). O **controle proporcional** tem a vantagem de ser antecipatório, mas apresenta um problema: a amplificação dos sinais de ruído, que provoca o efeito de saturação ou oscilações. Outra observação importante é que esta ação nunca pode atuar sozinha, pois só causa efeitos durante as variações ou transitórios.

Um exemplo

Para melhor compreendermos os efeitos analisados anteriormente, vamos estudar um sistema próximo do real, ou seja, o nosso canhão. Consideremos inicialmente, o terceiro programa que está no início deste artigo.

Veja que levamos em consideração a ação derivativa e portanto, os resultados obtidos são por ela caracterizados. O ideal para uma comparação é que o leitor verifique como eram os resultados sem a ação derivativa. Iniciamos o processo de inclusão do termo derivativo com um ganho de 10 e, a seguir colocamos um ganho de 20 e 50. Observe que a cada elevação, registramos uma melhora da resposta ao degrau, e que, temos ganho 50, elevamos então o ganho proporcional para melhorar o erro proporcional. Em caso de se observar uma maior oscilação inicia-se novamente o processo de incremento no ganho derivativo até obter um resultado satisfatório com os ganhos proporcional 500, integral 10 e derivativo 200 (veja Anexo C). O processo de ajuste fino é o que completa o processo de ajuste do controle até que o resultado seja totalmente satisfatório. Compare os primeiros resultado com os conseguidos até agora e verifique a sensível melhora que obtivemos. O tempo de atraso no ajuste do canhão ficou muito pequeno e agora só é limitado pela velocidade máxima que o motor pode atingir. Este processo de ajuste que fizemos (simulados) é empregado normalmente nos **controladores PID** que existem nas indústrias, sendo que neles o ajuste é efetuado em campo, pois suas características dependem em grande parte do sistema dinâmico no qual esta acoplado o motor. Esta ação de controle é normalmente empregada em qualquer tipo de sistemas, desde os elétricos, como motores e geradores, até os hidráulicos; como atuadores e servoválvulas. A ação básica é sempre a mesma; o que muda é a forma como o sistema aparece.

Compensação do sistema

Cabe agora fazer uma pergunta: O sistema está bem compensado ou não ?

Na maioria dos casos práticos, as características de desempenho são especificações no tempo, ou seja, sistemas com armazenamento de energia não podem responder imediatamente, tendo suas respostas transitórias sempre sujeitas a perturbações.

Normalmente, estipula-se um dos três tipos de entrada ou perturbação: Impulso, degrau e rampa. A resposta ao impulso é muito interessante pois podemos provar matematicamente que ela representa a função de transferência de um dado sistema. Assim, quando temos que compensar um sistema que não conhecemos completamente, utilizamos a resposta ao impulso para levantar todas as suas características.

A grande dificuldade é obter um impulso, já que este deve ter amplitude infinita e duração nula - e isto nunca é possível, o que causa certas discrepâncias que só aparecem para determinados sinais de entrada.

A resposta à rampa apresenta a mesma dificuldade, pois não conseguimos criar uma rampa que seja infinita, e isso atrapalha na hora da coleta dos resultados de saída. Na grande maioria das vezes, utilizamos como sinal de entrada o degrau, já que ele pode ser criado facilmente e ainda existe a possibilidade de conhecermos as outras respostas, através de um processo matemático de cálculo.

As especificações da resposta de um sinal degrau são tempo de atraso, tempo de subida, instante do pico, sobre-sinal máximo e tempo de acomodação. Estas especificações estão definidas graficamente na figura 13. Normalmente, elas são conceituadas da seguinte forma:

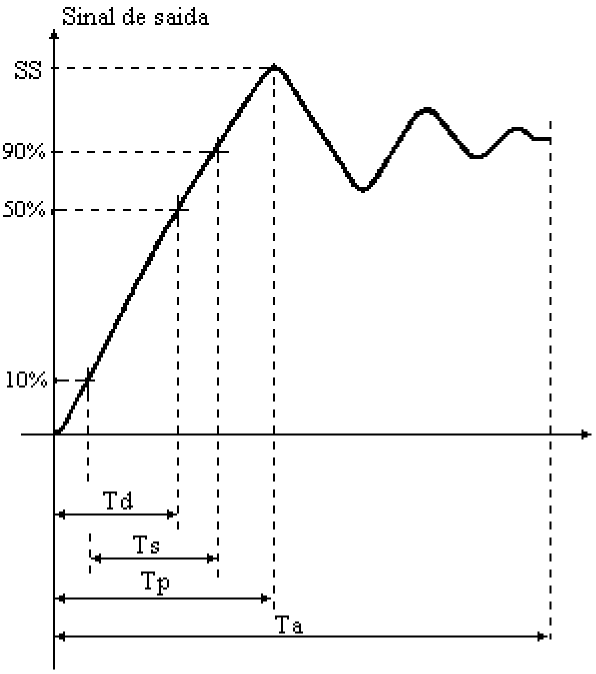


Fig 13

- **tempo de atraso** (*Td*):tempo necessário para a resposta alcançar pela primeira vez a metade do valor real;

- **tempo de subida** (*Ts*): tempo necessário para a resposta passar de 10 a 90% do seu valor final;

-**instante do pico**(*Tp*):tempo necessário para a resposta alcançar pela primeira vez o pico de sobre-sinal;

- **sobre-sinal** (*SS*):é o máximo percentual que a resposta alcança em relação ao sinal real;

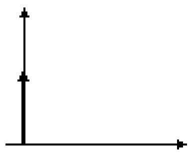
- **tempo de acomodação** (*Ta*):tempo necessário para o sinal de resposta acomodar-se no seu valor real.

O critério de definição destes parâmetros é estabelecido com base no sistema com que você irá trabalhar. Há casos em que as folgas são grandes, e assim estes valores tem maior liberdade de ação. Em outras situações não pode existir nenhuma variação e o sistema deve ser muito rápido, exigindo um trabalho mais aprimorado de controle.

Critérios de qualidade

Quando desejamos analisar a qualidade de um sistema aplicamos certos sinais na sua entrada e observamos a saida. Estes são normalizados.

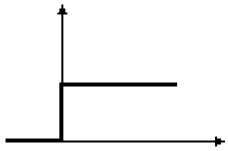
a) Entrada Impulsiva:



t=0

$r(t) = \delta(t) \Rightarrow R(S) = 1$

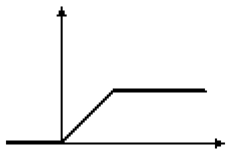
b) Degrau:



t=0

$r(t) = H(t) \Rightarrow R(S) = \frac{k}{S}$

c) Rampa:



t=0

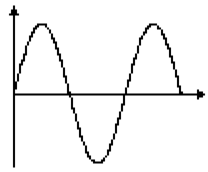
$r(t) = t\,H(t) \Rightarrow R(S) = \frac{1}{S^2}$

d) Parábola:

t=0

$r(t) = t^2 H(t) \Rightarrow R(S) = \frac{2}{S^3}$

e) Senóide:

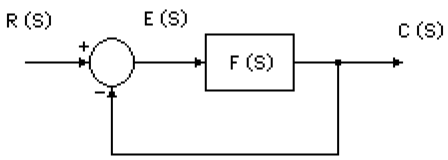


t=0

$r(t) = H(t)\,\mathrm{Sen}(\omega t) \Rightarrow R(S) = \frac{\omega}{S^2 + \omega^2}$

Qualidade de Sistemas de 1º Ordem

Dado o sistema:



1- Determinar a FTMA;

2- Determinar o pólo;

3- Determinar E(S) considerando R(S) como degrau $\Rightarrow R(S) = \frac{1}{S}$

4- Calcular o erro de regime permanente:

$$e_{RP} = \lim_{S \to 0} S.\,E(S)$$

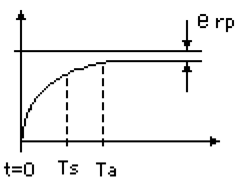
5- Calcular o tempo de subida

$$T_S = \frac{2,2}{|\text{pólo}|}$$

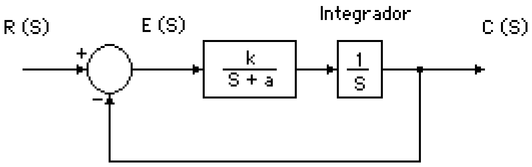
6- Calcular o tempo de acomodação:

$$T_a = \frac{3}{|\text{pólo}|}$$

7- Traçar o gráfico:



Qualidade de Sistemas de 2º Ordem



Colocando um integrado na saida de F(S) conforme podemos ver na figura acima melhoramos o performance do sistema. F(S) pode ser expressa genericamente por:

$$F(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\,\omega_n\,S + \omega_n^2}$$

onde : ζ = Fator de amortecimento;

ω_n = Frequencia angular não amortecida;

Note que a saida é obtida de:

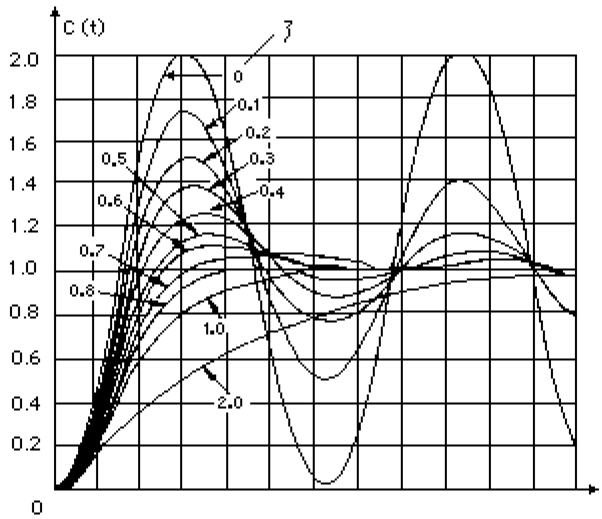
$$\frac{k}{S + a} \cdot \frac{1}{S} = \frac{k}{S^2 + a\,S}$$

que por comparação resulta:

$$2\zeta\,\omega_n = a$$

$$\omega_n^2 = k$$

e que é dependente de (csi). ζ



Caso onde ζ > 1 (Sobreamortecido)

1- Determinar a FTMA;
2- Determinar o pólo;
3- Determinar E(S) considerando R(S) como degrau $\Rightarrow R(S) = \frac{1}{S}$
4- Calcular o erro de regime permanente:

$$e_{RP} = \lim_{S \to 0} S.\,E(S)$$

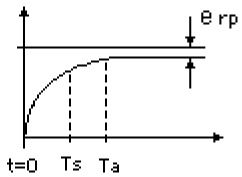
5- Calcular o tempo de subida

$$T_S = \frac{2,2}{|\text{ pólo menor }|}$$

6- Calcular o tempo de acomodação:

$$T_a = \frac{3}{|\text{ pólo menor }|}$$

7- Traçar o gráfico:



Caso onde ζ =1 (Criticamente amortecido) [Pólos iguais]

1- Determinar a FTMA;
2- Determinar o pólo;
3- Determinar E(S) considerando R(S) como degrau $\Rightarrow R(S) = \frac{1}{S}$
4- Calcular o erro de regime permanente:

$$e_{RP} = \lim_{S \to 0} S.\,E(S)$$

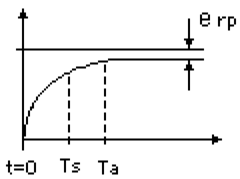
5- Calcular o tempo de subida

$$T_S = \frac{2,2}{|\text{ pólo menor }|}$$

6- Calcular o tempo de acomodação:

$$T_a = \frac{3}{|\text{ pólo menor }|}$$

7- Traçar o gráfico:



Caso onde $0 < \zeta < 1$ (Subamortecido)

1- Determinar a FTMA;
2- Determinar o pólo;
3- Determinar E(S) considerando R(S) como degrau $\Rightarrow R(S) = \frac{1}{S}$
4- Calcular o erro de regime permanente:

$$e_{RP} = \lim_{S \to 0} S.\,E(S)$$

5- Igualando-se o polinômio característico com a expressão $S^2 + 2\zeta\,\omega_n\,S + \omega_n^2$ obtemos:

$$2\zeta\,\omega_n = a$$

$$\omega_n^2 = k$$

de onde obtemos ζ e ω_n

6- Determinamos:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

$$\delta = \zeta\,\omega_n$$

7- Sobresinal:

$$SS = e^{-\left[\frac{\zeta}{\omega_d}\right]\cdot\pi}$$

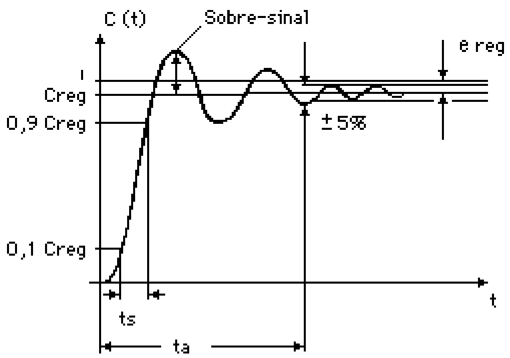
8- Tempo de subida:

$$T_S = \frac{1}{\omega_d}\,Tg^{-1}\left[\frac{\omega_d}{\delta}\right]\cdot\frac{\pi}{180}$$

9- Tempo de acomodação:

$$T_a = \frac{3}{\delta}$$

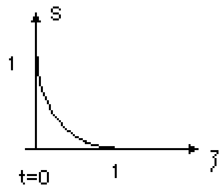
10- Traçar o gráfico:



11-Pólos complexos:

$$S_2 = -\delta - j\,\omega_d \quad e \quad S_1 = -\delta + j\,\omega_d$$

O comportamento do sobre-sinal em relação ao pode ser dado por:



Caso onde $\zeta = 0$ (Amortecimento Nulo)

$C(t) = 1 - \cos \omega_d t$

Mas como $\zeta = 0$ então $\omega_d = \omega_n$ e $C(t) = 1 - \cos \omega_n t$

que significa que este sistema oscila permanentemente com frequencia ω_n. Na prática estes sistemas não são utilizados por serem muito instáveis e não se conseguir um ponto estável próximo do regime permanente.

BIBO (Bounded Input Bounded Output)

Definição:Um sistema é estável se e somente se para qualquer entrada limitada aplicada ao sistema, sua saida for limitada. Assim, para analisar a estabilidade de um determinado sistema, temos que aplicar todas as entradas limitadas possíveis e observar que as saídas também são limitadas. Caso todas as entradas limitadas gerem saídas limitadas o sistema é **estável**. Caso uma, ou mais, saidas seja não limitada o sistema é dito **instável**.

TEOREMA:Um sistema é **estável** se e somente se todos os pólos estiverem contidos no semiplano esquerdo aberto, ou seja, os pólos reais devem necessariamente ser negativos (**-**) e em caso de pólos complexos a parte Real deve ser negativa (**-**), caso contrário o sistema é **instável**.

Exemplo:

$$F(S) = \frac{2}{S^2 + 6S + 8}$$

Cujas raízes são: -2 e -4 e portanto como ambas são negativas o sistema é **estável**.

Exemplo:

$$F(S) = \frac{1}{S^2 + 0{,}765\,S + 1}$$

Cujas raízes são: $-0{,}3825 + j\,0{,}924$ e $-0{,}3825 + j\,0{,}924$ e portanto como ambas as partes são negativas o sistema é **estável**.

Hurwitz

Definição:O critério de Hurwitz nada pode afirmar sobre a instabilidade de um sistema, somente sobre a sua Estabilidade. Assim, um sistema **pode** ser estável se, e somente se todos os coeficientes do polinômio característico tem o mesmo sinal e se nenhum deles for nulo (zero). Caso isto não ocorra, Hurwitz nada pode afirmar.

Exemplo 1:

$$F(S) = \frac{3S + 2}{S^3 - 2S^2 + 6S + 10}$$

Como este sistema apresenta um dos elementos do polinômio característico com sinal diferente dos demais, podemos afirmar que é **instável**.

Exemplo 2:

$$F(S) = \frac{3S + 2}{S^3 + 2S^2 + 6S + 10}$$

Como este sistema apresenta todos os elementos do polinômio característico com mesmo sinal dos demais, não podemos afirmar nada pelo critério de Hurwitz.

Exemplo 3:

$$F(S) = \frac{3S + 2}{S^3 + 2S^2 + 10}$$

Como este sistema não apresenta todos os elementos do polinômio característico embora todos os demais tenham o mesmo sinal, também, pelo critério de Hurwitz não podemos afirmar nada sobre sua estabilidade.

Note que o critério de Hurwitz serve apenas para afirmar uma **instabilidade visível**, porém **não pode** afirmar sobre estabilidade.

Routh

Definição: Todos os elementos da primeira coluna da matriz de Routh devem ter o mesmo sinal e serem diferentes de zero (0) até o n+2 termo (onde n é a ordem do sistema) para que o sistema seja **estável**.

Construção da matriz de Routh:

Dado o seguinte polinômio característico: $a_0Sn + a_1S^{n-1} + a_2S^{n-2} + a_3^{Sn-3} + ... + a_n$

Onde $a_{0,}a_{1,} a_{2,} a_{3\,,\,..}\, a_n$ são os coeficientes do polinômio. A matriz de Routh será:

$$\begin{bmatrix} a_0 & a_2 & a_4 & 0 & 0 \\ \boxed{a_1} & a_3 & a_5 & 0 & 0 \\ b_1 & b_3 & b_5 & 0 & 0 \\ c_1 & c_3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Onde:

$$b_1 = \frac{a_1 . a_2 - a_0 . a_3}{a_1}$$

$$b_3 = \frac{a_1 . a_4 - a_0 . a_5}{a_1}$$

$$c_1 = \frac{b_1 . a_3 - b_3 . a_1}{b_1}$$

e assim sucessivamente.

Exemplo 1:

$$F(S) = \frac{3}{S^3 + 3S^2 + 2S + 5}$$

A matriz de Routh será:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 5 \\ b_1 & b_3 \\ c_1 & c_3 \\ d_1 & d_3 \end{bmatrix} \quad \text{que devidamente calculada resulta:} \quad \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 5 \\ 1/3 & 0 \\ 5 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Coluna de Routh

E como podemos observar, todos possuem o mesmo sinal e nenhum deles é nulo, exceto o n+2 termo, mas este **não** é considerado para efeito de análise neste caso (nulo). E nessa situação o sistema é **estável**.

Exemplo 2:

$$F(S) = \frac{10\,(S + 1)}{S^3 + 8S^2 + 25S + 10}$$

Cuja matriz de Routh será:

$$\begin{bmatrix} 1 & 25 \\ 8 & 10 \\ b_1 & b_3 \\ c_1 & c_3 \end{bmatrix} \quad \text{ou} \quad \begin{bmatrix} 1 & 25 \\ 8 & 10 \\ 23{,}75 & 0 \\ 10 & \boxed{x} \end{bmatrix}$$

e o sistema é **estável.**

Exemplo 3:

$$F(S) = \frac{10}{S^3 + 3S^2 + 2S + 10}$$

Cuja matriz de Routh será:

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 10 \\ b_1 & b_3 \\ c_1 & c_3 \end{bmatrix} \quad \text{ou} \quad \begin{bmatrix} 1 & \boxed{x} \\ -1{,}333 & \boxed{x} \\ \boxed{x} & \boxed{x} \\ \boxed{x} & \boxed{x} \end{bmatrix}$$

e o sistema é **instável**, pois há diferença sinal.

Exemplo 4:

$$F(S) = \frac{10}{S^3 + 3S^2 + 2S + 10}$$

Cuja matriz de Routh será:

$$\begin{bmatrix} 1 & 12 & 10 \\ 3 & 20 & 0 \\ b_1 & b_3 & b_5 \\ c_1 & c_3 & c_5 \end{bmatrix} \text{ou} \begin{bmatrix} 1 & 12 & 10 \\ 3 & 20 & 0 \\ 5{,}33 & 10 & 0 \\ 14{,}375 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

e o sistema é **estável**.

Exemplo 4:

$$F(S) = \frac{10}{S^2 - 4}$$

Cuja matriz de Routh será:

$$\begin{bmatrix} 1 & -4 \\ 0 & 0 \\ b_1 & b_3 \\ c_1 & c_3 \end{bmatrix} \text{ou} \begin{bmatrix} 1 & -4 \\ 0 & 0 \\ 0 & \boxed{x} \\ \boxed{x} & \boxed{x} \end{bmatrix}$$

e o sistema é **instável**, pois há um elemento nulo que não é o n+2.

Exercícios:

1°)Um sistema de realimentação negativa tem uma FTMA igual a:

$$F(S) = \frac{k(S+5)(S+40)}{S^3(S+2)(S+100)+k}$$

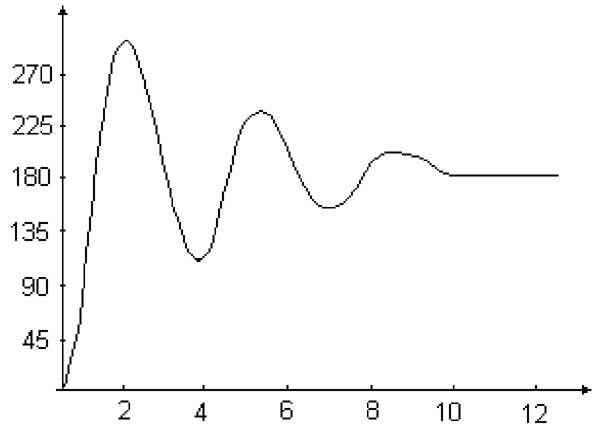
Determine pelo critério de Routh, para quais valores de **K** o sistema é estável.

2°)Um sistema de realimentação negativa tem uma FTMA igual a:

$$F(S) = \frac{k(S+2)}{S^3(S+4)-6k}$$

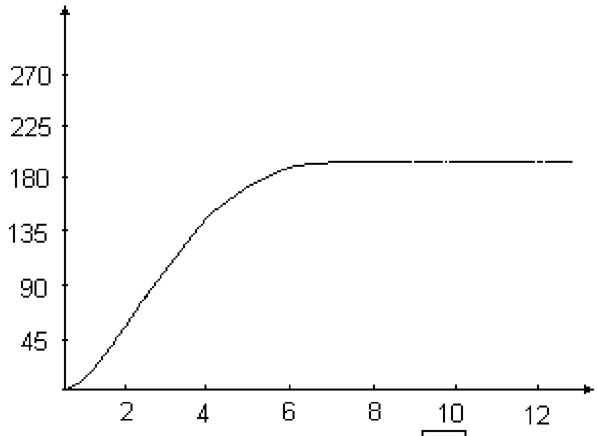
Determine pelo critério de Routh, para quais valores de **K** o sistema é estável.

Anexo A



T(S) = Ganhos P10 I1 D0

Fig1



T(S) = Ganhos P100 I10 D0

Fig2

Anexo B

```
10  REM ****** PROGRAMA 1 ******
20  REM Simulacao de um sistema
30  REM Joao Jose Mucciolo
40  REM CONTROLE PROPORCIONAL
50  REM ************************
60  REM 14/08/85   N. ELETRONICA
70  REM CONSTANTES
80  KM=.2:K0=.1:K1=.005:R=10
90  DT=.1
100 GOSUB 360:REM ENTRA A       REFERENCIA
110 REM INICIA OS CALCULOS
120 REM calculo do erro
130 E=(TI -T)/100
140 REM tensao proporcional ao erro
150 V=KP*E
160 REM saturacao do gerador
170 IF V = 0 THEN 200
180 IF ABS (V)> 100 THEN V=100*ABS (V)/V
190 REM integral da velocidade (tposicao)
200 T=T+T1*DT
210 REM modelo do sistema
220 FOR J=1 TO 10
230 REM calculo da corrente
240 I=(V-KM*T1)/R
250 S=-1
260 IF T1=0 THEN S=0
270 IF T1>0 THEN S=1
280 REM calculo do conjugado e aceleracao (t2)
290 C=KM*I:T2=(C-S*K0)/K1
300 REM Integral da aceleracao (t1 velocidade)
310 T1=T1+T2*DT/10
320 NEXT J
330 PRINT “TM=“;TM,”ANG=“;T
340 TM=TM + DT
350 GOTO 110
360 REM REFERENCIA
370 HOME
380 INPUT “ANGULO DE REFERENCIA”;TI
390 INPUT “KP =“;KP
400 RETURN
```

```
10  REM ****** PROGRAMA 2 *******
20  REM Simulacao de um sistema
30  REM Joao Jose Mucciolo
40  REM CONTROLE PROP+INTEGRAL
50  REM *************************
60  REM 14/08/85   N. ELETRONICA
70  REM CONSTANTES
80  KM=.2:KO=.1:K1 = .005:R=10
90  DT=.1
100 GOSUB 380:REM ENTRA A REFERENCIA
```

```
110 REM INICIA OS CALCULOS
120 REM calculo do erro
130 E=(TI-T)/100
140 REM calculo da integral do erro
150 IE=IE+DT*E
160 REM tensao proporcional ao erro e integral do erro
170 V=KP*E+KI*IE
180 REM saturacao do gerador
190 IF V=D THEN 220
200 IF ABS (V) > 100 THEN  V=100*ABS(V)/V
210 REM integral da velocidade (t posicao)
220 T=T+T1*DT
230 REM modelo do sistema
240 FOR J=1 TO 10
260 REM calculo da corrente
260 I=(V-KM*T1)/R
270 S=-1
280 IF T1=0 THEN S=0
290 IF T1>0 THEN S=1
300 REM calculo do conjugado e aceleracao (t2)
310 C=KM*I:T2=(C-S*K0)/K1
320 REM integral da aceleracao (t1 velocidade)
330 T1 =T1+T2*DT/10
340 NEXT J
350 PRINT “TM=“;TM,”ANG=“;T
360 TM=TM+DT
370 GOTO 110
380 REM REFERENCIA.
390 HOME
400 INPUT “ANGULO DE REFERENCIA”;TI
410 INPUT “KP =“;KP
420 INPUT "KI =“;KI
430 RETURN
```

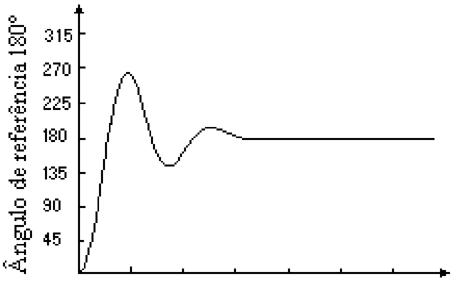
```
10  REM ****** PROGRAMA 3 ******
20  REM Simulacao de um sistema
30  REM Joao Jose Mucciolo
40  REM CONTROLE PROP+DERIVATIVO
50  REM ************************
60  REM 14/08/85   N. ELETRONICA
70  REM CONSTANTES
80  KM=.2:KO=.1:K1=.005:R=10
90  DT=.1
100 GOSUB 390: REM ENTRA A       REFERENCIA
110 REM INICIA OS CALCULOS
120 REM calculo do erro
130 E=(TI-T)/100
140 REM calculo da derivada do erro
150 DE=(E - EA)/DT
160 EA=E
170 REM tensao Proporcional ao erro e a derivada do erro
180 V=KP*E + KD*DE
190 REM saturacao do gerador
200 IF V=0 THEN 230
210 IF ABS(V)>100 THEN V=100*ABS (V)/V
220 REM integral da velocidade (t     posicao)
```

```
230 T=T+T*DT
240 REM modelo do sistema
250 FOR J = 1 TO 10
260 REM calculo da corrente
270 I=(V-KM*T1)/R
280 S=-1
290 IF T1=0 THEN S=0
300 IF T1>0 THEN S=1
310 REM calculo do conjugado e aceleracao (t2)
320 C=KM*I:T2=(C-S*KO)/K1
330 REM integral da aceleracao (t1 velocidade)
340 T1=T1+T2*DT/10
350 NEXT J
360 PRINT “TM=“;TM,”ANG=“;T
370 TM=TM+DT
380 GOTO 110
390 REM REFERENCIA
400 HOME
410 INPUT "ANGULO DE REFERENCIA"; TI
420 INPUT "KP =";KP
430 INPUT "KD =";KD
440 RETURN
```

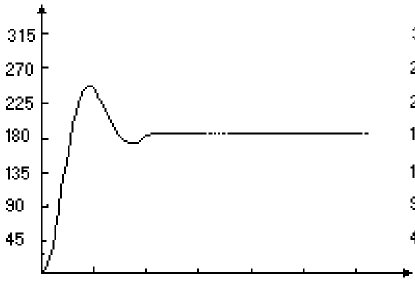
```
10  REM ****** PROGRAMA 4 ******
20  REM Simulacao de um sistema
30  REM Joao Jose Mucciolo
40  REM CONTROLE PROP+INT+DERIVA
50  REM ***********************
60  REM 14/08/85   N. ELETRONICA
70  REM CONSTANTES
80  KM=.2:KO=.1:K1=.005:R=10
90  DT=.1
100 GOSUB 410: REM ENTRA A       REFERENCIA
110 REM INICIA OS CALCULOS
120 REM calculo do erro
130 E=(TI-T)/100
140 REM calculo da integral do erro
150 IE=IE+DT*E
160 REM calculo da derivada do erro
170 DE=(E-EA)/DT
180 EA=E
190 REM tensao Proporcional ao erro e a integral do erro e derivada do erro
200 V=KP*E + KI*IE + KD*DE
210 REM saturacao do gerador
220 IF V = 0 THEN 250
230 IF ABS (V) > 100 THEN V=100*ABS (V)/V
240 REM integral da velocidade (t
   posicao)
250 T=T+T1*DT
260 REM modelo do sistema
270 FOR J=1 TO 10
280 REM calculo da corrente
290 I=(V-KM*T1)/R
300 S=-1
310 IF T1=0 THEN S=0
320 IF T1>0 THEN S=1
```

```
330 REM calculo do conjugado e aceleracao (t2)
340 C=KM*I:T2=(C-S*KO)/K1
350 REM integral da aceleracao (t1 velocidade)
360 T1=T1+T2*DT/10
370 NEXT J
380 PRINT “TM=“;TM,”ANG=“;T
390 TM=TM+DT
400 GOTO 110
420 HOME
430 INPUT "ANGULO DE REFERENCIA"; TI
440 INPUT "KP =";KP
450 INPUT "KI =";KI
460 INPUT "KD =";KD
470 RETURN
```

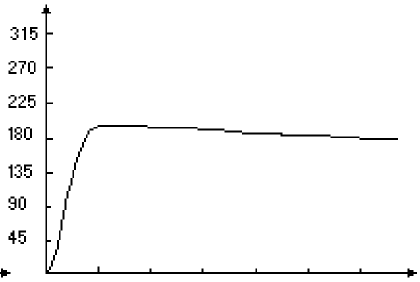
Anexo C



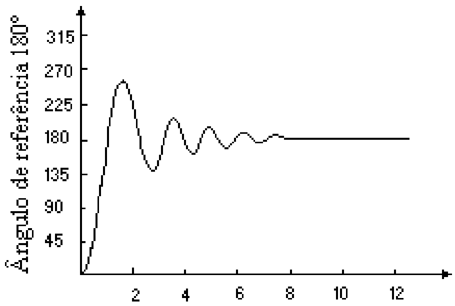
T(s) Ganhos P 100 I 10 D 10



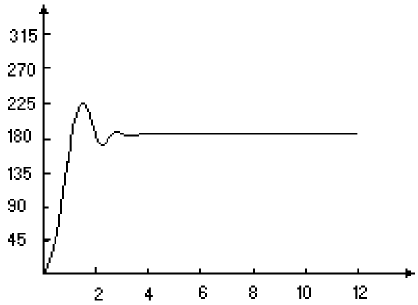
T(s) Ganhos P 100 I 10 D 20



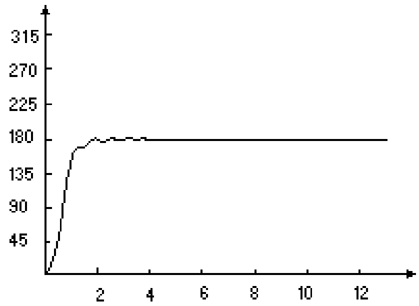
T(s) Ganhos P 100 I 10 D 50



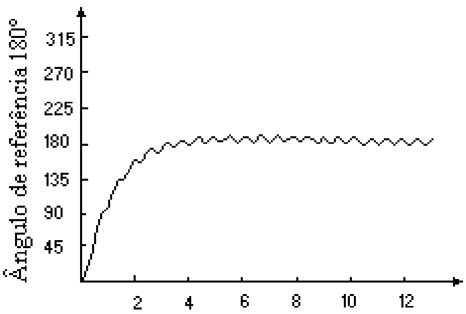
T(s) Ganhos P 500 I 10 D 50



T(s) Ganhos P 500 I 10 D 100



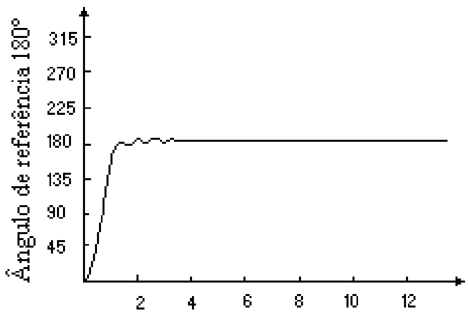
T(s) Ganhos P500 I 10 D200



T(s) Ganhos P 500 I 10 D 500

T(s) Ganhos P 500 I 0 D 180

T(s) Ganhos P 500 I 15 D 180



T(s) Ganhos P 500 I 20 D 190