

Teoria de Controle PID

Juliano Matias

Como controlar, por exemplo, a velocidade de um motor para que em regime de operação ele forneça sempre uma determinada rotação, independentemente da carga a ele acoplado? Ou, como podemos garantir que em um processo a temperatura de um material esteja independente de fatores externos a 250°C ? Vamos abordar, neste artigo, um tema amplamente utilizado em todas as áreas onde precisamos de um controle realmente preciso de uma determinada grandeza física, o controle PID.

Existem basicamente dois tipos de natureza de controle: os auto-operados e os operados por alguma energia externa.

Entre os auto-operados podemos citar o mais conhecido entre eles, o controle de nível por bóia, esse que existe em qualquer caixa d' água de nossas residências (**figura 1**). Seu princípio de funcionamento é muito simples: quando o nível do

reservatório está baixo a bóia não está acionada, fazendo com isso que o fluxo de água passe pela tubulação. Então, o nível de água vai subindo até que esta aciona a bóia cortando o fluxo de água. Eis uma forma clássica de controle de nível empregada desde a antiguidade até os dias de hoje.

Já os controladores baseados em energia externa podem ser dos tipos:

- Controlador pneumático;
- Controlador hidráulico;
- Controlador elétrico ou eletrônico.



Figura 1 - Controle de nível por bóia.

Resumindo o funcionamento deles, temos que uma grandeza precisa ser controlada (temperatura, nível, pressão, vazão, pH, velocidade, posição,...). Para manter essa grandeza sob controle precisamos de algumas informações:

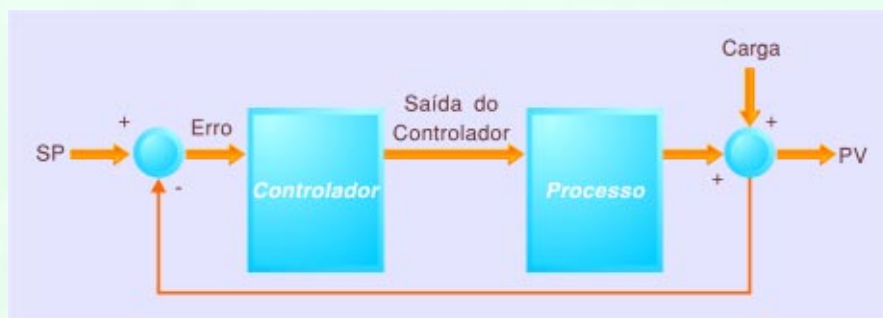


Figura 2 - Comparação entre o SP (valor desejado) e o PV (valor do processo).

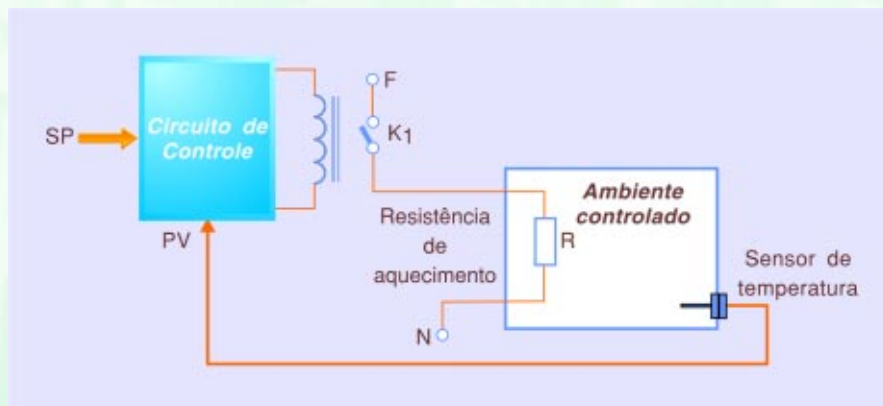


Figura 3 - Controlador ON-OFF.

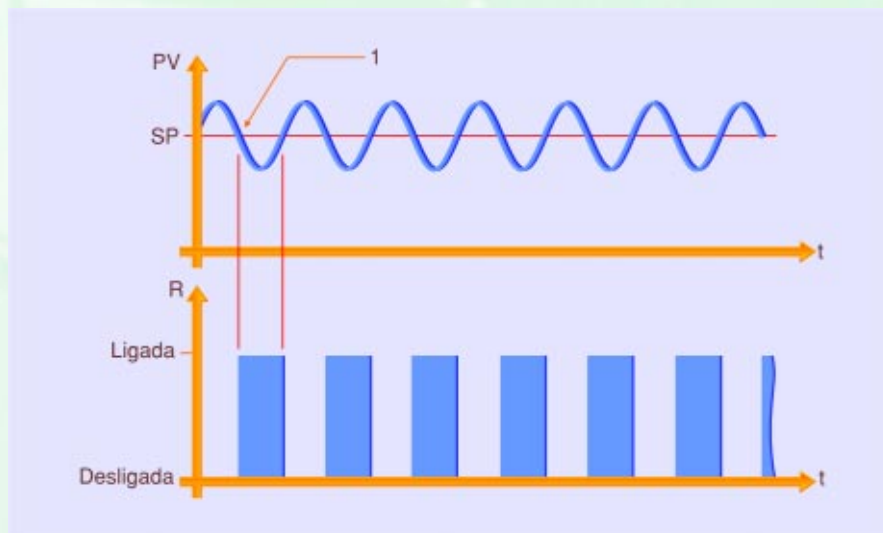


Figura 4 - Detalhamento do chaveamento de R pelo controlador ON-OFF.

- Valor desejado – *Set-Point* (SP);
- Valor real ou valor do processo (PV);
- Algoritmo de controle.

Com base nessas informações, o controlador compara o valor desejado (SP) com o valor do processo (PV) e determina, com base no algoritmo de controle,

o valor de correção na saída do controlador para que o valor do processo (PV) se aproxime do valor desejado (SP), conforme ilustra a **figura 2**.

Existem alguns algoritmos de controle que veremos com maiores detalhes, os quais podem operar individualmente ou trabalhar em conjunto, conforme a precisão esperada do controle e também conforme o processo:

- Controle ON-OFF;
- Controle com ação proporcional (P);
- Controle com ação integral (I);
- Controle com ação derivativa (D).

CONTROLE ON-OFF

É também conhecido com o o controle de “duas posições”, ou controle “liga e desliga”. O sinal de saída tem apenas duas posições que vão de um extremo ao outro, podendo ser: válvula aberta ou válvula fechada, resistência ligada ou resistência desligada, compressor ligado ou compressor desligado. Analisemos pela **figura 3** um controlador ON-OFF. Neste exemplo temos um ambiente com temperatura controlada: o valor desejado de temperatura é dado pelo SP, o valor atual de temperatura (PV) é medido por um sensor de temperatura (por exemplo, um termopar), a função do controlador é a de chavear a resistência tendo como parâmetro o valor de temperatura fornecido pelo sensor de modo que mantenha a temperatura no

valor determinado pelo SP dentro do ambiente. Vejamos agora, na **figura 4**, que no instante 1 a temperatura tende a ficar abaixo do SP, nesse instante a resistência R é ligada através do relé K1 com a função de elevar a temperatura até o valor do SP, porém, devido à característica do processo a temperatura

continua em queda durante algum tempo, antes de manifestar tendência ascendente.

O uso do controle ON-OFF é ideal em aplicações onde a variável a ser controlada possui um tempo de resposta lento. Alguns exemplos de controle ON-OFF:

- Estufas;
- Ar-condicionado;
- Ferro de passar roupa;
- Refrigeração de motores a combustão, entre outros.

CONTROLE PROPORCIONAL (P)

Em processos que requerem um controle mais suave que aquele fornecido pelo controlador ON-OFF, pode ser empregado o controle proporcional (P).

O controle proporcional fornece uma relação linear fixa entre o valor da variável controlada e o valor que o atuador de controle pode fornecer. Para ilustrar a ação de um controle proporcional, verifiquemos a **figura 5**. Este é um processo em que a temperatura de operação pode variar de 50°C a 550°C. O elemento controlador tem um raio de ação que fornece ao processo uma faixa de temperatura que vai de 150°C a 450°C. O ponto central é 300°C com uma faixa de controle de $\pm 150^\circ\text{C}$. Quando a temperatura está em 150°C ou menos, o elemento controlador é todo aberto. Quando a temperatura está entre 150°C e 450°C, o elemento controlador movimenta-se para uma posição que é proporcional ao valor da grandeza controlada. A 225°C o elemento controlador está 75% aberto, a 300°C está 50% aberto, a 375°C está 25% aberto e a 450°C ou mais o elemento controlador está 0% aberto, isto é, completamente fechado.

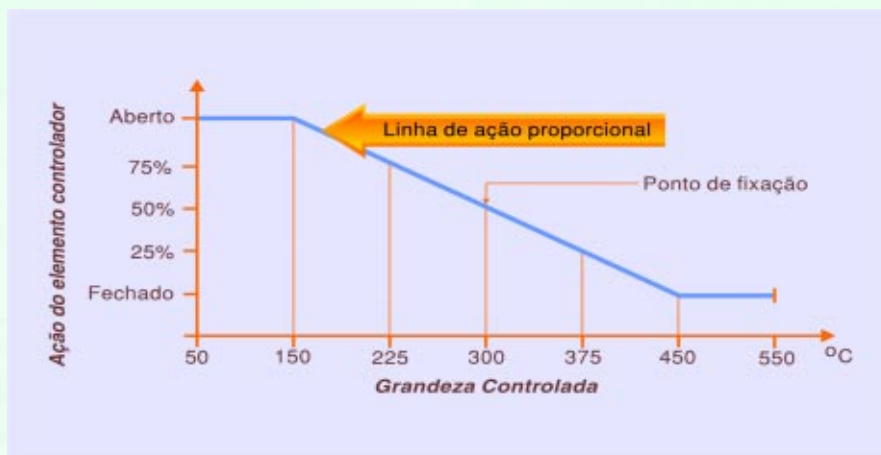


Figura 5 - Ação de um controle proporcional.

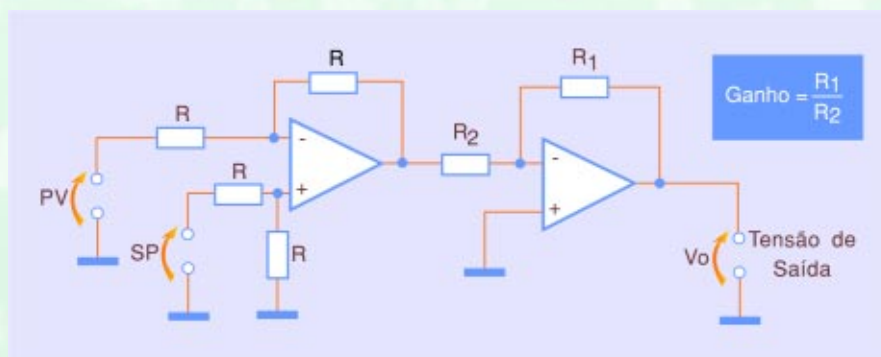


Figura 6 - Diagrama eletrônico de um controle proporcional.

Com isso temos que a faixa de valores é de 300°C, porém, esse número expressa uma porcentagem da faixa total de excursão da temperatura, que é de 500°C (50°C até 550°C), portanto temos que a faixa proporcional expressa 300°C/500°C, ou 60% de todo o alcance da escala.

Outra maneira de explicarmos o comportamento desse controlador é através do seu Ganho, que é a relação entre a porcentagem de variação do elemento controlador pela variação proporcional da grandeza. Assim temos:

$$\text{Ganho} = (\% \text{ de variação do elemento controlador}) / (\% \text{ de variação da grandeza})$$

No nosso exemplo, o ganho seria de: (100% no elemento controlador) / (60% de variação na grandeza) = 1,66.

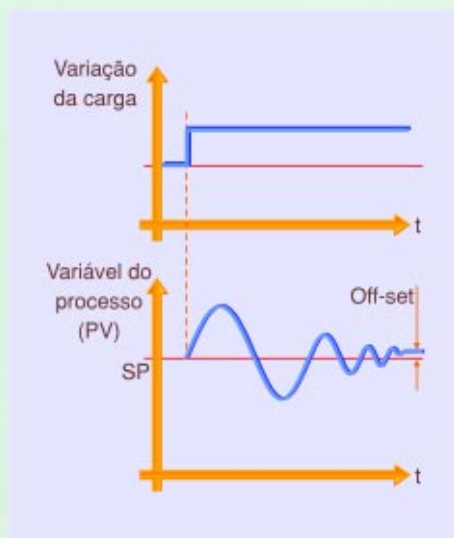


Figura 7 - Ilustração do off-set.

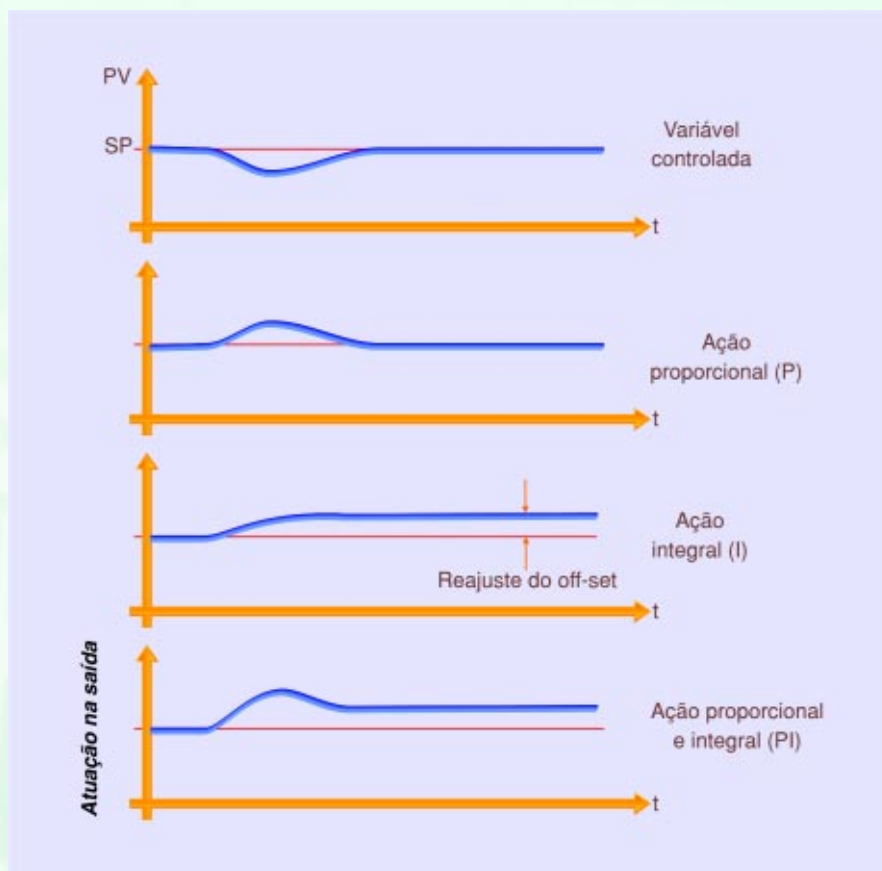


Figura 8 - Gráfico de um controle proporcional-integral (PI).

Podemos dizer então, que:

Faixa proporcional = $(100/\text{Ganho})$

Pensando eletronicamente, podemos visualizar um Controle Proporcional na **figura 6**, onde temos um circuito subtrator com Amplificadores Operacionais, no qual, calculamos primeiramente o erro entre o SP e o PV, e depois vem um amplificador onde amplificamos o erro para corrigir o valor PV alterado pelo processo. Nessa mesma figura podemos imaginar a seguinte situação: temos que controlar a velocidade de um motor e partiremos do princípio de que o motor está rodando na velocidade determinada pelo SP.

- Uma alteração na carga do motor implicará em uma variação da rotação e, conseqüentemente, em uma variação do valor do PV que, por exemplo, está sendo gerado por um tacogerador;
- Essa variação implicará em uma alteração de tensão na saída do subtrator, fazendo com que o cir-

cuito tente corrigir esse distúrbio alterando a tensão de saída que está acionando o motor;

- A alteração é proporcional ao erro e dada pelo ganho do circuito amplificador (R_1/R_2).

Porém, quando o circuito se estabiliza ele não se estabiliza no *set-point* (SP), e sim em um valor fora dele que é chamado de *off-set* (**figura 7**). Esse erro é uma característica do circuito proporcional e é maior quanto menor for o ganho do circuito, tornando-se menor à medida que aumentamos o ganho. Em contrapartida, quando aumentamos o ganho aumenta-se também a possibilidade de oscilações na variável do processo, portanto, esse é um parâmetro que deve ser muito bem otimizado no controlador.

Para a correção desse *off-set* existem em alguns controladores industriais um reajuste manual que soma ou subtrai do valor de saída um valor correspondente à eliminação do *off-set* (no nosso exemplo da **figura 6** o ajuste manual soma ou subtrai tensão).

CONTROLE INTEGRAL (I)

Quando se tem um sistema onde utilizamos um controlador proporcional, nas alterações da carga o reajuste do *off-set* deve ser feito de forma automática, e não manualmente como citado acima.

Integrando-se o valor do erro no tempo obtemos esse reajuste; na prática o controle integral é utilizado em conjunto com o controle proporcional formando o controle proporcional - integral, o PI, conforme mostram os gráficos da **figura 8**.

Podemos entender mais claramente visualizando um circuito eletrônico onde foi implementada uma ação proporcional com a ação integral. Observe as **figuras 9 e 10**.

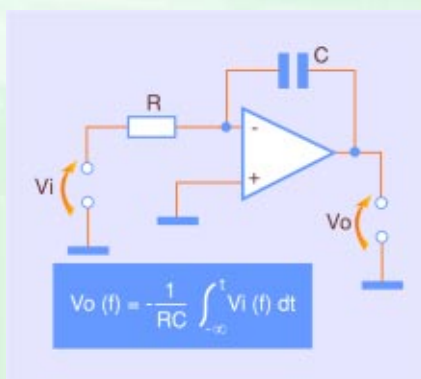


Figura 9 - Circuito integrador.

CONTROLE DERIVATIVO (D)

O ajuste derivativo aplica ao sistema uma correção proporcional à velocidade com que o desvio aumenta.

A ação derivativa associada com a ação proporcional (PD) resulta em uma correção antecipada a um desvio que ainda não aconteceu, podemos chamar também de supercorreção, conforme ilustram os gráficos da **figura 11**.

Após a grande correção inicial, o controlador começa a diminuir os seus efeitos deixando que as respostas proporcionais (com ou sem ação integral em conjunto) posicionem o elemento de controle final. Podemos verificar nas **figuras 12 e 13** uma combinação das ações proporcional e derivativa utilizando amplificadores operacionais.

eles são muito complicados, nem sempre estão disponíveis, e demandam um tempo muito grande de análise e, portanto, não são utilizados na prática.

Existem métodos mais simples de regulação de um controlador, principalmente utilizando gráficos de resposta de variáveis do processo.

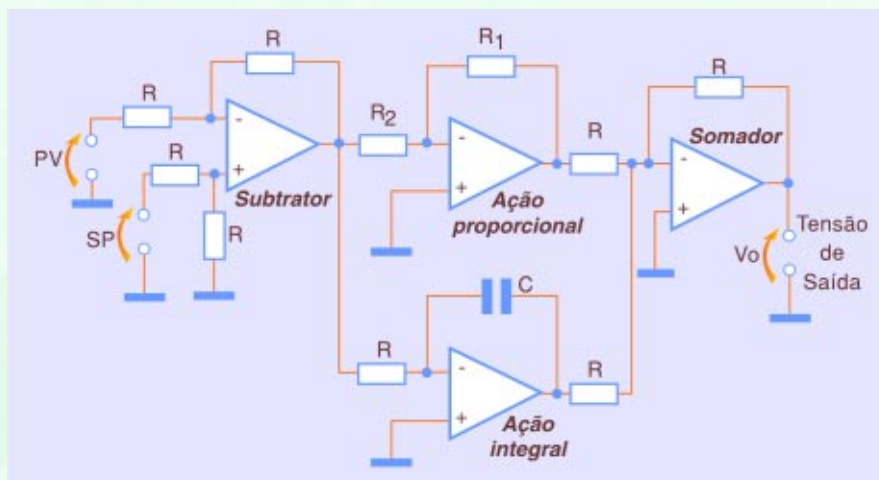


Figura 10 - Circuito eletrônico de um controle PI.

CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL E DERIVATIVO (PID)

Processos onde o tempo morto é elevado (da ordem de 2 minutos) e/ou retardos de processo são difíceis de controlar utilizando controles proporcionais com ação integral ou proporcionais com ação derivativa. Processos que tenham a faixa proporcional a ser posicionada extremamente ampla e onde o tempo de reajuste é bastante grande a fim de se evitar oscilações. O controle PID resolve esse problema. Podemos verificar um controle PID em sua forma eletrônica na **figura 14**.

OTIMIZAÇÃO DE CONTROLADORES PID

As condições de controle de um sistema PID podem ser estudadas utilizando algoritmos de controle integrais e diferenciais, porém,

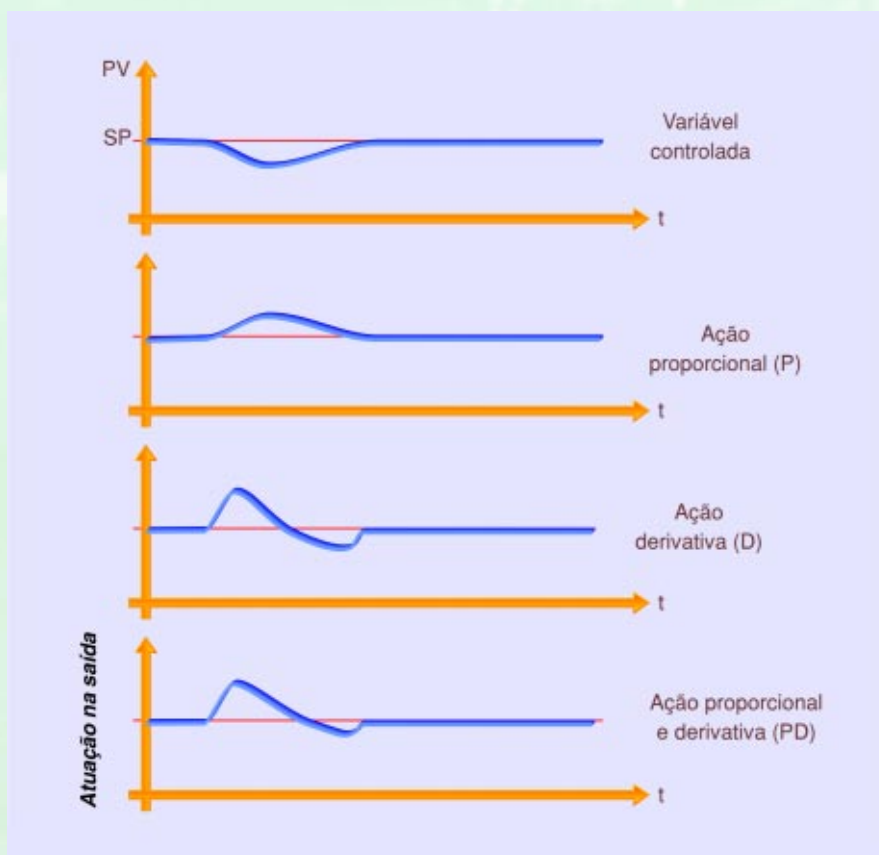


Figura 11 - Gráfico de um controle derivativo (D).

	Ganho Proporcional	Tempo Integral	Tempo Derivativo
Controle Proporcional (P)	$G_u/2$	-	-
Controle Proporcional e Integral (PI)	$G_u/2,2$	$1,2/P_u$	-
Controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID)	$G_u/1,7$	$2/P_u$	$P_u/8$

Tabela 1 - Equações de ajuste para controladores PID.

Em uma malha de controle o objetivo é alcançar a estabilidade no menor tempo possível. Um controlador bem ajustado é aquele que tem um caimento de $\frac{1}{4}$, como mostra a **figura 15**.

Método de otimização Ziegler-Nichols

O método de ajuste de controladores em malhas fechadas, mais conhecido e utilizado até hoje, foi desenvolvido em 1942 por J.G. Ziegler e N.B. Nichols, quando trabalhavam na empresa americana Taylor Instrument Company, da cidade de Rochester, Nova Iorque. Esse método, apesar de ser o mais antigo, ainda é o mais utilizado por instrumentistas e profissionais da área de controle de processos.

O método consiste em determinar um ganho chamado de ganho crítico (G_u) e um período chama-

do período crítico (P_u). Para isso, deve-se seguir alguns passos:

- Tira-se a ação integral e a ação derivativa do controlador, deixando apenas a ação proporcional;
- Mantém-se o controlador em modo automático em malha fechada;
- Ajusta-se o ganho do controlador em um nível baixo a fim de se evitar oscilações no sistema;
- Aumenta-se o ganho, passo a passo, até que a oscilação fique constante em amplitude e período, como ilustrado na **figura 16**;

Com base no ganho crítico e no período crítico os ajustes do controlador são calculados para um ajuste ideal do controlador.

Ziegler e Nichols observaram que em um controlador proporcional o ganho ideal é a metade do ganho crítico, isto é, $Ganho = G_u/2$ e, com esse ganho obtemos aproximadamente uma razão de caimento de $\frac{1}{4}$.

Através de testes, Ziegler e Nichols descobriram que as equações mostradas na **tabela 1** fornecem bons valores de ajustes para controladores PID. Deve ser observado que as equações são muito genéricas e existem várias exceções.

CONCLUSÃO

Cada tipo de controlador é aplicável a processos que têm certas combinações de características básicas. Ao se escolher um tipo de controlador, deve-se escolher um que atenda as necessidades de uma forma mais simples, sendo assim mais econômicas, por exemplo, a utilização de um controlador PID onde poderia muito bem ser utilizado um controle ON-OFF.

A FÁBULA DO REGULADOR PID E DA CAIXA D'ÁGUA

Achei a estória tão interessante que decidi incorporá-la ao artigo. Trata-se de uma fábula contada pela primeira vez aos professores da Universidade Técnica de Bruxelas.

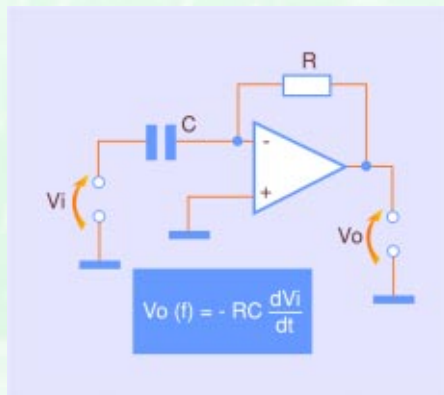


Figura 12 - Circuito diferencial ou derivativo.

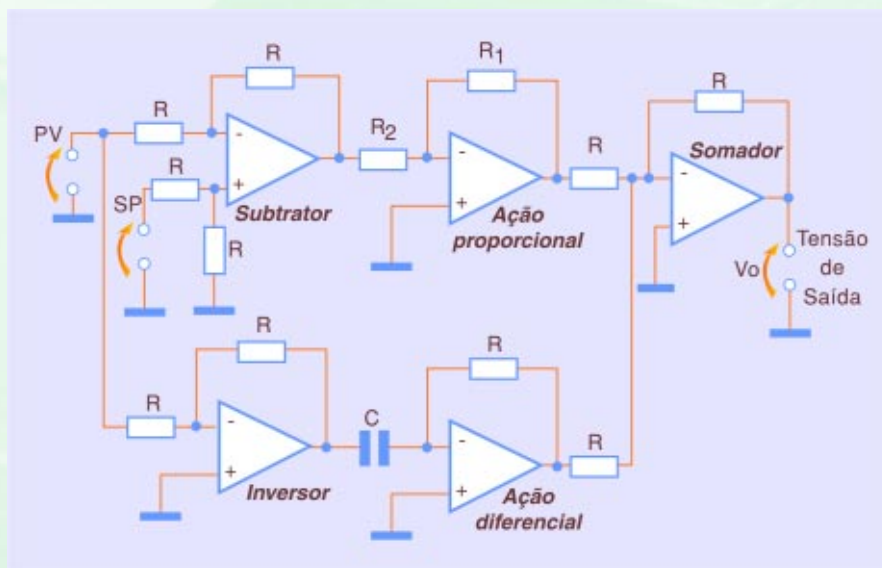


Figura 13 - Circuito combinando ações proporcional e derivativa.

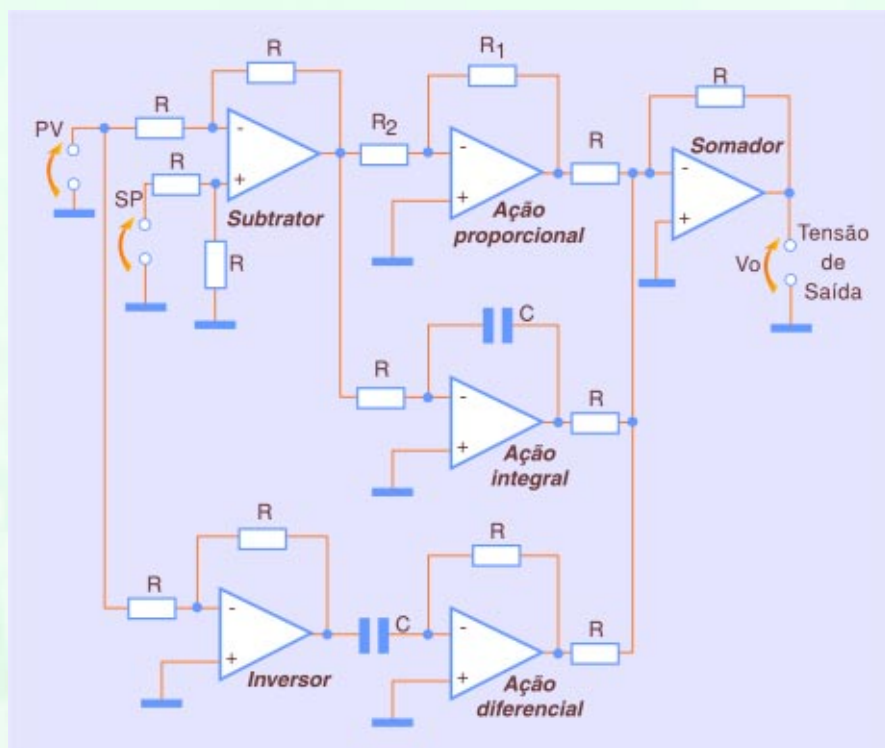


Figura 14 - Controle proporcional, integral e derivativo.

Era uma vez uma pequena cidade que não tinha água encanada. Mas, um belo dia, o prefeito mandou construir uma caixa d'água na serra e ligou-a a uma rede de distribuição. A ligação da caixa com o rio foi feita por meio de uma tubulação. Nessa tubulação colocou-se uma válvula para restringir ou aumentar a vazão. Faltava somente uma pessoa para acionar a válvula.

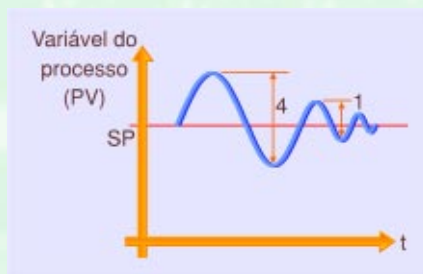


Figura 15 - Controlador com caimento de 1/4.



Figura 16 - Gráficos pelo método de otimização Ziegler-Nichols.

Enfim, foi empregado um velho sem quaisquer conhecimentos técnicos. Apesar disso, executou o seu serviço durante muitos anos, limitando-se a manter o nível d'água na caixa tão constante como podia, alterando a vazão sempre que necessário.

Quando o velho alcançou a idade da aposentadoria, os seus três filhos de nomes Isidoro, Pedro e Demétrio ofereceram-se para substituir o pai.

Cada um queria resolver a tarefa da maneira mais simples possível. Discutiram as possibilidades de instalar uma válvula acionada por bôia. Ou de um ventilo-eletropneumático, ou de um regulador hidráulico, etc...

Certo dia, em meio a essas discussões, apareceu um primo de visita à casa. Sendo esse, engenheiro, pediram-lhe a sua opinião quanto às idéias em discussão.

O primo pensou e, ao invés de apontar uma das alternativas como a melhor, perguntou qual a característica de função que possuíam os reguladores por eles idealizados.

Ficando os três irmãos um pouco desapontados, pois esperavam uma resposta mais concreta, o primo explicou: mais de um tipo de regulador poderá servir para solucionar o caso, desde que sua função obedeça as seguintes características principais:

1) Dando-se uma variação do valor desejado, o regulador deverá eliminá-la rápida e energicamente, restabelecendo o ajuste com exatidão.

2) Terá que alcançar esse ajuste sem provocação de oscilações no valor desejado, não influenciando assim outros valores que

dependam de qual está sendo regulado. (Ex: do nível de água depende a pressão na rede de distribuição).

Assim, no começo do dia, Isidoro, o filho mais velho, encontra-se no lugar do pai. É um rapaz simples, mas metódico. Quando nota que o nível d'água está 10 cm abaixo do nível desejado, pensa que o consumo aumentará. Por isso começa a abrir a válvula lentamente de maneira contínua, constatando ao mesmo tempo que, pouco a pouco, o nível abaixa mais devagar, depois se estabiliza e, enfim, começa a subir. No entanto, Isidoro abre a válvula ainda mais até que alcance o nível anterior. Pouco depois, Isidoro percebe que a água continua a subir, estando já acima do nível desejado. Por isso, só com a metade da velocidade Isidoro começa a fechar a válvula, restabelecendo pouco a pouco o nível exato. Mas, a água continua baixando. Assim, Isidoro vê-se forçado a repetir a sua manobra ainda algumas vezes sem que a água se mantenha no nível desejado.

Isidoro é a própria imagem integral de controle, cuja velocidade de ação é proporcional ao desvio. Isidoro acionará a válvula enquanto este existir, sem nunca alcançar estabilidade por ter a zona de regulação também comportamento integral.

Em termos matemáticos pode-se dizer que para um desvio "X" do valor regulado, a ação integral é uma manobra do órgão de controle, que pode ser representada pela fórmula:

$$= \int$$

Ao meio dia, Pedro substitui seu irmão Isidoro. Pedro possui o costume de calcular tudo que faz. Ele percebe logo que, quando o nível d'água se encontra 10 cm abaixo do nível desejado, deve dar 5 voltas ao volante da válvula no sentido de abertura para eliminar o desvio. Por outro lado, Pedro não se preocupa muito em voltar ao nível original, contentando-se em estabilizar o mesmo. Pensa consigo que este voltará à marca certa assim que diminuir o consumo na aldeia. Pedro descansa até constatar que o nível efetivo encontra-se 5 cm acima do desejado. Conforme seu cálculo, Pedro aciona o volante da válvula 2,5 voltas em sentido de fechamento, estabilizando assim o nível novamente.

Sua manobra é segura e rápida. Mas, quanto à exatidão, Pedro diz que somente é preciso conservar "aproximadamente" a pressão d'água para satisfazer as necessidades da sua cidade.

Pedro é a própria imagem da ação de controle proporcional, que pode ser representada pela fórmula:

$$=$$

Ao fim do dia, Demétrio toma conta do serviço. Demétrio é o mais sofisticado dos três irmãos. Não se preocupa somente com o valor do desvio, mas também com a velocidade com a qual este se altera. Caso a água desça rapidamente 10 cm abaixo do nível desejado, Demétrio dá de uma só vez 10 voltas no volante da válvula em sentido de abertura. Vendo depois que a água sobe devagar, fecha também devagar a válvula, e mais devagar quanto menor for a velocidade de aumento de nível, até chegar progressivamente à abertura inicial. Caso a água ultrapasse o nível desejado por 5 cm, Demétrio executa a mesma manobra de antes, porém em sentido contrário e, além disso, 50% menos acentuado.

Demétrio é a própria imagem da ação diferencial, cujo valor é diretamente proporcional ao grau do desvio e inversamente proporcional à duração deste, podendo ser representada pela fórmula:

O prefeito encontrou-se diante uma decisão difícil. A qual dos candidatos deveria dar o emprego definitivo?

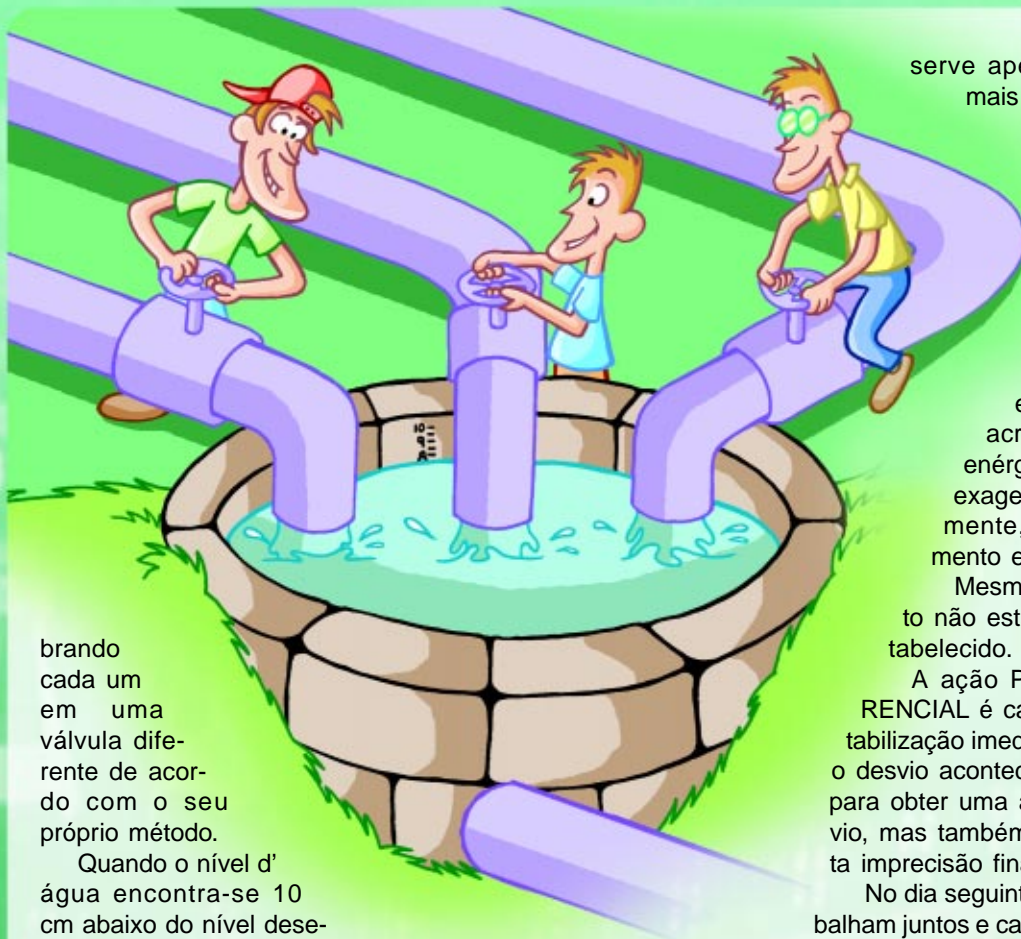
Isidoro, a imagem do comportamento integral, demorou bastante tempo para restituir o nível desejado na caixa d'água. Verdade é que ele acertou todas as vezes o nível exato. Seu método, porém, resultou numa instabilidade absoluta, porque, devido à sua atividade contínua, diversas vezes o nível oscilou fortemente. Seu único recurso contra esse inconveniente foi acionar a válvula lentamente. Mas, na proporção que a manobra era lentamente executada, aumentou-se o tempo que a população deveria esperar até receber água mesmo nos bairros mais elevados.

Pedro, a imagem do comportamento proporcional obteve um resultado diametralmente oposto. Seu método não resultou em oscilações do nível nem em desvios consideráveis. Mas também não foi capaz de assegurar o nível exato.

Demétrio, a imagem do comportamento diferencial, trabalhou com energia exagerada demais. Abrindo ou fechando abruptamente a válvula, deu praticamente uma chicotada na vazão. Por causa dessa atitude brusca, provocava fortes variações de pressão na rede, não conseguindo também estabelecer o nível exato. Assim, apesar de todos seus esforços, os habitantes da cidade acharam o seu serviço o menos satisfatório.

Diante desses resultados o prefeito decidiu combinar o trabalho dos três candidatos para verificar o efeito. Para esse fim mandou colocar dois tubos de ligação a mais entre o rio e a caixa d'água.

Demétrio, porém, encontrava-se impedido, assim que Pedro e Isidoro trabalharam em conjunto, mano-



brando cada um em uma válvula diferente de acordo com o seu próprio método.

Quando o nível d'água encontra-se 10 cm abaixo do nível desejado, Pedro abre a válvula, dando cinco voltas ao volante, acabando assim com a queda d'água.

Isidoro, por sua parte, executa o seu trabalho lentamente e continuamente até reconduzir o nível d'água ao valor desejado. Desta vez ele não precisa preocupar-se com a variação de consumo na cidade. É suficiente que ele corrija a inexactidão do serviço de Pedro. Assim, sua manobra é restrita e não provoca mais, por aberturas exageradas da válvula, a instabilidade do nível.

O método conjunto de Pedro e Isidoro é a própria imagem da ação proporcional-integral, caracterizada pela estabilização instantânea do nível desejado e por uma excelente exatidão graças à ação integração de Isidoro.

No dia seguinte é Isidoro que se encontra impedido, Pedro e Demétrio vão trabalhar.

"Desvio de nível de 10 cm abaixo".

Pedro, como sempre, estabiliza imediatamente por uma ação proporcional (abertura de 5 voltas). Demétrio abre sua válvula de 10 voltas de uma vez (ação diferencial), exagerando a alimentação, prevê a inércia da subida e fecham as dez voltas num tempo proporcional à inércia estimada por ele. Ele sabe que Pedro já fez o trabalho principal e que a sua própria chicotada

serve apenas para restabelecer mais rapidamente o nível exato. Ele confia mais na sua estimativa do que na marca de nível, e como Pedro, ele não lê o desvio residual após a sua manobra. Pedro parou a queda por uma ação medida e imediata. Demétrio acrescentou uma manobra energética, mas esporádica, que exagera a ação momentaneamente, acelera o restabelecimento e diminui o desvio.

Mesmo assim, o nível prescrito não está ainda exatamente restabelecido.

A ação PROPORCIONAL-DIFERENCIAL é caracterizada por uma estabilização imediata no momento em que o desvio acontece. Um exagero da ação para obter uma absorção rápida do desvio, mas também, infelizmente, uma certa imprecisão final do resultado.

No dia seguinte, finalmente, os três trabalham juntos e cada um ao seu modo. Para uma queda de 10 cm, Pedro abre 5 voltas,

Demétrio exagera a ação (diferencial) até 10 voltas, para depois cancelar a manobra num tempo que é em função da inércia do aumento de nível. Isidoro, como de costume, não tem pressa, abre a válvula devagar (integraliza), até o momento em que ele constata que o nível prescrito é atingido, mas desta vez, a sua manobra é bem menor, porque antes dele, os seus irmãos já fizeram o principal. Pedro efetuou a compensação da perturbação. Demétrio, o exagero que elimina energicamente o desvio. Isidoro determina a precisão final da operação. Ele tomou cuidado para que nenhum desvio residual subsista.

A ação PROPORCIONAL – DIFERENCIAL - INTEGRAL é a combinação perfeita que reúne:

- A compensação imediata da perturbação proporcional;
- O exagero necessário para combater a inércia de mudança de nível (diferencial);
- A volta exata ao valor prescrito (integral).

Em recompensa pela eficiência, a prefeitura contrata os três como encarregados do chafariz para contento geral da aldeia, a não ser um único habitante... O Tesoureiro municipal, que pensa: "Eu devo agora pagar três encarregados em vez de um. Vou ter que aumentar o preço da água".