



SISTEMAS DE CONTROLE

Geralmente, existem várias condições internas e externas que afetam o desempenho de um processo. Estas condições são denominadas de variáveis de processo, tais como: temperatura, pressão, nível, vazão, volume, etc. Um processo pode ser controlado através de um sistema de controle medindo-se variáveis, parâmetros que representam o estado deste processo, ajustando-as automaticamente de maneira a se conseguir um valor que representa o estado desejado para este processo. As condições de ambiente devem sempre ser incluídas na relação de variáveis do processo.

Um sistema de controle gerencia determinado número de objetos (também denominados entidades). Os objetos descrevem as variáveis de processo controladas bem como também descrevem os elementos habituais encontrados no console de um terminal de controle. A atividade de configuração de um sistema de controle inicia-se geralmente na definição de cada variável de processo. Em todo o sistema existem basicamente duas variáveis: (1) as simples ou primitivas e (2) as variáveis compostas, formadas a partir destas.

As variáveis primitivas podem ser classificadas como analógica ou discreta. Como principais atributos das variáveis analógicas destacam-se uma descrição sucinta da mesma, sua unidade de engenharia, o último valor lido da variável e se couber: o limite inferior (valor em unidade de engenharia a ser atribuído ao valor 0% da variável) e o limite superior (valor em unidade de engenharia a ser atribuído ao valor 100% da variável). Como atributos das variáveis discretas (também denominadas de variáveis digitais) destacam-se uma descrição sucinta da mesma e a descrição do seu estado, ou seja, o texto a ser atribuído aos estados 0 e 1 da variável, como por exemplo, aberto/fechado para válvulas e ligado/desligado para motores.



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE**

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

O CONTROLE DE PROCESSOS

O termo controle de processos pode ser definido como o controle que tem por objetivo manter certas variáveis de um sistema entre os seus limites operacionais desejados. Estes sistemas de controle podem necessitar constantemente da intervenção humana, ou serem automáticos.

A partir do momento em que a monitoração e o controle de um processo são realizados, o processamento das variáveis de campo é executado. Então, o controle do sistema permite que qualquer evento imprevisto no processo seja detectado e que mudanças nos valores tomados como referências sejam imediatamente providenciadas no sentido de normalizar a situação. Ao operador fica a incumbência de acompanhar o processo de controle, com o mínimo de interferência, excetuando-se casos em que sejam necessárias tomadas de decisão de sua restrita atribuição.

Neste momento faz-se necessária a definição da terminologia básica aplicada a sistemas de controle.

Variável controlada e variável manipulada- a variável controlada é a grandeza ou a condição que é mensurada e controlada. A variável manipulada é a grandeza ou a condição modificada pelo controlador, de tal forma que altere o valor da variável controlada. A variável controlada é a saída do sistema.

Controlar- significa medir o valor da variável controlada do sistema e utilizar a variável manipulada no sistema para corrigir ou limitar os desvios do valor medido a partir de um valor desejado.

Sistemas a controlar ou plantas- qualquer objeto físico a ser controlado.

Processo- toda operação a ser controlada.

Sistema- combinação de componentes que agem em conjunto para atingir determinado objetivo. O conceito de sistema que se aplica a este trabalho é o que se relaciona a fenômenos físicos dinâmicos.

Distúrbio- é um sinal que tende a afetar de maneira adversa o valor da variável de saída de um sistema. Quando gerado fora do sistema ele é denominado distúrbio externo e se comporta como um sinal de entrada no sistema.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

Diagrama de blocos- é uma representação gráfica das funções desempenhadas por cada componente de um sistema. Os blocos são conectados por meio de setas que indicam o sentido do fluxo de sinais. A seta que aponta para o bloco indica a entrada e a seta que aponta para fora do bloco representa a saída. Essas setas são também designadas como sinais. Em um diagrama em blocos, todas as variáveis do sistema são ligadas umas as outras por meio de blocos funcionais. Sendo assim, o diagrama de blocos descreve o inter-relacionamento que existe entre os vários componentes. Um diagrama de blocos contém informações relativas ao comportamento dinâmico, mas não contempla nenhuma informação sobre a construção física do sistema. Na Figura 1 apresentam-se os elementos básicos constituintes de um diagrama de blocos.

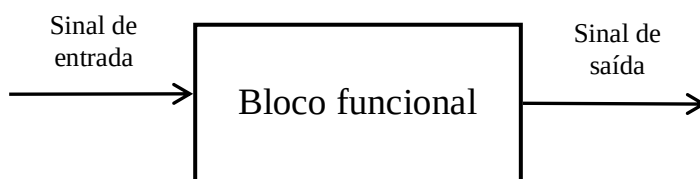


Figura 1. Elementos básicos constituintes de um diagrama de blocos.

Somador- o somador é um círculo com um “*xis*”. Esse símbolo indica a operação de soma. O sinal de mais e o sinal de menos na extremidade de cada seta indica se o sinal deve ser somado ou subtraído. Vale salientar que as quantidades a serem somadas ou subtraídas devem ter as mesmas dimensões e as mesmas unidades.

Ponto de ramificação- é um ponto em que o sinal que vem de um bloco avança simultaneamente em direção a outros blocos ou somadores. Na Figura 2 representa-se o somador e o ponto de ramificação.



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE**

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

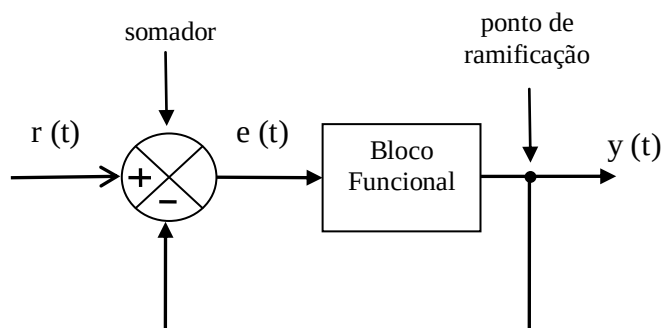


Figura 2. O somador e o ponto de ramificação.

Os sistemas de controle podem atuar em malha aberta ou em malha fechada.

O CONTROLE EM MALHA ABERTA

O controle em malha aberta consiste em aplicar um sinal de controle pré-determinado, esperando-se que ao final de um determinado tempo a variável controlada atinja um determinado valor ou apresente um determinado comportamento. Neste tipo de sistema de controle não são utilizadas informações sobre evolução do processo (sinal de saída) para determinar o sinal de controle a ser aplicado em um determinado instante. Mais especificamente, o sinal de controle não é calculado a partir de uma medição do sinal de saída.

No controle em malha aberta, a cada entrada de referência corresponderá uma condição fixa de operação. As características básicas deste tipo de controle são a imprecisão e nenhuma adaptação a distúrbios externos. Por outro lado são em geral simples e baratos, pois não envolvem equipamentos sofisticados para medição e/ou determinação do sinal de controle.

Qualquer sistema de controle cujas operações são efetuadas em uma sequência em função do tempo é um sistema de malha aberta. Na Figura 3 apresenta-se o diagrama em blocos de um sistema de controle em malha aberta.



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE**

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO



Figura 3 Diagrama em blocos de um sistema de controle em malha aberta.

O CONTROLE EM MALHA FECHADA

No controle em malha fechada, informações sobre como a saída de controle está evoluindo são utilizadas para determinar o sinal de controle que deve ser aplicado ao processo em um instante específico. Isto é feito a partir de uma *realimentação* da saída para a entrada. Em geral, a fim de tornar o sistema mais preciso e de fazer com que ele reaja a distúrbios externos, o sinal de saída é comparado com um sinal de referência (chamado comumente de *set-point*) e o desvio (erro) entre estes dois sinais é utilizado para determinar o sinal de controle que será aplicado ao processo. Assim, o sinal de controle é determinado de forma a corrigir este desvio entre a saída e o sinal de referência. O dispositivo que utiliza o sinal de erro para determinar ou calcular o sinal de controle a ser aplicado à planta é chamado de *controlador* ou *compensador*.

A utilização da realimentação e, portanto, do controle em malha fechada, permite entre outros: (1) aumentar a precisão do sistema, (2) rejeitar o efeito de distúrbios externos, (3) melhorar a dinâmica do sistema (estabilizar um sistema naturalmente instável em malha aberta) e (4) diminuir a sensibilidade do sistema a variações dos parâmetros do processo (torna o sistema *robusto*).

O diagrama básico de um sistema de controle em malha fechada é mostrado na Figura 4.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

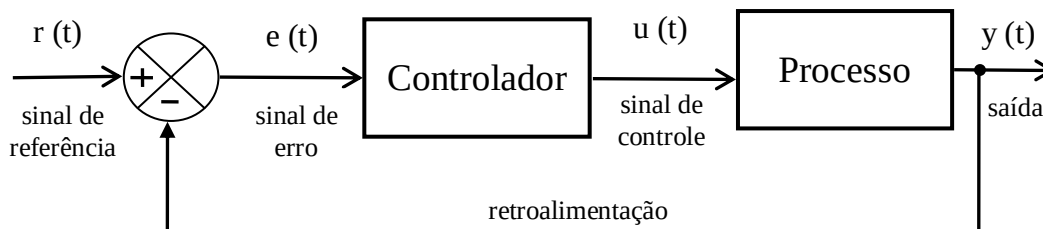


Figura 4. Diagrama básico de um sistema de controle em malha fechada

CONTROLADORES AUTOMÁTICOS

Um controlador automático compara o valor real de saída do sistema físico a ser controlado com a entrada de referência (set point), determina o desvio e produz um sinal de controle que vai reduzir o desvio a zero ou a um valor bem pequeno. O modo como o controlador automático produz o sinal de controle é chamada de ação de controle. Na Figura 5 apresenta-se o diagrama de blocos representativo de um sistema de controle industrial. Esse diagrama consiste de um controlador automático, um atuador, uma planta, um elemento de medida (sensor) e um condicionador de sinal.

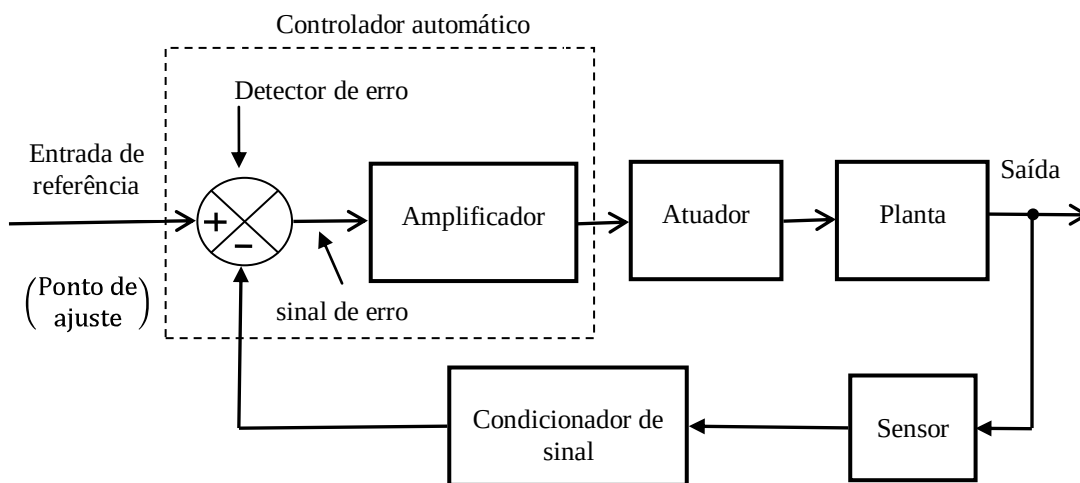


Figura 5. Diagrama de blocos de um sistema de controle automático.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

O controlador detecta o sinal de erro, sendo este, geralmente, de pequeno valor, e o amplifica a um valor adequado ao sistema. A saída do controlador automático alimenta um atuador.

O atuador é um dispositivo capaz de manejar potências consideráveis e que atua na planta (segundo o sinal de controle) com a finalidade de fazer com que a saída se aproxime do sinal de entrada de referência.

O elemento de medição, sensor/transdutor, que fica situado no ramo de realimentação do sistema de malha fechada, é um dispositivo que faz a conversão da variável de saída em outra variável. Este dispositivo normalmente converte uma grandeza física qualquer em um sinal de origem elétrica.

O condicionador de sinal, também situado na linha de realimentação do sistema de malha fechada, é geralmente um circuito eletrônico que é capaz de realizar a conversão do sinal oriundo do sensor em um sinal capaz de ser comparado com o sinal de entrada de referência.

ALGORÍTMOS DE CONTROLE TRADICIONAIS

Os algoritmos de controle classificam os controladores de acordo com suas ações de controle.

O controlador liga-desliga ou *on-off* - é o tipo mais simples. Este tipo de controle implica em que sempre se use a ação corretiva máxima. Deste modo a variável manipulada tem seu valor máximo quando o erro é positivo e seu valor mínimo quando o erro é negativo. Neste tipo de controle não há parâmetros a serem configurados a não serem as ações de mínimo e máximo que se executam no sinal de controle. O controle *on-off* muitas vezes é apropriado para manter a variável controlada do processo próxima ao valor de referência que foi especificado, mas tipicamente resulta em um sistema onde as variáveis oscilam. Portanto, sua principal desvantagem é a variação permanente da saída controlada em torno do sinal de referência desejado.

Matematicamente sua ação pode ser descrita como:



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

$$u(t) = \begin{cases} u_{max} & \text{para } e > 0 \\ u_{min} & \text{para } e < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Onde $e = r(t) - y(t)$ representa a diferença entre a referência especificada pelo operador e a saída medida do processo e é denominado erro de controle. Os valores u_{max} e u_{min} são constantes. O valor mínimo u_{min} é normalmente zero ou então $-u_{max}$. Na Figura 6 apresentam-se as características de um controlador liga-desliga, onde uma resposta típica é também apresentada.

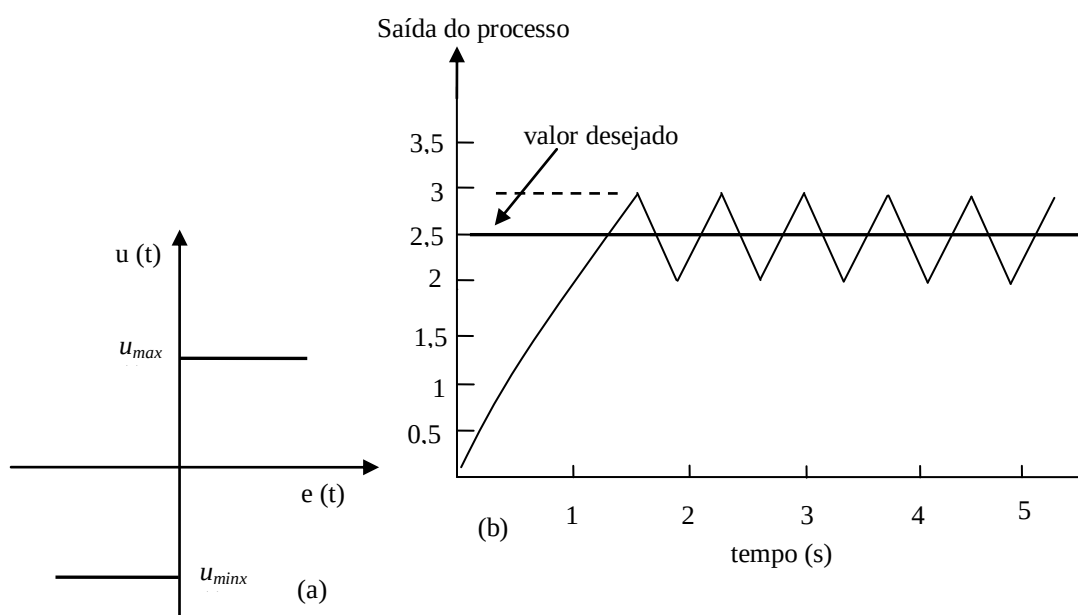


Figura 6. (a) Característica de um controlador liga-desliga; (b) forma de onda típica de saída.

Através da observação do gráfico da Figura 6 constata-se que no controle *on-off*, o sinal $u(t)$ permanece em um valor máximo ou em um valor mínimo, conforme o sinal de erro seja negativo ou positivo. Para diminuir a frequência desta oscilação pode-se acrescentar ao sistema de controle um parâmetro denominado histerese. Este parâmetro corresponde a uma região simétrica ao valor da referência desejada e cria assim uma região na qual a saída do controlador $u(t)$ mantenha seu valor presente até que o sinal de erro atuante tenha sido movido além do valor desta faixa. O novo comportamento da saída é mostrado na Figura 7. Com isto consegue-se uma diminuição na frequência de oscilação da saída, porém se a histerese for definida com um valor muito elevado a variação na amplitude da saída será muito grande e um novo problema surge. Assim o valor da



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

histerese será um compromisso entre precisão desejada e a durabilidade do elemento atuador.

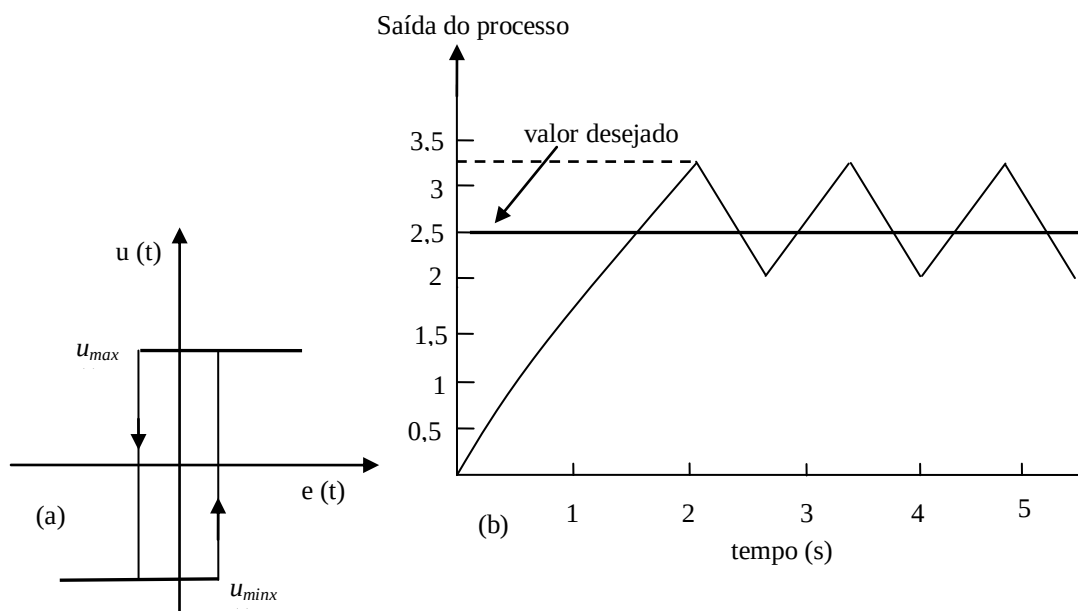


Figura 7 (a) Característica de um controlador liga-desliga com histerese; (b) forma de onda típica de saída.

O controlador proporcional – tem sua ação de controle proporcional ao erro, ou seja, o controlador proporcional (P) gera a sua saída proporcional ao tamanho do sinal de erro atuante, $e(t)$. Na equação, no domínio do tempo, do algoritmo de posição do controlador P, a saída $u(t)$ é dada por:

$$u(t) = K_p \times e(t) + u_0 \quad (2)$$

O fator multiplicativo, K_p , é denominado ganho do controlador. A variável u_0 é o valor inicial (sinal de polarização), ou seja, é a posição da saída do controlador no momento em que ele foi colocado em automático. A ação de controle é simplesmente proporcional ao erro. Quando o erro de controle é igual a zero, a variável de controle $u(t) = u_0$. A polarização u_0 a princípio é fixada em $(u_{max} - u_{min})/2$, contudo pode ser ajustada manualmente de forma que o erro de controle em estado estacionário seja zero em uma dada referência. Observa-se que quanto maior o ganho, maior será a ação do controlador, para um mesmo desvio ou erro na variável de processo. A Figura 8 mostra o diagrama de bloco para o controle proporcional.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

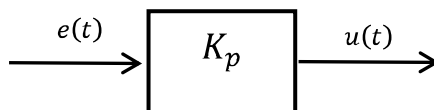


Figura 8 Diagrama em blocos do termo de controle proporcional.

A Figura 9 mostra o diagrama de blocos de um controlador do tipo proporcional inserido em um sistema com controle automático.

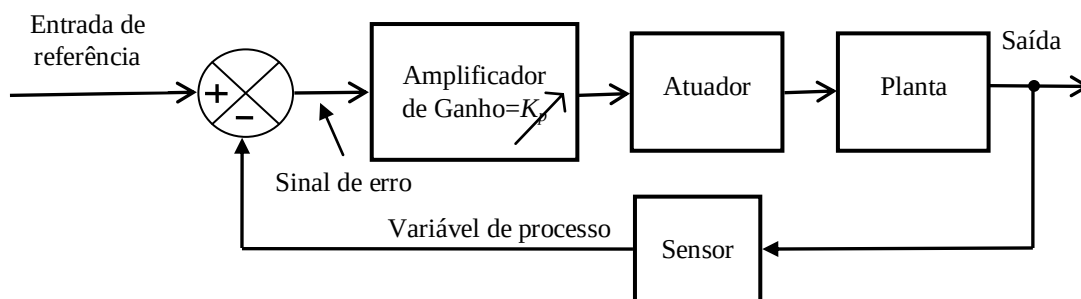


Figura 9 Diagrama de blocos de um sistema com um controlador proporcional.

Conclui-se que o controlador proporcional é essencialmente um amplificador com um ganho ajustável, qualquer que seja o mecanismo real e o tipo de energia utilizada na operação.

Para descrever a característica do controlador proporcional deve-se especificar os limites u_{max} e u_{min} da variável de controle. A faixa linear pode ser dada pela inclinação da curva característica (ganho K_p do controlador), ou seja, a faixa onde a curva característica é linear (conhecida como banda proporcional BP). Esta faixa está normalmente centrada em torno do valor da referência. A banda proporcional e o ganho do controlador estão relacionados através da equação abaixo.

$$u_{max} - u_{min} = K_p \times BP \quad (3)$$

Normalmente se assume que $u_{max} - u_{min} = 100\%$, o que implica que o ganho proporcional pode ser definido, como:

$$K_p = 100\% / BP \quad (4)$$

A banda proporcional também pode ser definida como o erro que provoca uma variação de 100% na saída do controlador:

$$\Delta u(t) = \frac{100}{BP} \times \Delta e(t) \quad (5)$$



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

A Figura 10 mostra a curva característica de um controlador proporcional. Este tipo de controlador é caracterizado por uma função não linear $u = f_c(e)$, a qual é dependente do erro de controle.

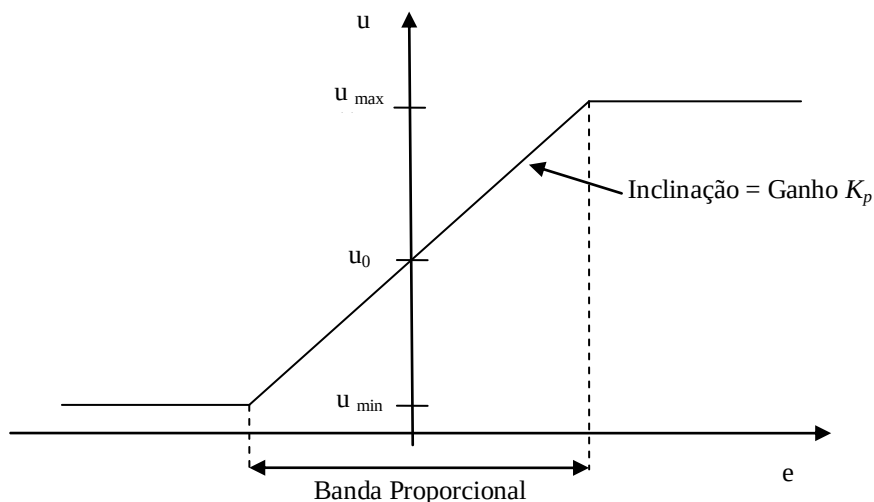


Figura 10. Curva característica de um controlador proporcional. A entrada é o sinal de erro $e(t)$, e a saída é o sinal de controle $u(t)$.

Na Figura 11 mostra-se a ação do controlador proporcional quando ocorre um erro em degrau. Constata-se que a ação proporcional tem a mesma forma do erro, apenas multiplicada por um ganho proporcional (no caso $K_p = 2$).

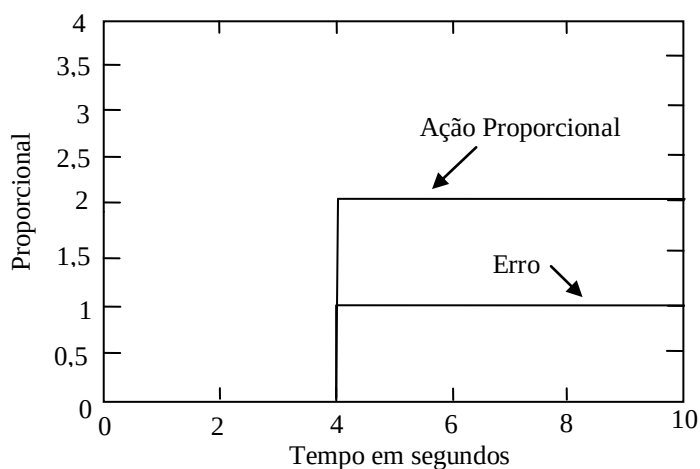


Figura 11. Ação do controlador proporcional submetido a um erro degrau.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

Vale salientar que o controlador proporcional atua como um controlador *on-off* quando os erros de controle são grandes.

O controlador integral – em um controlador com ação de controle integral, o valor de saída $u(t)$ do controlador sofre alteração a uma taxa de variação proporcional ao sinal de erro $e(t)$. A representação do controlador integral no domínio do tempo é:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (6)$$

$$\text{Logo: } u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (7)$$

Onde K_i é o ganho do controlador integral. O diagrama de blocos no domínio do tempo é mostrado na Figura 12.

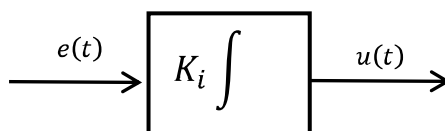


Figura 12. Diagrama em blocos do termo de controle integral.

Na Figura 13 mostra-se a ação do controlador integral quando ocorre um *erro* em degrau. Constata-se que a ação integral será a integral do degrau, que é uma rampa. A ação integral irá aumentar ou diminuir a saída do controlador indefinidamente enquanto houver erro. O tempo integral observado na Figura 13 é igual a 2.

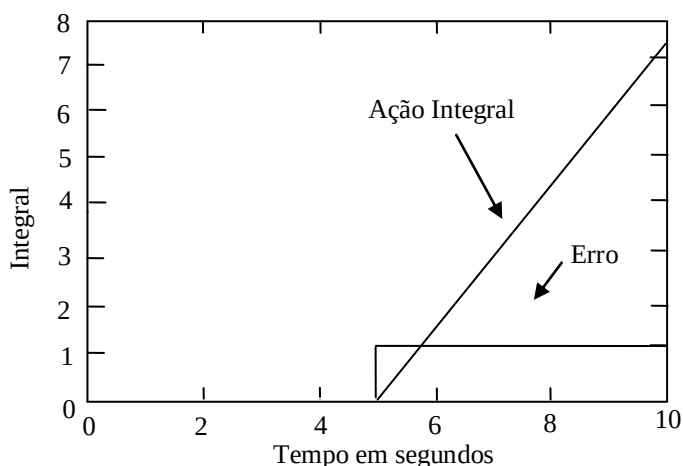


Figura 13. Ação do controlador integral submetido a um erro degrau.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

O controlador derivativo – no controlador com ação derivativa, o valor de saída $u(t)$ do controlador é proporcional à derivada do erro $e(t)$. Ou seja:

$$u(t) = K_D \frac{de}{dt} \quad (8)$$

Onde o ganho do controle derivativo é denominado K_D . Como descrito em Johnson e Moradi (2005) esta forma particular é denominada de controle derivativo puro, para a qual a representação em diagrama de bloco é mostrada na Figura 14.

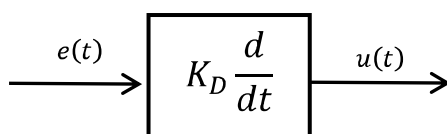


Figura 14. Diagrama em blocos do termo de controle derivativo.

Na Figura 15 mostra-se a ação derivativa do controlador integral quando ocorre um erro em rampa. Observa-se que a ação integral será um valor constante (degrau), pois a derivada de uma rampa é um valor fixo (neste caso $de/dt = 1$) que será multiplicado por um tempo derivativo (neste caso $K_p = 2$ e $T_D = 7$).

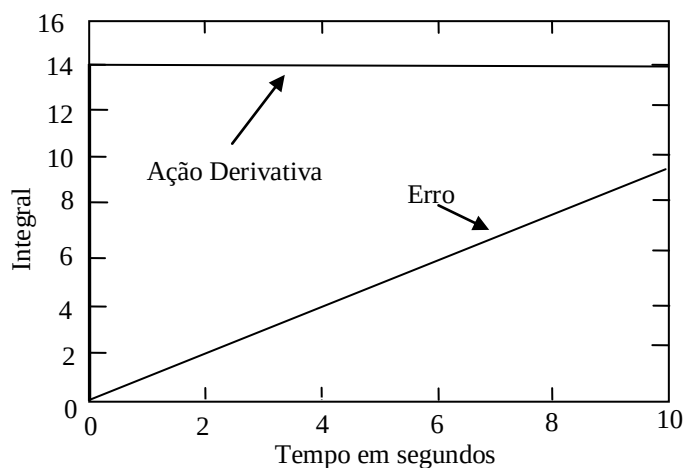


Figura 15 Ação do controlador derivativo quando ocorre um erro em rampa.

No controlador derivativo, uma grande taxa de variação de erro pode causar uma grande ação corretiva, mesmo que o erro seja pequeno. Por outro lado, caso o sinal de erro não varie, não existirá ação corretiva, ainda que o erro seja grande. A utilização do controle derivativo requer mais cuidado do que quando se utiliza o controle proporcional ou o integral. Em muitas aplicações reais um controle derivativo puro não é utilizado devido à



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

possibilidade de amplificação do ruído de medição. Sendo assim uma modificação no termo derivativo tem de ser implementada.

O controlador proporcional-integral (PI) – o controlador proporcional e integral (PI) gera a sua saída proporcionalmente ao erro (P), e proporcionalmente à integral do erro (I).

A equação, no domínio do tempo, para um controlador PI clássico é descrita abaixo:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (9)$$

Onde o ganho proporcional é K_p , e o ganho integral é K_i . No diagrama de bloco da Figura 16 apresenta-se o controlador PI clássico.

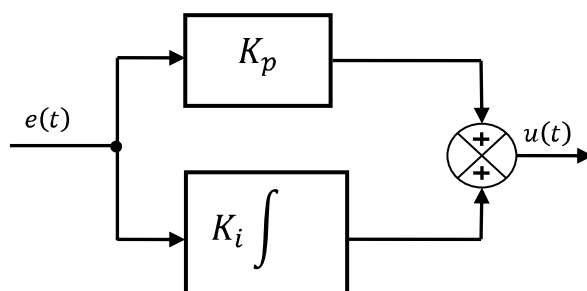


Figura 16. Diagrama de blocos de um controlador proporcional-derivativo clássico.

Em aplicações industriais é comum se utilizar de uma representação do controlador PD denominada de forma *constante de tempo*. A forma constante de tempo, que modifica os parâmetros do PD, pode ser deduzida a partir da forma desacoplada descrita pela Equação 9.

Da Equação 9, coloca-se K_p em evidência, então temos:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{K_i}{K_p} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (10)$$

Em sequência define-se a constante de tempo de integração, como:

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} \quad (11)$$

Então, substituindo 11 em 10, vem:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (12)$$

Onde T_i é a constante de tempo integral.

Assim temos que o ganho proporcional também multiplica o termo integral.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

Na Figura 17 apresenta-se a ação do controlador PI quando ocorre um *erro* em degrau. Observa-se que a ação proporcional, considerando-se $K_p = 2$, muda instantaneamente a saída na presença de um erro, contudo é a ação integral que continua mudando a saída enquanto existir esse erro. Portanto o controlador PI não irá aceitar um erro em regime permanente entre o valor de referência (setpoint) e a variável a ser controlada. A saída do controlador tenderá a saturar na tentativa de eliminar o erro.

Pode-se também observar na Figura 17 que, após o tempo integral, que neste caso é 2, a ação integral fez com que a saída repetisse a ação proporcional. Isto é, quando ocorreu o erro de 1%, a saída do controlador foi para 2% devido à ação proporcional e, após o tempo integral de 2 segundos a saída foi para 5% devido à ação integral de 3% adicionada a ação proporcional, que continua em 2%. Pode-se dizer que a ação integral *repetiu* a ação proporcional. Este é o motivo pelo qual o tempo integral (T_I) também é conhecido como o tempo de repetição, e o seu inverso ($1/T_I$) como repetições por minuto ou segundos.

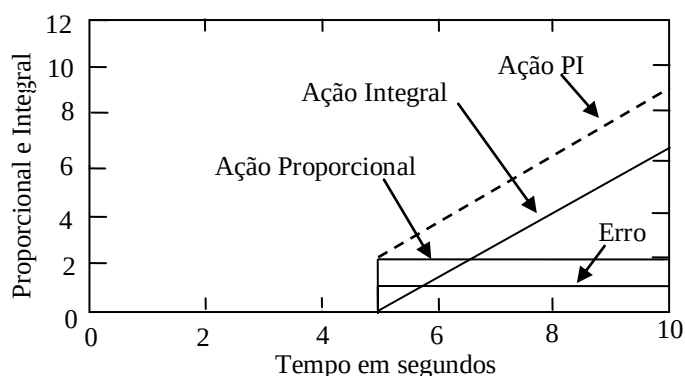


Figura 17. Ação do controlador proporcional e integral submetido a um erro degrau.

O controlador proporcional-derivativo – o controlador proporcional e derivativo (PD) gera a sua saída proporcionalmente ao erro (P), e proporcionalmente à deriva do erro.

A equação, no domínio do tempo, para um controlador PD é descrita abaixo:

$$u(t) = K_p e(t) + K_D \frac{de}{dt} \quad (10)$$

Onde o ganho proporcional é denominado K_p , e o ganho derivativo é K_D . O diagrama de bloco para um controlador PD clássico é mostrado na Figura 18.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

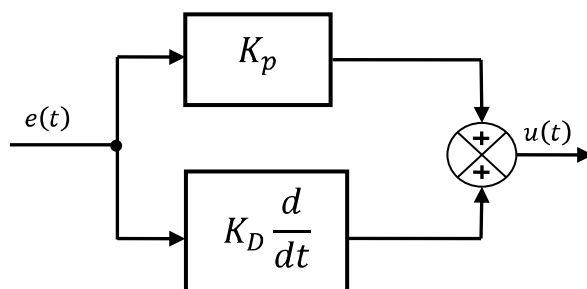


Figura 18 Diagrama de blocos de um controlador proporcional-derivativo clássico.

Contudo, representações industriais do controlador PD freqüentemente utilizam a forma *constante de tempo* para os parâmetros do PD no lugar da forma desacoplada apresentada na equação 10.

Da equação 10 colocando-se K_p em evidência, temos:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{K_D}{K_p} \frac{de}{dt} \right) \quad (11)$$

Define-se a constante de tempo como:

$$T_D = \frac{K_D}{K_p} \quad (12)$$

Substituindo 12 em 11, vem:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + T_D \frac{de}{dt} \right) \quad (13)$$

Onde T_D é a constante de tempo derivativa.

Na Figura 19 mostra-se a ação do controlador PD quando ocorre um erro em rampa. Observa-se que a ação proporcional é uma rampa (ganho $K_p = 3$) e a ação derivativa adiciona um valor constante a esta rampa. Observa-se, ainda, que o tempo derivativo ($T_D = 5$) antecipa a ação proporcional que só iria ocorrer no tempo de 5 segundos depois. Caso não existisse a ação derivativa a saída do controlador só seria igual a 15% depois de transcorridos os 5 segundos. Mas, conforme se observa na Figura 1.14, com o tempo derivativo igual a cinco, a saída do controlador já é igual a 15% no tempo zero, imediatamente após o controlador ter calculado a derivada do erro. Conclui-se, então, que o termo derivativo procura estimar uma tendência de aumento ou diminuição do erro, e atuar na saída do controlador de modo a eliminar este erro que está sendo previsto no futuro. Logo a ação derivativa tem uma função de antecipação e também evita oscilações em processos lentos.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

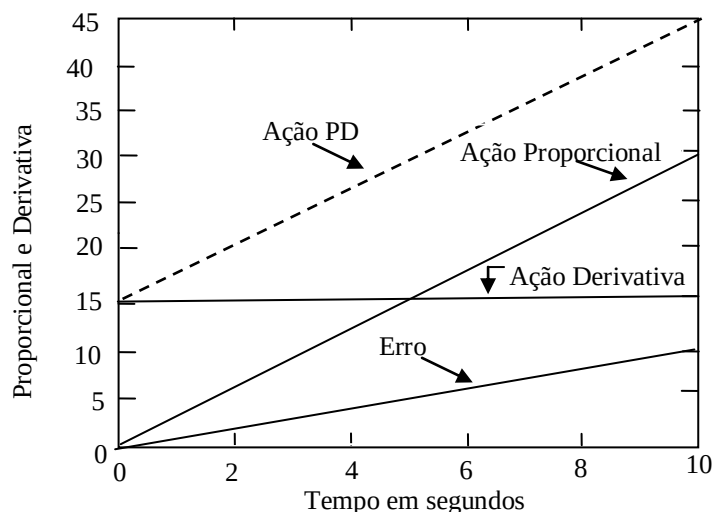


Figura 19 Ação do controlador proporcional-derivativo quando ocorre um erro em rampa.

O controlador proporcional, integral e derivativo – o controlador PID, reúne todas as características apresentadas anteriormente. Sendo assim, o controlador proporcional, integral e derivativo (PID) tem a sua saída proporcional ao erro (P), proporcional à integral do erro e proporcional a derivada do erro.

A família dos controladores PID é construída de várias combinações dos termos proporcional, integral e derivativo de acordo com os requerimentos de desempenho. Uma das combinações para o controlador PID é a combinação em que os termos P, I e D são dispostos de forma paralela. Este arranjo é também conhecido como um arranjo acadêmico do controlador PID ou ainda como equação paralela. A equação paralela não incorpora qualquer das modificações que usualmente podem ser implementadas para a obtenção de um controlador mais funcional.

Esta separação dos três termos é melhor evidenciada na Figura 20.



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE**

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

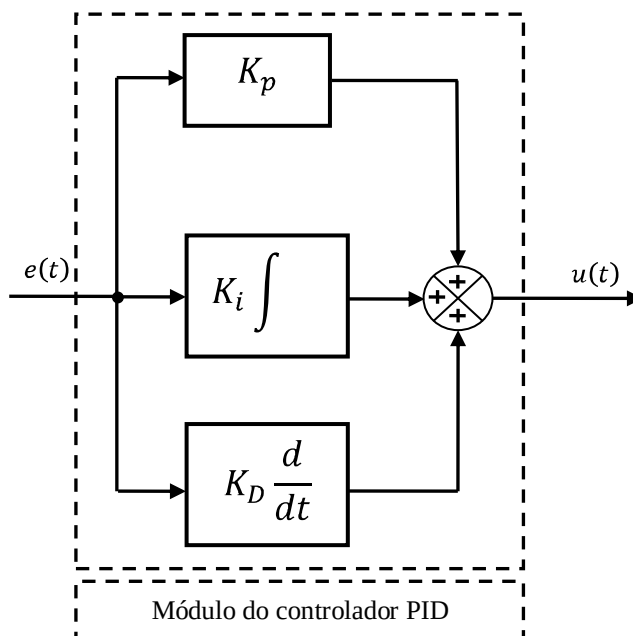


Figura 20. Arquitetura paralela para o controlador PID clássico.

Uma análise que é possível fazer observando-se a Figura 20, é que uma mudança numérica em qualquer coeficiente individual, K_p , K_i ou K_D , muda somente o valor da contribuição em cada ramo do termo. Por exemplo, se o valor de K_D é modificado, então somente o valor da ação de derivação é alterado e esta mudança é *desacoplada* e independente do valor do termo proporcional e do termo integral. Este desacoplamento dos três termos é uma consequência da arquitetura paralela do controlador PID.

A arquitetura paralela do controlador PID resulta em uma representação matemática no domínio do tempo que é descrita pela Equação 14.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de}{dt} \quad (14)$$

Contudo, é usual em representações industriais do controlador PID a forma *constante de tempo* no lugar da forma desacoplada descrita na Equação 14. A forma que utiliza a constante de tempo pode ser deduzida da Equação 14. Assim colocando-se em evidência a constante K_p , tem-se:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{K_i}{K_p} \int_0^t e(t) dt + \frac{K_D}{K_p} \frac{de}{dt} \right) \quad (15)$$

Definindo as novas constantes de tempo, como:

$$T_D = \frac{K_D}{K_p} \text{ e } T_i = \frac{K_p}{K_i} \quad (16)$$



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

Substituindo 16 em 15, tem-se que:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de}{dt} \right) \quad (17)$$

Os parâmetros do controlador são, então: o ganho proporcional K_p , o tempo integral T_i , e o tempo derivativo T_D .

Na Figura 21 apresenta-se o diagrama de blocos de uma planta que utiliza um controlador PID clássico, na configuração paralela. Observa-se que a variável de controle é a soma das três parcelas: P, I e D.

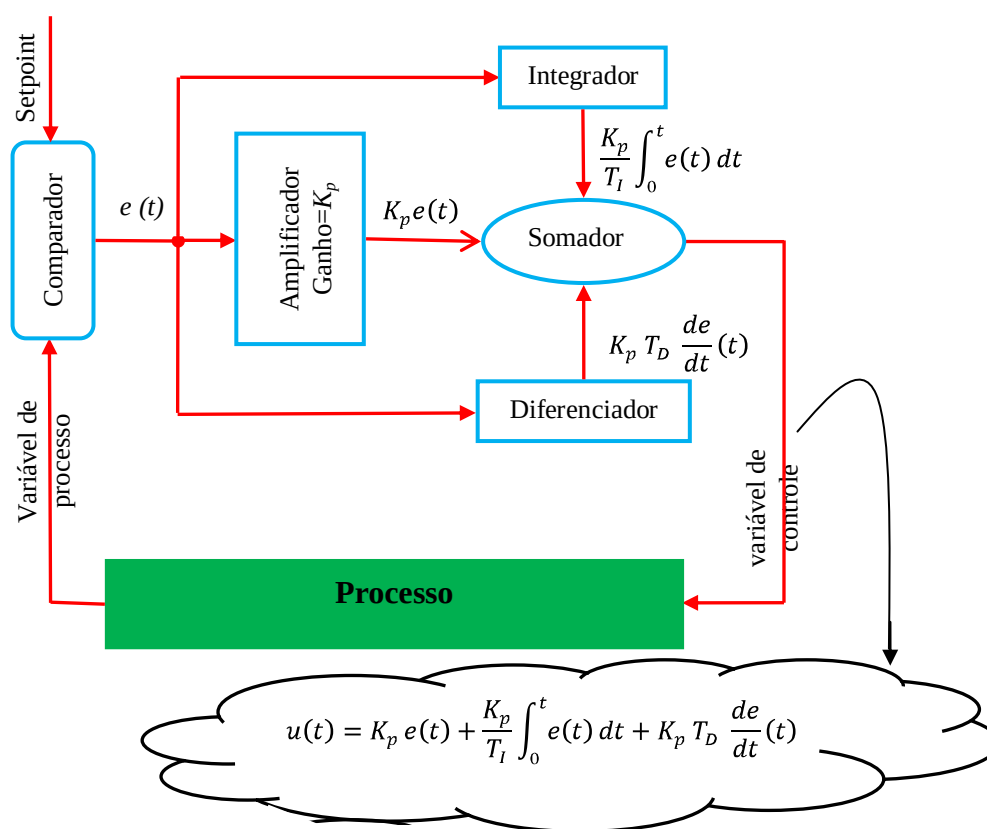


Figura 21. Diagrama de blocos de uma planta com um controlador PID na configuração paralela.



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE**

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

PRINCÍPIOS BÁSICOS DE PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE

Qualquer sistema de controle deve ser estável. Esta é uma exigência primordial. Além da estabilidade absoluta, um sistema de controle deve Ter uma estabilidade relativamente razoável; assim, a resposta deve apresentar amortecimento razoável. Além disso, a velocidade de resposta deve ser razoavelmente rápida e o sistema de controle deve ser capaz de reduzir erros a zero ou a um valor pequeno tolerável.

A exigência da estabilidade relativa razoável está relacionada à exigência de precisão no estado estacionário, razão de incompatibilidade entre esses dois fatores. Portanto, no projeto de sistemas de controle, é necessário fazer o compromisso mais efetivo entre estas duas exigências.

Existem duas teorias de controle: clássica e moderna. A primeira teoria utiliza o conceito de função de transferência. A análise e projeto são feitos no domínio "s" e/ou no domínio de frequência, entretanto, não pode manipular sistemas de controle com entradas e saídas múltiplas. A Segunda baseia-se no conceito de espaço de estados, utilizando-se a análise vetorial-matricial. A análise e o projeto são feitos no domínio do tempo

Os componentes envolvidos nos sistemas de controle são amplamente diferentes. Eles podem ser eletromecânicos, hidráulicos, pneumáticos, eletrônicos, etc. Em engenharia de controle, em vez de tratar os dispositivos de "hardware", substitui-se os tais dispositivos ou componentes pelos seus modelos matemáticos.

Obter um modelo matemático razoavelmente preciso de um componente físico é um dos problemas mais importantes em engenharia de controle. Um modelo matemático não deve ser nem muito complicado nem muito simplificado. Um modelo matemático deve representar os aspectos essenciais de um componente físico. As previsões do comportamento do sistema baseadas no modelo matemático devem ser razoavelmente precisas. Embora as relações entre entrada-saída de muitos componentes sejam não-



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE**

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

lineares, normalmente linearizam-se tais relações em torno de pontos de operação, limitando a faixa de variáveis para ser pequena - facilitando o tratamento analítico e computacional.

A análise de um sistema de controle corresponde a investigação, sob condições específicas, do desempenho do sistema cujo modelo matemático é conhecido. Visto que qualquer sistema é constituído de componente, a análise deve começar por uma descrição matemática de cada componente. Uma vez que o modelo matemático do sistema completo tenha sido deduzido, a maneira pela qual a análise é executada independe do fato do sistema físico ser pneumático, elétrico, mecânico, etc. Por análise da resposta transitória geralmente determina-se as respostas de uma planta para comandar entradas e entradas de perturbações. Por análise no estado estacionário determina-se a resposta depois da resposta transitória ter desaparecido.

Projetar um sistema significa achar um sistema que realize uma dada tarefa. Se as características da resposta dinâmica e/ou as características no estado estacionário não forem satisfatórias, deve-se adicionar um compensador ao sistema. Em geral, um projeto de um compensador adequado não é direto, mas exigirá métodos experimentais.

Nos últimos anos, os computadores digitais têm representado um papel importante na análise, no projeto e na operação de sistemas de controle. O computador pode ser usado para executar computações necessárias, para simular uma planta ou componentes de sistema, ou para controlar um sistema. O controle por computador tem se tornado cada vez mais comuns, e muitos sistemas de controle industriais, sistemas de aviação e sistemas de controle de robôs utilizam controladores digitais.

O método básico para o projeto de qualquer sistema de controle prático necessariamente envolverá procedimentos experimentais. A síntese de sistemas de controle linear é teoricamente possível, e o engenheiro de controle pode determinar sistematicamente os componentes necessários para desempenhar o objetivo dado. Na



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

prática, no entanto, o sistema pode ser submetido a muitas restrições ou pode ser não-linear, e em tais casos nenhum dos métodos de síntese está disponível atualmente. Além disso, as características dos componentes podem não ser precisamente conhecidas. Assim, procedimentos experimentais são sempre necessários.

O engenheiro de controle deve satisfazer as especificações dadas na realização de uma tarefa. Estas especificações podem incluir fatores tais como a velocidade de resposta, amortecimento razoável, precisão do estado estacionário, confiabilidade e custos. Todos os requisitos devem ser interpretados em termos matemáticos, não se esquecendo de certificar de que o sistema de malha fechada é estável e tem características aceitáveis na resposta transitória (velocidade e amortecimento razoável) e precisão aceitável no estado estacionário.

A especificação do sinal de controle sobre o intervalo de tempo de operação é chamado lei de controle. Matematicamente, o problema básico de controle é determinar a lei do controle ótimo, sujeita a várias restrições de engenharia e de economia, o que minimiza (ou maximiza, conforme possa ser o caso) um dado índice de desempenho. Este índice de desempenho pode ser uma integral de uma função variável de erro que deve ser minimizada.

ETAPAS DO PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE

Dada uma planta, deve-se primeiro escolher sensores e atuadores apropriados. Devem-se obter modelos matemáticos da planta, dos atuadores e dos sensores. Então, usando o modelo matemático obtido, projeta-se um controlador tal que o sistema em malha fechada satisfaça as especificações dadas. O controlador projetado é a solução para a versão matemática do problema de projeto. Neste estágio, a teoria de controle ótimo é muito útil porque fornece o limite superior de desempenho do sistema para um dado índice de desempenho.



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE PERNAMBUCO – CAMPUS RECIFE**

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROELETRÔNICA E SISTEMA DA INFORMAÇÃO

Depois do “projeto matemático” ter sido concluído, o engenheiro de controle simula o modelo em um computador para testar o comportamento do sistema resultante em resposta a vários sinais e perturbações. Usualmente, a configuração inicial do sistema não é satisfatória. Então o sistema deve ser re-projetado e a análise correspondente concluída. Este processo de projeto e análise é repetido até que um sistema satisfatório seja obtido. Então, pode-se concluir o sistema físico do protótipo.

Este processo de construção de um protótipo é o inverso daquele de modelamento. O protótipo é um sistema físico que representa o modelo matemático com razoável precisão. Uma vez que o protótipo tenha sido construído, o engenheiro o testa para ver se ele é ou não satisfatório. Se for, o projeto está concluído. Se não, o protótipo deve ser modificado e testado novamente. Este processo continua até que o protótipo seja completamente satisfatório.

No caso de alguns sistemas de controle de processo, formas padronizadas de controladores, tais como controladores PD (proporcional-mais-derivativo), PI (proporcional-mais-integral) e PID (proporcional-mais-integral-mais-derivativo) podem ser usados. Os parâmetros do controlador podem ser determinados experimentalmente seguindo-se um procedimento padrão estabelecido, e neste caso, não são necessários modelos matemáticos. No entanto, este é um procedimento que se deve ser adotado com cautela.