

INTRODUÇÃO

Este artigo pretende criar no leitor uma percepção física do funcionamento de um controle PID, sem grandes análises e rigorismos matemáticos, visando introduzir a técnica aos iniciantes e aprimorar o conhecimento dos já iniciados, com a abordagem mais prática e simplificada possível.

Noções preliminares

Algumas definições de siglas e termos utilizados neste artigo:

PV: Process Variable ou variável de processo. Variável que é controlada no processo, como temperatura, pressão, umidade, etc.

SV ou SP: Setpoint. Valor desejado para a variável de processo.

MV: Variável Manipulada. Variável sobre a qual o controlador atua para controlar o processo, como posição de uma válvula, tensão aplicada a uma resistência de aquecimento, etc.

Erro ou Desvio: Diferença entre SV e PV. SV-PV para ação reversa e PV-SV para ação direta.

Ação de controle: Pode ser reversa ou direta. Define genericamente a atuação aplicada à MV na ocorrência de variações da PV.

Ação Reversa: Se PV aumenta, MV diminui. Tipicamente utilizada em controles de aquecimento.

Ação Direta: Se PV aumenta, MV aumenta. Tipicamente utilizada em controles de refrigeração.

A técnica de controle PID consiste em calcular um valor de atuação sobre o processo a partir das informações do valor desejado e do valor atual da variável do processo. Este valor de atuação sobre o processo é transformado em um sinal adequado ao atuador utilizado (válvula, motor, relé), e deve garantir um controle estável e preciso.

De uma maneira bem simples, o PID é a composição de 3 ações quase intuitivas, conforme resume o quadro a seguir:

P	CORREÇÃO PROPORCIONAL AO ERRO	A correção a ser aplicada ao processo deve crescer na proporção que cresce o erro entre o valor real e o desejado.
I	CORREÇÃO PROPORCIONAL AO PRODUTO ERRO x TEMPO	Erros pequenos mas que existem há muito tempo requerem correção mais intensa.
D	CORREÇÃO PROPORCIONAL À TAXA DE VARIAÇÃO DO ERRO	Se o erro está variando muito rápido, esta taxa de variação deve ser reduzida para evitar oscilações.

Um pouco de matemática

A equação mais usual do PID é apresentada a seguir:

$$MV(t) = K_p \times \left[E(t) + K_i \times \int E(t) dt + K_d \times \frac{dE(t)}{dt} \right]$$

Onde K_p , K_i e K_d são os ganhos das parcelas P, I e D, e definem a intensidade de cada ação.

Equipamentos PID de diferentes fabricantes implementam esta equação de diferentes maneiras. É usual a adoção do conceito de “*Banda Proporcional*” em substituição a K_p , “*Tempo derivativo*” em substituição a K_d e “*Taxa Integral*” ou “*Reset*” em substituição a K_i , ficando a equação da seguinte forma.

$$MV(t) = \frac{100}{P_b} \times \left[E(t) + I_r \times \int E(t) dt + D_t \times \frac{dE(t)}{dt} \right]$$

Onde P_b , I_r e D_t estão relacionados a K_p , K_i e K_d e serão individualmente abordados ao longo deste texto.

CONTROLE PROPORCIONAL

No controle Proporcional, o valor de MV é proporcional ao valor do desvio (SV-PV, para ação reversa de controle), ou seja, para desvio zero (SV=PV), MV=0; à medida que o desvio cresce, MV aumenta até o máximo de 100%. O valor de desvio que provoca MV=100% define a Banda Proporcional (P_b). Com P_b alta, a saída MV só irá assumir um valor alto para corrigir o processo se o desvio for alto. Com P_b baixa, a saída MV assume valores altos de correção para o processo mesmo para pequenos desvios. Em resumo, quanto menor o valor de P_b , mais forte é a ação proporcional de controle.

A figura a seguir ilustra o efeito da variação de P_b no controle de um processo.

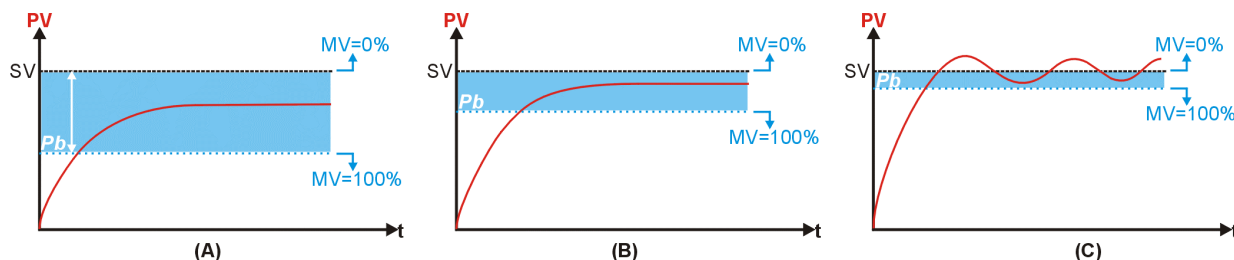


Figura 1 – Efeito da redução de PB no comportamento de PV

Em (1.A), com a banda proporcional grande, o processo estabiliza, porém muito abaixo do setpoint. Com a diminuição da banda proporcional (1.B), a estabilização ocorre mais próximo do setpoint, mas uma redução excessiva da banda proporcional (1.C) pode levar o processo à instabilidade (oscilação). O ajuste da banda proporcional faz parte do processo chamado de **Sintonia** do controle.

Quando a condição desejada (PV=SV) é atingida, o termo proporcional resulta em MV=0, ou seja, nenhuma energia é entregue ao processo, o que faz com que volte a surgir desvio. Por causa disto, um controle proporcional puro nunca consegue estabilizar com PV=SV.

Muitos controladores que operam apenas no modo Proporcional, adicionam um valor constante à saída de MV para garantir que na condição PV=SV alguma energia seja entregue ao sistema, tipicamente 50%. Este valor constante é denominado *Bias* (polarização), e quando ajustável permite que se obtenha uma estabilização de PV mais próxima a SV.

INCLUINDO O CONTROLE INTEGRAL - PI

O integral não é, isoladamente, uma técnica de controle, pois não pode ser empregado separado de uma ação proporcional. A ação integral consiste em uma resposta na saída do controlador (MV) que é proporcional à amplitude e duração do desvio. A ação integral tem o efeito de eliminar o desvio característico de um controle puramente proporcional.

Para compreender melhor, imagine um processo estabilizado com controle P, conforme apresentado na figura 2.A.

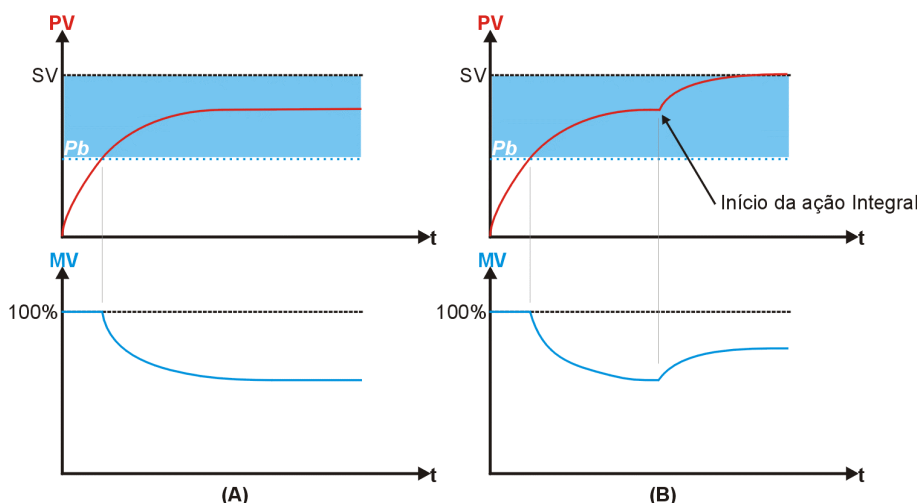


Figura 2 – Efeito da inclusão do controle Integral - PI

Em 2.A, PV e MV atingem uma condição de equilíbrio em que a quantidade de energia entregue ao sistema (MV), é a necessária para manter PV no valor em que ela está. O processo irá permanecer estável nesta condição se nenhuma perturbação ocorrer. Apesar de estável, o processo não atingiu o setpoint (SV), existindo o chamado Erro em Regime Permanente.

Agora observe a figura 2.B, onde no instante assinalado, foi incluída a ação integral. Observe a gradual elevação do valor de MV e a conseqüente eliminação do erro em regime permanente. Com a inclusão da ação integral, o valor de MV é alterado progressivamente no sentido de eliminar o erro de PV, até que PV e MV alcancem um novo equilíbrio, mas agora com $PV=SV$.

A ação integral funciona da seguinte maneira: A intervalos regulares, a ação integral corrige o valor de MV, somando a esta o valor do desvio $SV-PV$. Este intervalo de atuação se chama Tempo Integral, que pode também ser expresso por seu inverso, chamado Taxa Integral (I_r). O aumento da Taxa Integral – I_r – aumenta a atuação do Integral no controle do processo.

A ação integral tem como único objetivo eliminar o erro em regime permanente, e a adoção de um termo integral excessivamente atuante pode levar o processo à instabilidade. A adoção de um integral pouco atuante, retarda em demasia a estabilização $PV=SV$.

INCLUINDO O CONTROLE DERIVATIVO - PD

O derivativo não é, isoladamente, uma técnica de controle, pois não pode ser empregado separado de uma ação proporcional. A ação derivativa consiste em uma resposta na saída do controlador (MV) que é proporcional à velocidade de variação do desvio. A ação derivativa tem o efeito de reduzir a velocidade das variações de PV, evitando que se eleve ou reduza muito rapidamente.

O derivativo só atua quando há variação no erro. Se o processo está estável, seu efeito é nulo. Durante 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.

A figura 3 compara respostas hipotéticas de um processo com controle P (A) e PD (B):

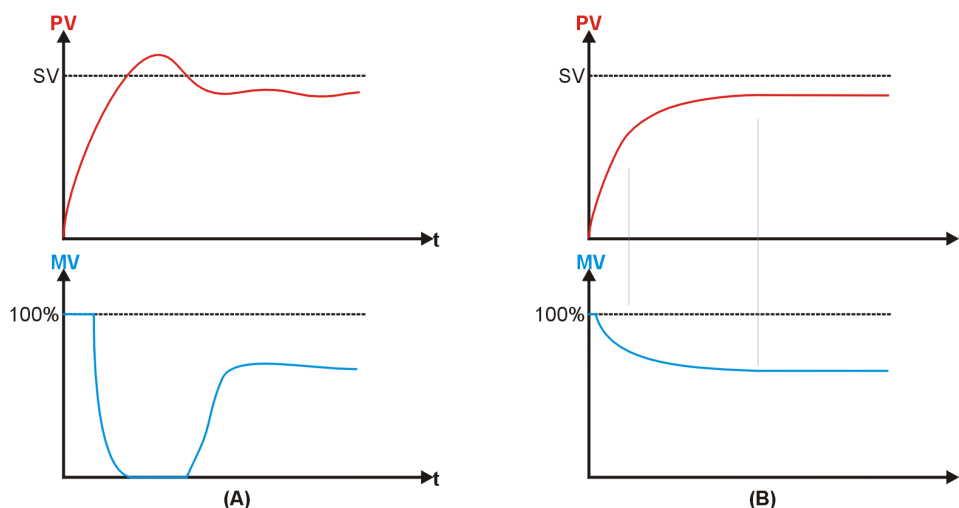


Figura 3 – Comparação de um controle P com um controle PD

No controle P (figura 3.A), se a banda proporcional é pequena, é bem provável que ocorra 'overshoot', onde PV ultrapassa SV antes de estabilizar. Isto ocorre pelo longo tempo em que MV esteve no seu valor máximo e por ter sua redução iniciada já muito próximo de SV, quando já é tarde para impedir o overshoot. Uma solução seria aumentar a banda proporcional, mas isto aumentaria o erro em regime permanente. Outra solução é incluir o controle derivativo (figura 3.B), que reduz o valor de MV se PV está crescendo muito rápido. Ao antecipar a variação de PV, a ação derivativa reduz ou elimina o overshoot e as oscilações no período transitório do processo.

Matematicamente, a contribuição do derivativo no controle é calculada da seguinte maneira: A intervalos regulares, o controlador calcula a variação do desvio do processo, somando à MV o valor desta variação. Se PV está aumentando, o desvio está reduzindo, resultando em uma variação negativa, que reduz o valor de MV e conseqüentemente retarda a elevação de PV. A intensidade da ação derivativa é ajustada variando-se o intervalo de cálculo da diferença, sendo este parâmetro chamado Tempo Derivativo – Dt . O aumento do valor de Dt aumenta a ação derivativa, reduzindo a velocidade de variação de PV.

CONTROLE PID

Ao unir as 3 técnicas conseguimos unir o controle básico do P com a eliminação do erro do I e com a redução de oscilações do D, mas se cria a dificuldade de ajustar a intensidade da cada um dos termos, processo chamado de sintonia do PID.

SINTONIA DO CONTROLE PID

A bibliografia de controle apresenta diversas técnicas para sintonia, tanto operando o processo em manual (malha aberta) quanto em automático (malha fechada). Foge ao objetivo deste artigo apresentar estas técnicas. A grande maioria dos controladores PID industriais incorporam recursos de "Auto Tune", em que o controlador aplica um ensaio ao processo e obtém o conjunto de parâmetros do PID (Pb , Ir e Dt). Para a maior parte dos processos, este cálculo é adequado, mas em muitos casos, é necessária a correção manual para atingir um desempenho de controle mais satisfatório (menos overshoot, estabilização mais rápida, etc.).

Para efetuar manualmente esta correção, é fundamental a compreensão dos princípios de funcionamento aqui expostos. A seguir são apresentadas diretrizes para otimização manual do desempenho de um controlador PID.

Corrigindo manualmente o PID

Em muitos casos é necessário ajuste da sintonia após a conclusão do Auto Tune. Este ajuste é manual e deve ser feito por tentativa e erro, aplicando uma alteração nos parâmetros PID e verificando o desempenho do processo, até que o desempenho desejado seja obtido. Para isto

é necessário conhecimento do efeito de cada parâmetro do PID sobre o desempenho do controle, além de experiência em diferentes processos.

As definições de um bom desempenho de controle são também bastante variadas, e muitas vezes o usuário espera de seu sistema uma resposta que ele não tem capacidade de atingir, independente do controlador utilizado. É comum o operador reclamar que a temperatura do forno demora muito a subir, mas o controlador está com MV sempre a 100%, ou seja, não tem mais o que fazer para acelerar. Também às vezes o operador quer velocidade mas não quer overshoot, o que muitas vezes é conflitante.

Na avaliação do desempenho do controlador, é importante analisar o comportamento da PV e MV, e verificar se o controlador está atuando sobre MV nos momentos adequados. Coloque-se no lugar do controlador e imagine o que você faria com a MV, e compare com a ação tomada pelo controlador. À medida que se adquire experiência, este tipo de julgamento passa a ser bastante eficiente.

A tabela 1 a seguir resume o efeito de cada um dos parâmetros sobre o desempenho do processo:

Parâmetro	Ao aumentar, o processo ...	Ao diminuir, o processo ...
Pb	Torna-se mais lento. Geralmente se torna mais estável ou menos oscilante. Tem menos overshoot	Torna-se mais rápido Fica mais instável ou mais oscilante Tem mais overshoot
Ir	Torna-se mais rápido, atingindo rapidamente o setpoint Fica mais instável ou mais oscilante Tem mais overshoot	Torna-se mais lento, demorando para atingir o setpoint Fica mais estável ou mais oscilante. Tem menos overshoot.
Dt	Torna-se mais lento. Tem menos overshoot	Torna-se mais rápido. Tem mais overshoot.

Tabela 1 – O efeito de cada parâmetro PID sobre o processo

A tabela 2 a seguir apresenta sugestões de alteração nos parâmetros PID baseadas no comportamento do processo, visando sua melhoria:

Se o desempenho do processo ...	Tente uma a uma as opções:
Está quase bom, mas o overshoot está um pouco alto	Aumentar <i>Pb</i> em 20% Diminuir <i>Ir</i> em 20% Aumentar <i>Dt</i> em 50%
Está quase bom, mas não tem overshoot e demora para atingir o setpoint	Diminuir <i>Pb</i> em 20% Aumentar <i>Ir</i> em 20% Diminuir <i>Dt</i> em 50%
Está bom, mas MV está sempre variando entre 0% e 100% ou está variando demais.	Diminuir <i>Dt</i> em 50% Aumentar <i>Pb</i> em 20%
Está ruim. Após a partida, o transitório dura vários períodos de oscilação, que reduz muito lentamente ou não reduz.	Aumentar <i>Pb</i> em 50%
Está ruim. Após a partida avança lentamente em direção ao setpoint, sem overshoot. Ainda está longe do setpoint e MV já é menor que 100%	Diminuir <i>Pb</i> em 50% Aumentar <i>Ir</i> em 50% Diminuir <i>Dt</i> em 70%

Tabela 2 – Como melhorar o desempenho do processo