

Controle de Processos

Aula 03 - Controle PID

Apresentação

Na aula anterior, aprendemos como identificar experimentalmente sistemas dinâmicos de 1ª ordem e 2ª ordem e também como os sistemas dinâmicos se comportam. A partir desta aula, estudaremos como controlá-los. Iremos conhecer o controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID). Esse controlador é o mais empregado na indústria, e ainda veremos a estrutura desse controlador (PID) e por quais razões ele é o mais utilizado. Vamos lá?

Vejamos também no vídeo abaixo do que trata esta aula.



Vídeo 01 - Apresentação

Objetivos

Ao final desta aula, os alunos deverão estar aptos a:

- Assimilar quais são as ações de controle proporcional, integral e derivativa.
- Associar cada uma das ações de controle ao comportamento desejado do sistema que se quer controlar.

Introdução ao Controle PID

O controlador PID é de longe o mais popular algoritmo usado na indústria. A maioria das malhas de realimentação utiliza o PID com pequenas variações (ALVES, 2010). Por esse motivo, seu estudo se torna algo extremamente importante.

Discutimos que em qualquer sistema de controle automático é necessária a medida das variáveis a controlar, e que além das variáveis a controlar é habitual a medida de outras variáveis de modo a adquirir um melhor conhecimento do que se passa no processo.

A medida das grandezas do processo (pressões, vazões, temperaturas, pH, umidade, velocidade, etc.) é feita por [elementos primários](#). (Parte de uma malha ou de um instrumento que primeiro sente o valor da variável de processo.) os quais, na maior parte dos casos, as transformam em grandezas de outra espécie (pressões pneumáticas, sinais elétricos, deslocamentos mecânicos, etc.) mais fáceis de medir ou de transmitir a distância.

Os dispositivos que produzem essa transformação de variáveis são conhecidos pelo nome de [transdutores](#) (Dispositivo que transforma um tipo de energia em outro, utilizando para isso um elemento sensor.).

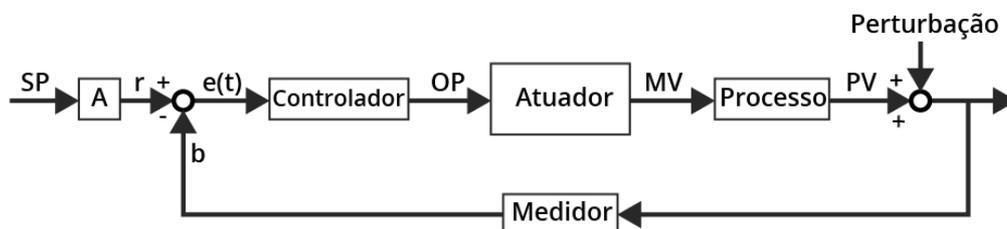
Há casos em que não é possível medir diretamente a grandeza a controlar. Recorre-se então à medida de outra grandeza da qual a primeira depende.

Como hoje os equipamentos de controle e supervisão (*controladores ou computadores*) de uma instalação fabril são concentrados numa sala de comando (*sala de controle*) e os elementos de medida estão dispersos pelo processo, é necessário transmitir as medidas desde o processo até a sala de comando. Desse modo, associam-se os elementos de medida com *transmissores* normalmente elétricos (em alguns casos, hoje em dia menos frequentes, pneumáticos - sinais de pressão).

Já examinamos que um sistema de controle pode consistir de vários componentes, tornando-o bastante difícil de ser analisado. Então para facilitar o seu entendimento e a fim de mostrar as funções desempenhadas por seus

componentes, a engenharia de controle utiliza sempre um diagrama denominado “Diagrama de Blocos” (representação das funções desempenhadas por cada componente e do fluxo de sinais). Relembremos mais uma vez a localização do controlador numa cadeia fechada de comando automático (Figura 1).

Figura 01 - Diagrama de Blocos de um Sistema de Controle.



Os elementos de medida e transmissão transformam a variável controlada numa variável b , da mesma natureza ou de natureza diferente, cujos valores tenham uma relação conhecida com a variável PV (variável controlada).

A variável b (medida transmitida ou *variável de realimentação*) aplicada às entradas dos controladores é, em grande número de casos, de um dos seguintes tipos: deslocamento mecânico, força, pressão ou sinal elétrico. Sendo este último muito comum.

Resumindo, a medida da variável controlada (PV) é executada por instrumentos que transformam essa variável numa outra (b) capaz de ser transmitida até o controlador.

A quase totalidade das instalações fabris atuais depende, para o controle automático das variáveis em ação (pressões, temperaturas, níveis, vazões, composições, etc.), de controladores dos mais diversos tipos.

Podemos considerar os controladores (ver Figura 1) como pequenos computadores capazes de gerar um sinal de saída OP relacionado com o erro $e(t)$ por uma certa função matemática (ou algoritmo). No esquema de blocos da Figura 1, o controlador é um operador matemático que atuando sobre o erro $e(t)$ o transforma no sinal de controle OP. Como veremos, o sinal de controle é habitualmente gerado (construído) a partir da adição de termos de forma simples. Esses termos são designados por *modos de controle* do controlador.

A forma dos modos de controle utilizados e a escolha das várias constantes (ganhos, tempos integrados, etc.) dependem, para que se obtenha um controle ótimo, das características estáticas e dinâmicas do processo.

É sob este aspecto que se pode dizer haver no controlador uma *memória do processo*, um “know how” acerca das características do sistema a controlar. O controlador e o processo são, pois, complementares e inseparáveis quando se procede ao estudo das características de controle e de estabilidade de uma cadeia fechada (SANTOS, 1979).

No Esquema da Figura 1, o “Medidor” representa os elementos de medida e transmissão que transformam a variável controlada PV na variável indicada b. O valor no qual se deseja manter a variável controlada, ou valor desejado SP, é introduzido no controlador por algum dispositivo (por exemplo, um botão - forma manual ou via software - pelo computador). Os dispositivos de entrada A transformam SP numa variável da mesma natureza de b.

Nota: Em um processo real existem sempre distúrbios agindo em um sistema de controle. Os ruídos de medição representam distúrbios que distorcem a informação sobre as variáveis do processo obtidas pelos sensores.

Um dispositivo de subtração (representado por um círculo) gera um sinal $e(t)$ segundo a seguinte lei:

$$e(t) = r - b$$

sendo b e r grandezas da variável controlada e do valor desejado, respectivamente e sendo habitualmente desprezíveis o atraso e a constante de tempo dos elementos de medida, podemos dizer que, em qualquer instante, $e(t)$ representa o *erro* ou *desvio* entre o valor desejado e a variável controlada:

$$e(t) = SP - PV$$

A parte “Controlador” vai alterar o sinal de erro, de modo a gerar o sinal de controle OP.

Por intermédio do “Atuador”, o sinal de controle (OP) altera a variável manipulada MV de modo a compensar a ação perturbadora e a reconduzir a variável PV ao valor desejado.

Repare que na cadeia de controle a correção da variável controlada (vazão, nível, temperatura, etc.) vai atuar sobre outra variável (atuador - abertura da válvula de controle). A ação de controle é aplicada, normalmente, a outra variável da qual depende a variável controlada e, como vimos, designa-se com o nome de variável manipulada.

Nota: Se o órgão de controle final (por exemplo, a válvula de controle) tiver característica linear, podemos confundir:

MV com OP : $MV \equiv OP$

Vimos que o controlador recebe como entrada o sinal de erro (Erro = SP - PV; em alguns casos: Erro = PV - SP), dado pela diferença entre os sinais SP e PV. Na prática, sua ação pode ser *direta*, se o erro for calculado como sendo SP - PV, ou reversa se for calculado como PV - SP. Entretanto, a ação do controlador deve ser escolhida corretamente em função do processo para que o controlador funcione adequadamente. Essa configuração (direta ou reversa) é feita no Controlador Lógico Programável (CLP) ou Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD). Se aumentarmos o sinal do controlador OP e a PV aumentar, devemos configurar o controlador com ação direta. Ou se aumentarmos OP e a PV diminuir, devemos configurar o controlador com ação reversa.

O sinal OP é calculado como sendo a soma de três termos (ou ações): o termo proporcional ao erro (P); o termo integral do erro (I); e o termo derivativo do erro (D). Essas são as combinações das ações dos **modos de controle do controlador**. Mostraremos nas seções seguintes cada uma dessas ações.

Vamos assistir a um vídeo que trata sobre as noções básicas de controladores PID.



Vídeo 02 - Noções Básicas

Características Dinâmicas de um Sistema de Medida

A *velocidade de resposta* de um sistema de medida deve ser a maior possível, se não quisermos introduzir atrasos na ação da cadeia de controle. Isto equivale a dizer que a constante de tempo dos elementos de medida e transmissão não deve ser alta em relação às constantes de tempo dos restantes sistemas da cadeia.

Objetivos de Controle

Obter um sistema que seja estável, que atenda às especificações de desempenho (dos regimes transitório e permanente) e seja robusto do ponto de vista de controle (mantenha as especificações de desempenho independentemente das incertezas do modelo).

Em resumo, a utilização da realimentação e, portanto, do controle em malha fechada, permite, entre outros: aumentar a precisão do sistema; rejeitar o efeito de perturbações externas; melhorar a dinâmica do sistema e, eventualmente, estabilizar um sistema naturalmente instável em malha aberta.

Atividade 01

1. Suponha que se deseja controlar o nível de um tanque através da manipulação da sua vazão de saída por intermédio de uma válvula de controle do tipo ar para abrir. Qual seria o modo (direto ou reservo) de configuração do controlador para esse sistema? Justifique a resposta.

Controlador Proporcional (P)

No controlador proporcional temos apenas a influência da ação proporcional. A ação proporcional irá calcular um OP, que chamaremos de u , através de uma constante que multiplica o sinal de erro. Isto é, a ação proporcional altera a saída do controlador proporcionalmente ao erro. Veja:

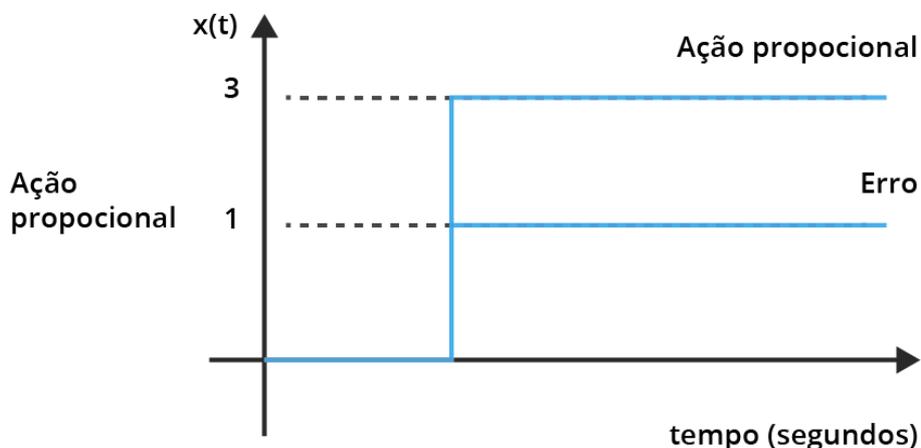
$$u(t) = K_p e(t) + u_0$$

onde:

- $u(t)$ = é a saída do controlador.
- K_p = é o ganho proporcional.
- $e(t)$ = é o sinal de erro como uma função no tempo ou a diferença entre a variável controlada do processo e o *set point*.
- u_0 = é o valor inicial da saída do controlador, ou seja, o valor de OP do controlador quando o mesmo é colocado em automático. É a saída do controlador para erro igual a zero. Representa o valor que toma OP quando o erro $e(t)$ é nulo.

A ação proporcional só será nula quando o erro for nulo. A Figura 2 ilustra graficamente a ação proporcional considerando um sinal de erro constante.

Figura 02 - Ação proporcional considerando erro constante.



Fonte: Adaptado de Campos e Teixeira (2010).

Observe na Figura 2 que a ação proporcional tem a mesma forma do erro, apenas multiplicada por um ganho proporcional. Ao se projetar um controlador proporcional o objetivo é ajustar o valor de K_p de forma a se obter a resposta desejada. Podemos concluir que quando o erro não varia e fica constante, a saída do controlador P (sinal OP) também não irá variar. Portanto, esses controladores permitem que, em muitos casos, o sistema em malha fechada tenha erro estacionário (erro em regime permanente).

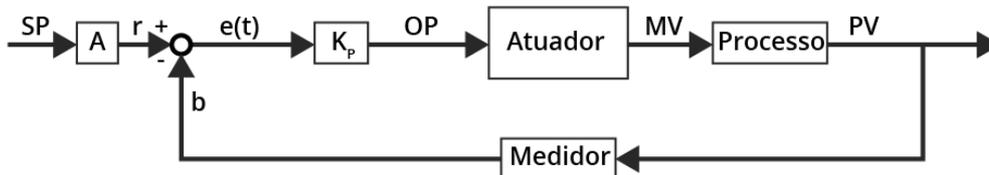
Muitos controladores comerciais são calibrados em **banda proporcional** no lugar do ganho. A relação entre os dois é:

$$BP = \frac{100}{K_p}$$

A banda proporcional equivale ao erro que provoca uma variação de 100% na saída do controlador.

A Figura 3 mostra a estrutura de um controlador do tipo P.

Figura 03 - Controlador Proporcional (P).



Em resumo: *O principal defeito do modo proporcional consiste na introdução de um desvio permanente na variável controlada.* Tem, porém, uma ação estabilizadora. Para ganhos altos aparecem oscilações na saída do processo, podendo até instabilizar o sistema. Há, assim, um limite inferior do desvio permanente (diferença entre SP e PV) que não pode ser ultrapassado.

Só deverá ser usado quando são pequenas as variações das variáveis de carga e quando os tempos mortos são pequenos.

Atividade 02

1. De acordo com o gráfico da Figura 2, calcule o ganho proporcional (K_p) do controlador.

Modo Integral (I)

Neste modo de ação, o controlador gera um sinal de correção utilizando a operação matemática chamada integração (integração do desvio $e(t)$ ao longo do tempo), que produz uma saída nula quando não houver erro, ou um valor que será tanto maior quanto maior for o tempo de existência do erro. A operação integral é uma operação que, usualmente, não é estudada em cursos de nível médio. No entanto, a ideia intuitiva do que essa operação representa é relativamente simples. Integrar significa somar, acumular. A ação integral, portanto, soma (acumula) o erro ao longo do tempo. Dessa forma, enquanto houver erro estacionário o termo integral irá variar de forma a manter esse erro nulo. Ou seja, como a saída depende do tempo durante o qual houve erro, essa ação elimina o erro de regime permanente.

O valor de saída do controlador aumenta enquanto o erro existir, até atingir o valor máximo na saída. A velocidade de variação do órgão de controle é tanto maior quanto maior for o erro.

Não se usam controladores apenas com a ação integral e, sim, combinando-se as ações proporcional e integral, sendo chamados de PI ou P+I. Basta a existência de tempos mortos no processo para que a cadeia só com modo integral se torne instável.

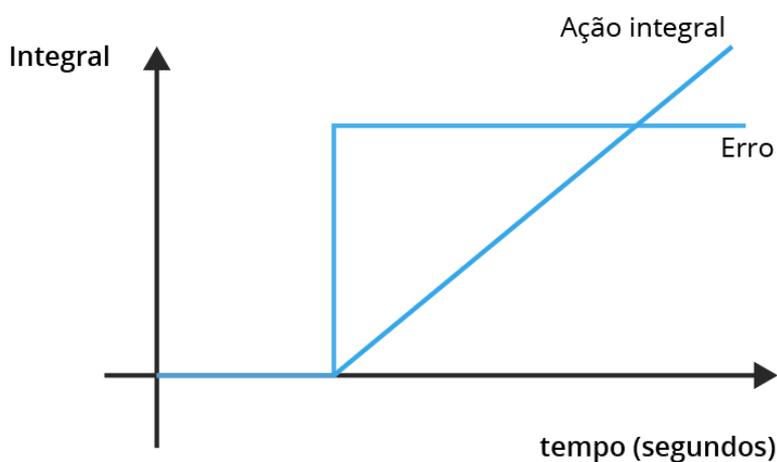
Controlador Proporcional e Integral (PI)

É a combinação das duas estratégias de controle anteriores. Como vimos anteriormente, o controlador proporcional permite, em muitos casos, que o sistema em malha fechada possua erro estacionário. Para suprir essa deficiência, utilizamos, juntamente com a ação proporcional, a ação integral.

O parâmetro que utilizamos para caracterizar a ação integral é o tempo integral (ou *reset time*) T_i , em segundos ou em minutos por repetição (depende do controlador). Dependendo do fabricante de controladores possa ser que o termo da ação integral a ser ajustado durante a sintonia seja o inverso do tempo integral, chamado ganho integral ou taxa integral ($1/T_i$ - repetições por segundo ou por minuto).

A Figura 4 ilustra a ação integral para um erro estacionário constante. A ação integral irá aumentar ou diminuir a saída do controlador indefinidamente enquanto houver erro.

Figura 04 - Ação integral considerando erro constante.



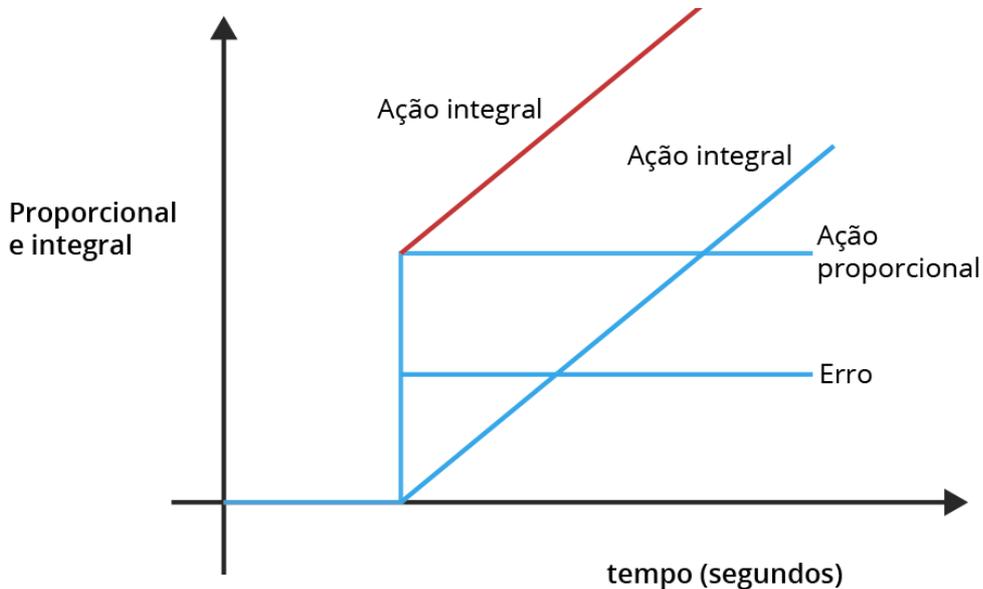
Fonte: Adaptado de Campos e Teixeira (2010).

O propósito básico da ação proporcional é trazer o processo de volta ao *set point* quando ele é perturbado. A ação integral introduz um efeito oscilatório no sistema, podendo levá-lo para a instabilidade. No entanto, isso é necessário para se remover o erro de regime permanente que a ação proporcional é incapaz de retirar sozinha.

Nota: A saída do processo, isto é, a variável controlada (PV) pode apresentar um comportamento oscilatório para certos valores do tempo integral T_i e do ganho K_p , dependendo estes valores das constantes do processo.

O controlador PI irá somar as duas ações, a proporcional e a integral. A Figura 5 mostra as duas ações separadas e o resultado da soma das duas.

Figura 05 - Ação proporcional e integral considerando erro constante.



Fonte: Adaptado de Campos e Teixeira (2010).

A ação integral faz com que a saída do controlador “repita” a ação proporcional após o tempo integral T_i . Por exemplo, se tivermos um tempo integral igual a 2 (segundos ou minutos) e um ganho proporcional de 3, caso haja um erro de 1%, a saída do controlador vai para 3% devido à ação proporcional, e após o tempo integral (2 segundos ou minutos) a saída vai para 6% devido à ação integral de 3% somada à ação proporcional, que continua em 3%, e assim por diante até eliminar o erro de regime. Ou seja, a ação integral “repetiu” a ação proporcional. É por essa razão que o tempo integral (T_i) também é conhecido como o tempo por repetição, e o seu inverso ($1/T_i$) como repetições por minuto ou segundos.

Perceba que há a influência da ação proporcional (ganho proporcional), tanto no erro como na integral do erro (na ação integral). O tempo T_i indica o período que a ação integral irá corrigir o valor da PV. Quanto maior for o valor de T_i , menor será o efeito da ação integral.

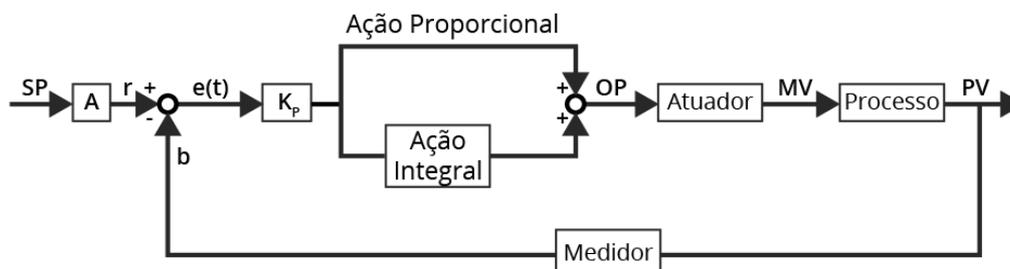
De maneira geral, quanto maior for o ganho proporcional e quanto menor for o tempo integral, mais rápida será a resposta do controlador, e maior a tendência de o sistema instabilizar.

Na prática, os equipamentos que implementam o controle PI devem evitar que os mesmos saturem. A saturação do controlador é chamada no jargão técnico de *windup*. Isso acontece devido ao fato do termo integral continuar acumulando o erro mesmo quando o atuador já está saturado, por exemplo, a válvula de controle está totalmente aberta (100%) ou totalmente fechada (0%). O controlador pode estar calculando, por exemplo, um valor de 150% para a MV (abertura da válvula) enquanto o valor, de fato, do atuador é de 100% (máxima abertura). Caso seja necessário fechar a válvula, o controlador entenderá que a mesma está aberta em 150% (o que na prática não é possível) e seu fechamento será mais lento do que o necessário. Isso pode causar efeitos indesejáveis sobre a malha. Assim, os fabricantes de controladores desenvolveram diversas estratégias para contornar o problema, chamando-o de *antiwindup*. Em geral, o efeito do integrador deve ser inibido quando o atuador satura.

Resumindo: Existindo erro/desvio entre o valor desejado (SP) e a variável de processo/controlada (PV), o sinal OP do controlador PI irá aumentar ou diminuir indefinidamente na tentativa de corrigir esse erro. No entanto, como operamos em um elemento final de controle, o que pode acontecer é que esse dispositivo não disponibilize mais ação para corrigir a variável controlada, pois já está saturado. Porém o controlador não entende esse estado do atuador e continuará calculando (*windup*) um OP até que uma estratégia seja usada para lhe passar essa informação da saturação do atuador (*antiwindup*).

A Figura 6 mostra a estrutura de um controlador do tipo PI.

Figura 06 - Controlador Proporcional e Integral (PI).



Pode-se mostrar que a ação PI é adequada para todos os processos em que a dinâmica é essencialmente de primeira ordem, como controle de nível em único tanque e reatores com mistura perfeita, entre outros. Porém, mesmo que o processo tenha dinâmica de maior ordem o que ele precisa é de uma ação integral que produza um erro de regime igual a zero e uma resposta transitória adequada pela ação proporcional (ALVES, 2010).

Atividade 03

1. Vimos que a ação integral corrige o problema de erro estacionário. Faça uma pesquisa sobre os efeitos da ação integral sobre o comportamento do sistema em regime transitório.

Modo Derivativo (D)

Esta ação de controle gera um termo do sinal de correção que depende da velocidade de variação do erro $e(t)$. O modo derivativo não pode ser usado isoladamente, pois, está ligado à tendência de variação e não ao valor absoluto do erro. De forma simplificada, a derivada pode ser entendida como a taxa de variação do erro em relação ao tempo. Se, por exemplo, o erro cresce rapidamente, sua saída será um valor grande e se o erro cresce lentamente, sua saída apresentará um valor menor. Esse resultado indica a tendência de variação da grandeza a ser controlada. Tem a característica de responder rapidamente a qualquer variação da grandeza em relação ao *set point*.

A finalidade da ação derivativa é antecipar a ação de controle, agindo na variação do erro com o tempo. Isso é importante em processos lentos para que o tempo de retorno ao *set point* não seja lento demais. Nos controladores, a ação derivativa é associada à proporcional ou à ação proporcional e integral, sendo chamadas de PD (P+D) e PID (P+I+D), respectivamente. Esta última é a associação mais comum, obtendo-se um controle com resposta rápida, com condição de minimizar o erro de regime permanente.

Controlador Proporcional e Derivativo (PD)

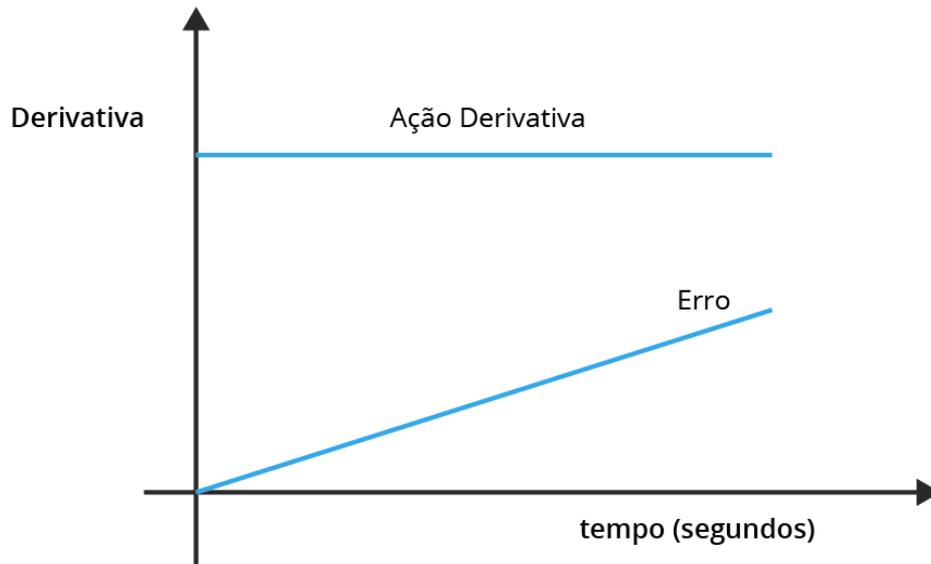
Esta ação somada ao controle proporcional resulta num controlador com resposta rápida no momento do surgimento do erro, entregando um valor alto de energia ao processo, o qual se reduz à medida que o erro se reduz, ou seja, o valor da grandeza controlada se aproxima do set point.

Se este tipo de controle for aplicado a um processo cuja resposta natural é rápida, o sistema poderá ficar instável. Por exemplo, nos sistemas de controle de pressão que usualmente apresentam resposta rápida com a ação do atuador.

Controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID)

Outro tipo de controle muito usado é o que resulta da associação dos 3 modos. O controlador PID considera, além das ações proporcional e integral, a ação derivativa. Além de eliminar o erro de regime (offset), por meio de consegue-se, com regulações apropriadas, consegue-se uma estabilização do processo e um retorno mais rápido ao equilíbrio do que com o modo PI. Como vimos, a derivada de uma função, no nosso caso, a derivada do erro, considera como o erro varia em função do tempo, ou seja, considera sua tendência futura. A derivada nos dará a informação se o erro está aumentando, diminuindo e com que taxa isso está ocorrendo. Dessa forma, a derivada nos fornece uma tendência futura do comportamento do sistema. Com isso, o controlador pode se antecipar a corrigir possíveis problemas. Isso é muito útil quando o sistema tem um desempenho pouco satisfatório em regime transitório (alto overshoot ou tempo de estabilização, por exemplo). O parâmetro que utilizamos para caracterizar a ação derivativa é o tempo derivativo do controlador, denotado por T_d , em segundos ou em minutos. Vejamos uma ilustração na Figura 7.

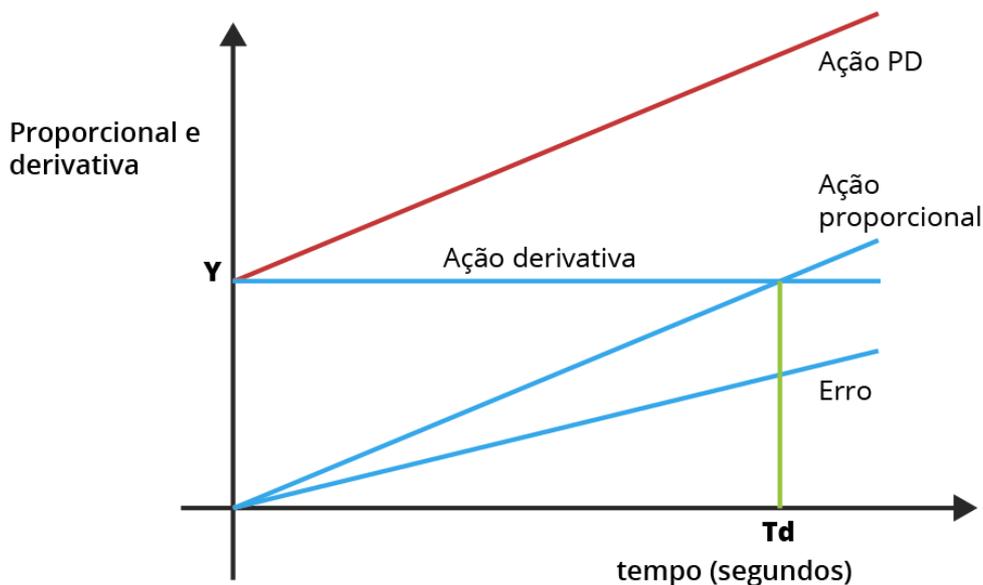
Figura 07 - Ação Derivativa considerando erro crescente em rampa.



Fonte: Adaptado de Campos e Teixeira (2010).

É mostrada na Figura 7 a ação derivativa do controlador quando ocorre um erro crescente em rampa. Observe que a ação derivativa tem uma atuação antecipativa ao erro. Nesse caso, como o erro é uma rampa, a ação derivativa é positiva e constante. A Figura 8 ilustra a ação do controlador PD quando ocorre um erro em rampa. A ação proporcional é uma rampa e a ação derivativa soma um valor constante a essa rampa.

Figura 08 - Ação Proporcional e Derivativa considerando erro crescente.

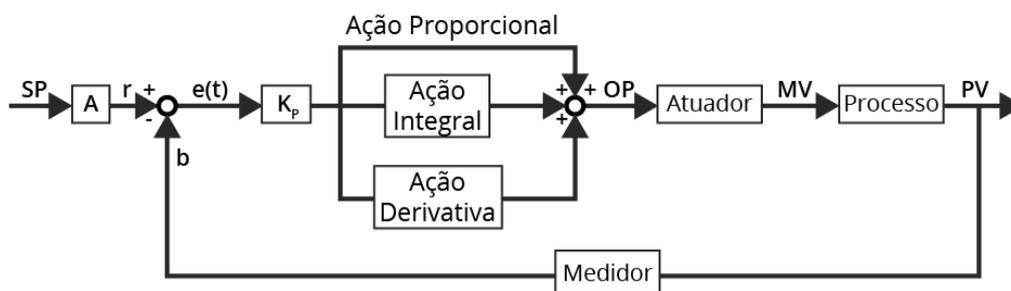


Fonte: Adaptado de Campos e Teixeira (2010).

O termo derivativo antecipa a ação proporcional T_d unidades de tempo, ou seja, conforme a Figura 8, caso houvesse apenas a ação proporcional, a mesma somente iria atingir o valor “Y” em T_d unidades de tempo à frente. Com o tempo derivativo a saída do controlador já é igual a “Y” no tempo zero. Essa característica é útil para corrigir problemas na resposta transitória do sistema (evitar oscilações em processos lentos).

A Figura 9 mostra a estrutura de um controlador do tipo **PID paralelo clássico**. É o mais encontrado na prática, onde o ganho proporcional afeta (multiplica) tanto o termo integral quanto o termo derivativo.

Figura 09 - Controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID - Paralelo clássico).



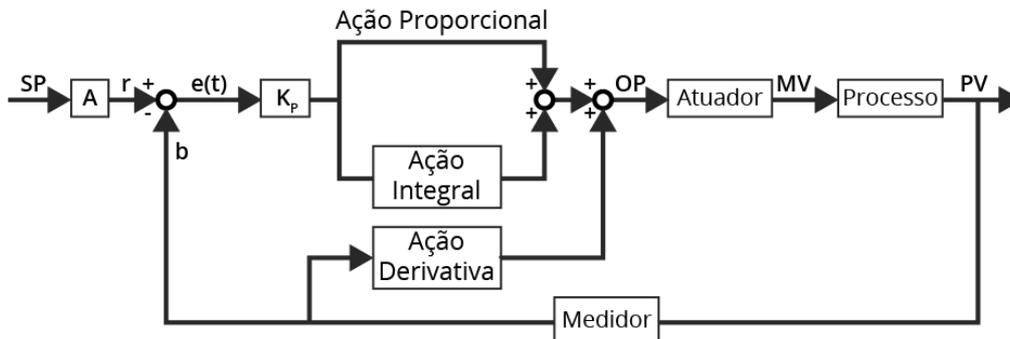
O PID gera sua saída proporcionalmente ao erro, proporcionalmente à integral do erro e proporcionalmente à derivada do erro.

Teoricamente, a ação derivativa sempre melhoraria o comportamento dinâmico do processo, e isso ocorre em muitas malhas de controle onde o processo é lento. Entretanto, em processos mais rápidos o ruído é amplificado pela ação derivativa, tornando sua aplicação indesejável. Por essa razão, em alguns casos no algoritmo PID do controlador a constante K_p não multiplica a ação derivativa.

Pela Figura 9, nesse modo de controle PID, uma variação brusca (rápida variação) do erro (por exemplo, por variação do valor desejado - SP), dará origem a um termo derivativo de alto valor durante algum tempo, pois o erro cresceu rapidamente, e isso pode originar perturbações no controle. Em vista, alguns modelos de controladores geram um termo derivativo não a partir do erro, mas sim da própria variável controlada (ou da variável indicada), passando então a considerar as tendências de mudança na PV.

A Figura 10 mostra essa estrutura (estratégia ou configuração) de controlador do tipo PID.

Figura 10 - Controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID - Termo derivativo depende da variação da saída).



Essa estratégia de gerar um termo derivativo a partir da saída do processo pode ser algo vantajoso, pois quando há uma variação brusca na entrada do sistema a variável controlada irá demorar algum tempo para reagir, pois a informação da mudança de *set point* deverá passar por todos os blocos até chegar no "Processo". A variação da PV será então mais "suave".

No momento da mudança do set point, em um curto intervalo de tempo o valor que o sensor estará lendo ainda será o valor para antes da mudança, então o erro, ou seja, a diferença entre o novo SP e o PV atual, aparecerá muito rapidamente, quase que instantaneamente, que para o PID paralelo clássico irá gerar um grande termo derivativo. Porém a escolha de qual estratégia de PID utilizar, dependerá do processo a controlar.

A título de exemplo, há, porém, casos difíceis de controlar, como processos com elevados tempos mortos e altas constantes de tempo para os quais não basta a ação PID. Recorre-se neste caso a sistemas mais complexos de controle.

Veremos agora de forma complementar a ação que cada parte do controlador implica no sistema. Vamos clicar e assistir!



Vídeo 03 - Ações de Controle PID

Atividade 04

1. Considerando um controlador PD com $K_p = 3$ e $T_d = 5$, redesenhe a Figura 8 colocando os devidos valores nos gráficos.

Comentários Gerais sobre os PIDs dos Equipamentos

A tarefa de encontrar os parâmetros K_p , T_i e T_d para controlar uma determinada malha de controle não é uma tarefa tão trivial. O processo de ajuste desses parâmetros é chamado de sintonia do controlador. Existem diversas formas de sintonizar controladores PID. Essas técnicas serão estudadas em aulas posteriores.

É interessante saber que há diferentes formas (configurações) de se implementar o controlador PID (vimos algumas na seção anterior). Dependendo do fabricante, você pode ter características peculiares de cada PID. É importante para o profissional da área de automação industrial conhecer os diversos fabricantes e as características que cada um deles proporciona. Na prática, os PIDs possuem diversos mecanismos de segurança, por exemplo:

- *PV tracking*: mecanismo que iguala o SP ao PV quando se muda de manual para automático. Isso evita mudanças bruscas de referência.
- *Bumpless*: mecanismo que evita variações bruscas devido a mudanças de sintonia.
- *Antiwindup*: mecanismo que evita a saturação do controlador.

Outros mecanismos, além dos citados, são implementados. Você pode fazer uma breve pesquisa sobre esses mecanismos. O que acha?

Principais Aplicações do Controlador PID

São muitas as aplicações do controlador PID na indústria. A aplicação dependerá da característica do sistema que se pretende controlar. A Tabela 1 resumirá as principais aplicações:

Controlador	Características	Aplicação Típica
P	Permite erro estacionário (erro de regime).	Controle de Nível.
PI	Não tem erro estacionário (erro de regime), mas pode fazer o sistema oscilar.	Controles de vazão, nível e pressão.
PID	A resposta é mais estável em malhas lentas e com tempos mortos razoáveis, mas não muito altos.	Controle de Temperatura.

Tabela 1 - Aplicações típicas para os controladores P, PI e PID.

Fonte: Adaptado de Campos e Teixeira (2010).

De uma forma mais simples, os efeitos das ações, com os parâmetros devidamente ajustados, na resposta do controle em malha fechada são listados na Tabela 2.

Resposta controle	Tempo de subida	Overshoot	Tempo de estabilização	Erro no regime estacionário
P	Diminui	Aumenta	Não Altera	Diminui, mas não elimina
I	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina
D	Não Altera	Diminui	Diminui	Não Altera

Tabela 2 - Efeitos na resposta de um controle para ações P, I e D.

Fonte: Adaptado de Bayer e Araújo (2010).

Vejamos no vídeo a seguir, algumas aplicações possíveis com os controladores.



Vídeo 04 - Aplicações

Chaves de Processo para os Sistemas de Proteção

Quando os sistemas de controle do processo, por alguma condição anormal de processo ou falha de equipamentos, não conseguem manter as variáveis controladas dentro de valores considerados seguros, sistemas de proteção devem ser acionados, sendo conhecidos por Sistemas de Intertravamento de Segurança. As diversas variáveis de processo são monitoradas por chaves que funcionam como entradas do sistema de proteção, informando se alguma variável ultrapassou os limites preestabelecidos. Existem, então, as chaves de nível, pressão (pressostato), temperatura (termostato) e vazão (ALVES, 2010).

As chaves são baseadas nos mesmos princípios dos medidores e transmissores das variáveis de processo, com a diferença de que a sua finalidade não é medir continuamente o valor de uma variável, mas apenas atuar quando a variável atingir

o valor ajustado (*set point*), que pode ser um valor no limite superior da escala (alto) ou inferior (baixo), normalmente fechando ou abrindo um contato elétrico (ALVES, 2010).

Por exemplo, fisicamente existirá um limite no qual o nível não poderá ultrapassar a altura total do tanque. Um bom projeto deve prever uma faixa de segurança e alarmes de nível alto (em alguns casos, alarmes de nível baixo também) para que a planta de processo seja interrompida por sistemas de emergência devidamente interligados aos alarmes.

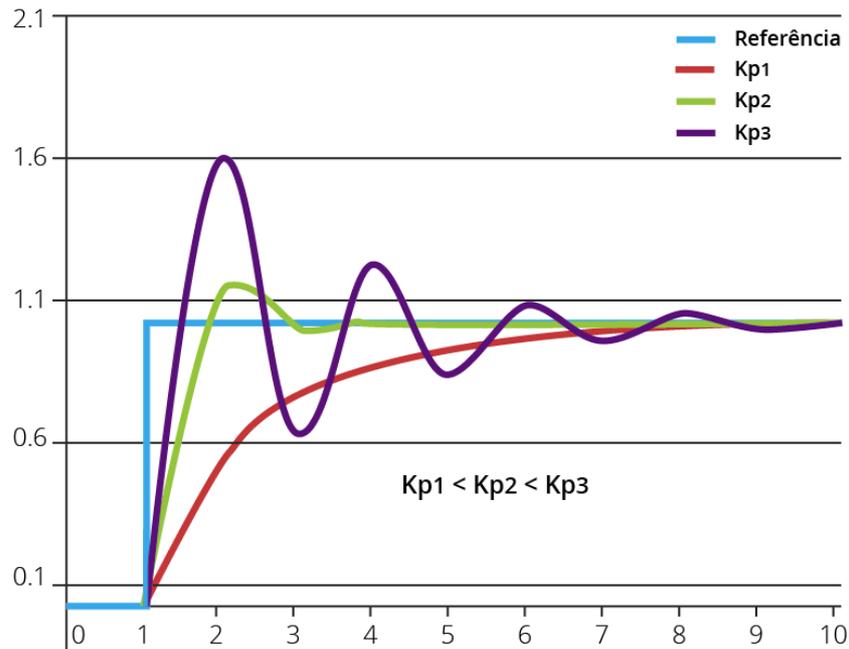
Influência dos ganhos do PID na Variável de Processo (PV)

Analisamos que o cálculo do controlador PID (considere o paralelo clássico) envolve três parâmetros: Proporcional, Integral e Derivativo.

Já estudamos que o uso dos controladores é essencial em sistemas que sejam instáveis em malha aberta, ou em sistemas que sejam estáveis em malha aberta e, no entanto, apresentem para uma determinada referência (*set point*) um desvio muito grande entre esta e a resposta.

Vimos que a função proporcional do controlador PID produz um valor na saída proporcional ao erro obtido na realimentação. A resposta proporcional pode ser ajustada a partir da constante de ganho K_p . Quanto maior a constante K_p (resposta mais rápida), maior será o ganho do erro e mais instável será o sistema. Mas se a constante K_p for muito pequena, menor será o seu tempo de resposta (resposta lenta). A Figura 11 mostra o gráfico das saídas (PV) com diferentes valores de K_p de um determinado sistema:

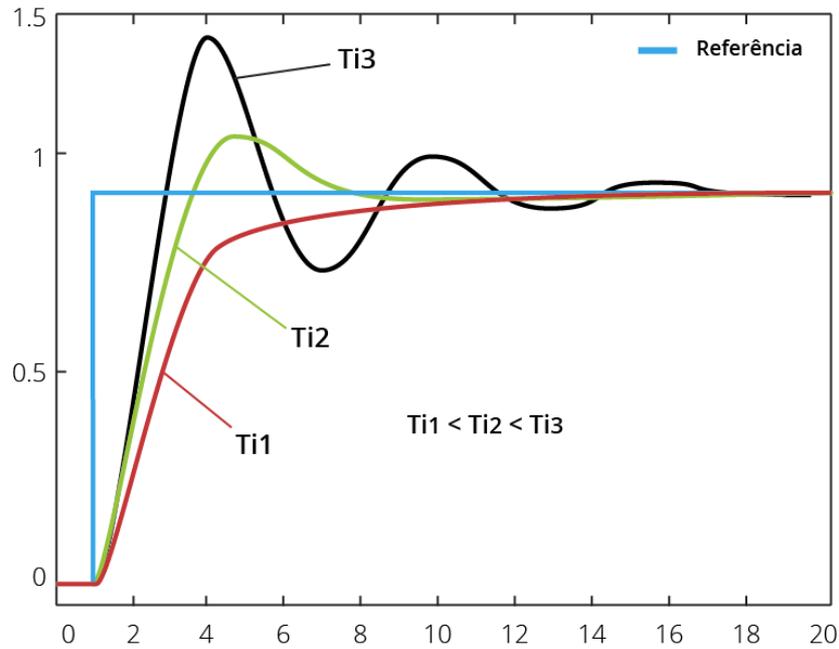
Figura 11 - Gráfico de PV vs tempo, para três valores de K_p (T_i e T_d são mantidas constantes).



Fonte: Adaptado de <http://labdegaragem.com/profiles/blogs/artigo-controlador-pid-proporcional-integral-derivativo-parte-1>. Acesso em: 12 jan. 2016.

A função integral soma todos os erros instantâneos e a somatória é multiplicada por um fator característico que depende de T_i . Esse modo do controlador PID acelera o movimento do processo até o ponto desejado e elimina o erro que ocorre na função proporcional. Como a função integral soma dados instantâneos do erro, o resultado do processo pode ultrapassar o ponto desejado. Essa consequência se chama "overshoot". A Figura 12 mostra um gráfico com uma referência e as saídas com T_i de vários valores:

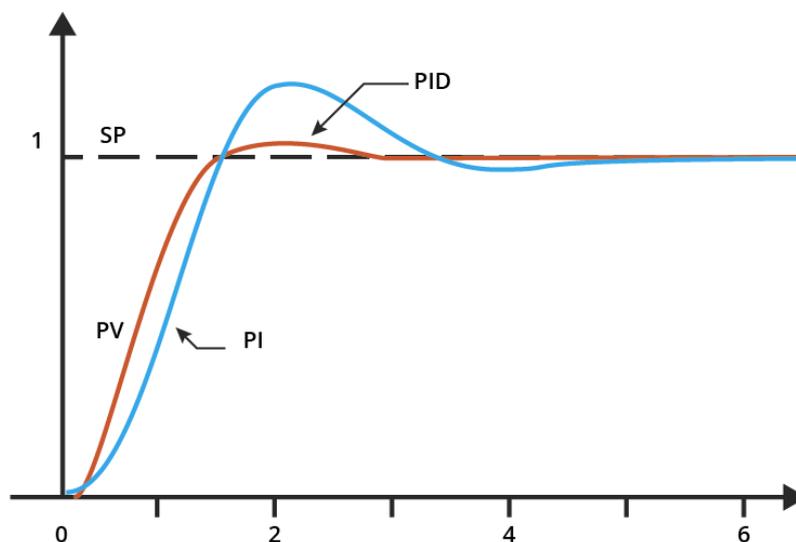
Figura 12 - Gráfico de PV vs tempo, para três valores de T_i (K_p e T_d são mantidas constantes).



Fonte: Adaptado de <http://labdegaragem.com/profiles/blogs/artigo-controlador-pid-proporcional-integral-derivativo-parte-1> Acesso em: 12 jan. 2016.

A ação derivativa “prediz” o comportamento do sistema e, assim, melhora o tempo de estabilização e estabilidade. Essa função diminui o “overshoot” do sistema. O modo derivativo é muito suscetível a ruídos, pois os amplificam e, caso o ruído e o ganho T_d sejam muito grandes, podem causar a instabilidade. A Figura 13 ilustra os efeitos da derivada em um processo com tempo morto.

Figura 13 - Gráfico de PV vs tempo.



Fonte: Adaptado de <http://pt.slideshare.net/Danilo004/control-de-processo-senai> Acesso em: 12 jan. 2016.

O modo derivativo só atua quando há variação no erro. Se o processo está estável, seu efeito é nulo. Quando houver perturbações ou na partida do processo, quando o erro está variando, o derivativo sempre atua no sentido de atenuar as variações, sendo, portanto, sua principal função melhorar o desempenho do processo durante os transitórios.

E então, gostaram de nossa aula de hoje? Veremos um pouco mais deste assunto na aula 04, cujo tema abordará os métodos de sintonia de controladores PID, e teremos a oportunidade de conhecermos um pouco mais sobre esses controladores. Até lá!

Resumo

Foi apresentada a importância que o controlador PID tem para a indústria. Aprendemos as ações básicas de controle (proporcional, integral e derivativa) e quais parâmetros (K_p , T_i e T_d) são associados na prática a essas ações.

Estudamos também que o controlador a ser utilizado depende da malha a ser controlada. A ação de controle PID combina as ações proporcional, integral e derivativa e gera um único sinal que aproveita as características de cada uma dessas ações. Quando se usa o modo PI em processos de segunda ordem ou superior e com tempos mortos, o tempo de estabilização pode ser excessivo. A excursão máxima permitida à variável controlada também pode ser excessiva do ponto de vista das exigências do processo. Esses efeitos podem ter consequências negativas sobre o rendimento fabril do processo. Usa-se, nesses casos, a ação derivativa associada apenas ao modo proporcional (PD) ou, mais usualmente, aos modos P e I (PID).

O modo derivativo introduz uma ação corretiva que depende da velocidade de variação do erro. Com a inclusão do termo derivativo, a resposta da malha fica menos “nervosa”. Em geral, o termo derivativo tende a deixar a malha mais estável, desde que a variável de processo não seja muito ruidosa. Quanto maior for o tempo derivativo, a resposta tenderá a ser mais rápida para *processos lentos*, pois o controlador tenderá a ter uma antecipação mais pronunciada.

Autoavaliação

1. Em um sistema que, em malha aberta, possua erro estacionário, é possível aplicar um controlador do tipo P caso se queira erro estacionário nulo? Justifique a sua resposta.
2. Em um sistema com alto *overshoot*, caso se queira melhorar esse índice, quais controladores podemos indicar para resolver esse problema? Justifique a sua resposta.

3. Qual a necessidade de se utilizar mecanismos antiwindup em controladores PID?

Referências

ALVES, José Luiz Loureiro. **Instrumentação, controle e automação de processos**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

BAYER, Fernando Mariano; ARAÚJO, Olinto César Bassi de. **Curso técnico em automação industrial: controle automático de processos**. 3. ed. Santa Maria: Universidade Federal Santa Maria: 2010.

CAMPOS, Mario Cesar M. Massa de; TEIXEIRA, Herbert C. G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

SANTOS, José J. Horta. **Automação industrial: uma introdução**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.