

Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas
Dinâmicos e Energéticos

Tema da Aula:

Introdução às Estratégias de Controle

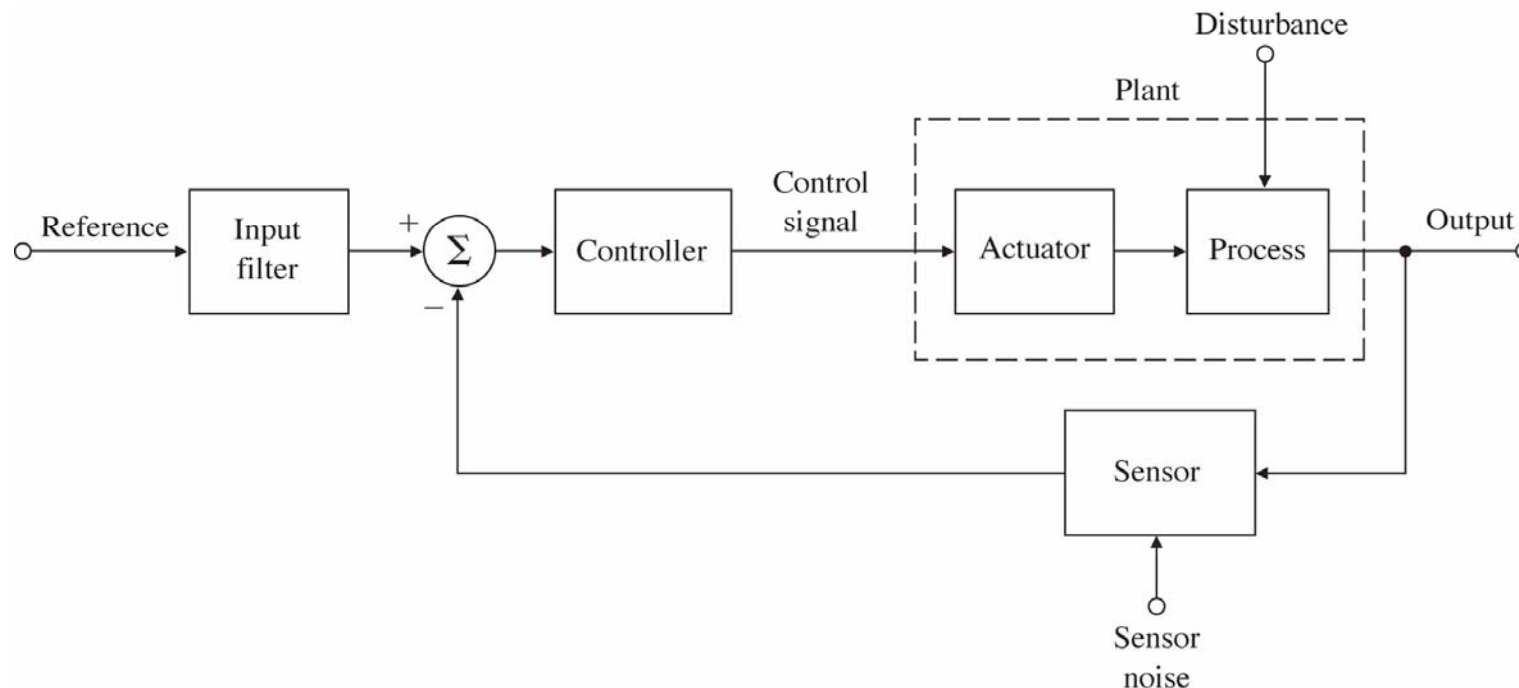
Prof. Dr. Carlos Henrique Farias dos Santos

Estrutura da aula

- 1 Análise do Controle Realimentado (*Feedback*)
- 2 Controle por Alimentação Direta (*Feedforward*);
- 3 Controle por Razão;
- 4 Controle em Cascata;
- 5 Controle Seletivo e Override;
- 6 Controle por Faixa Dividida (*Split Range*);
- 7 Controle Adaptativo;
- 8 Controle Neural;
- 9 Controle Nebuloso (*Fuzzy*).

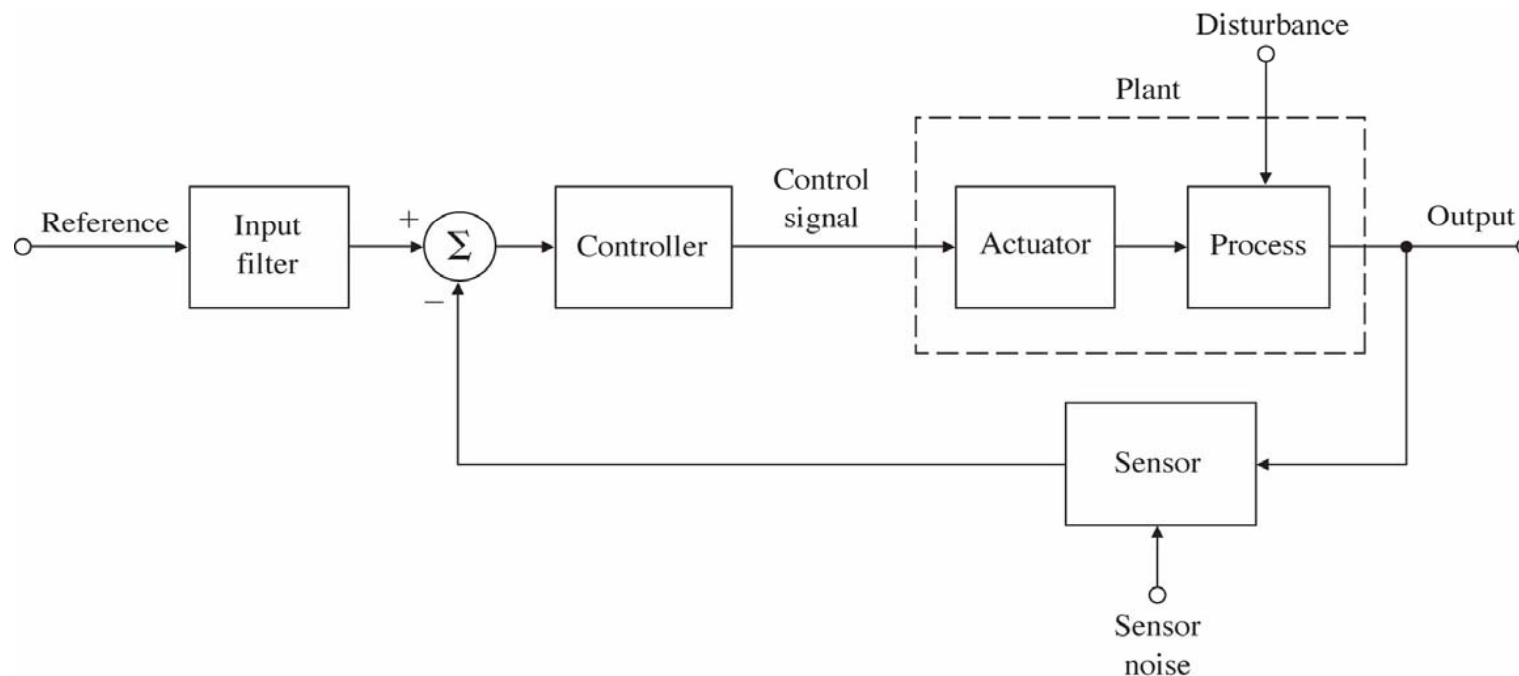
1 Análise do Controle Realimentado

Um diagrama de blocos de um sistema realimentado é exposto abaixo. O sistema possui dois componentes principais, a planta e o controlador, representados por blocos com setas que denotam a relação causal entre as entradas e saídas. A planta tem uma entrada, a *variável manipulada*, também chamada de variável de controle ou sinal de controle. A saída da planta é denominada de *variável controlada*. O valor desejado da variável controlada é denominada de setpoint ou valor de *referência*. O *erro de controle* é a diferença entre o setpoint e a variável controlada.



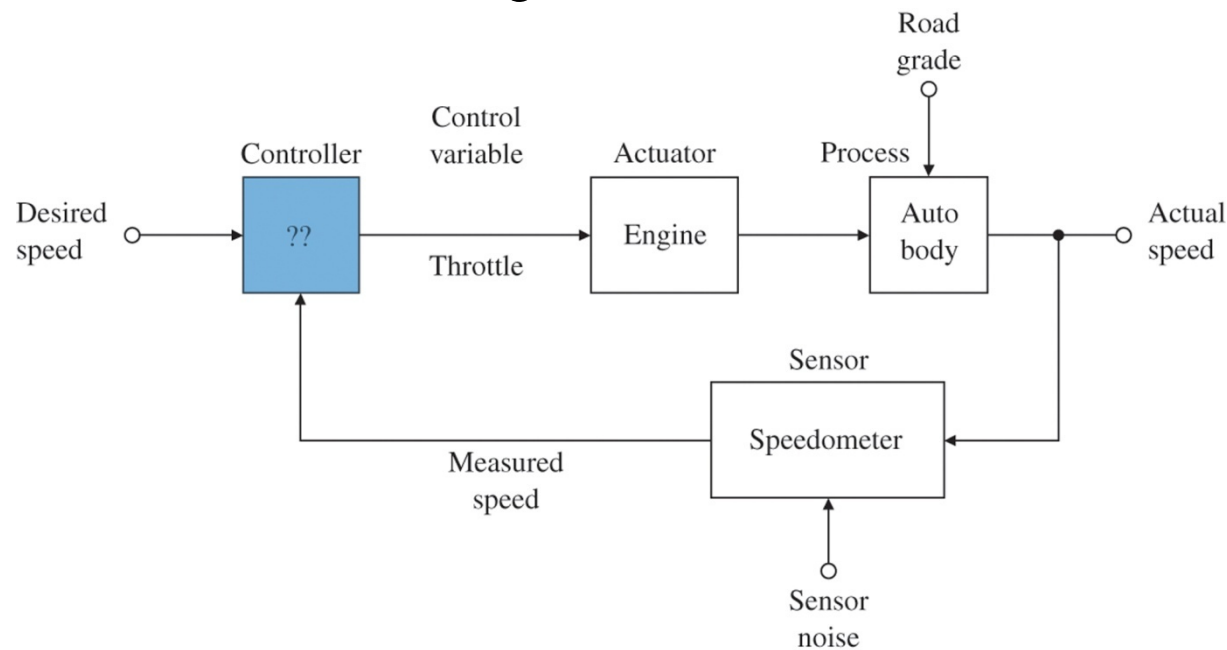
1 Análise do Controle Realimentado

O propósito deste sistema é manter a variável controlada próxima do valor desejado a despeito dos distúrbios. Isto é garantido pelo laço de realimentação. Para tanto, assuma que o sistema esteja em equilíbrio e que ocorra um distúrbio de forma que a variável controlada torne-se maior que o valor de referência. O erro é então negativo e a saída do controlador é reduzida, o que causa o decaimento da saída da planta. Este tipo de realimentação é denominada negativa, porque a variável manipulada (saída do controlador) reage em oposição a variável controlada (saída da planta).



1 Análise do Controle Realimentado

O valor da realimentação pode ser demonstrado através de uma análise quantitativa de um modelo simplificado de um sistema de controle de trajetória de um automóvel, de acordo com a figura abaixo.

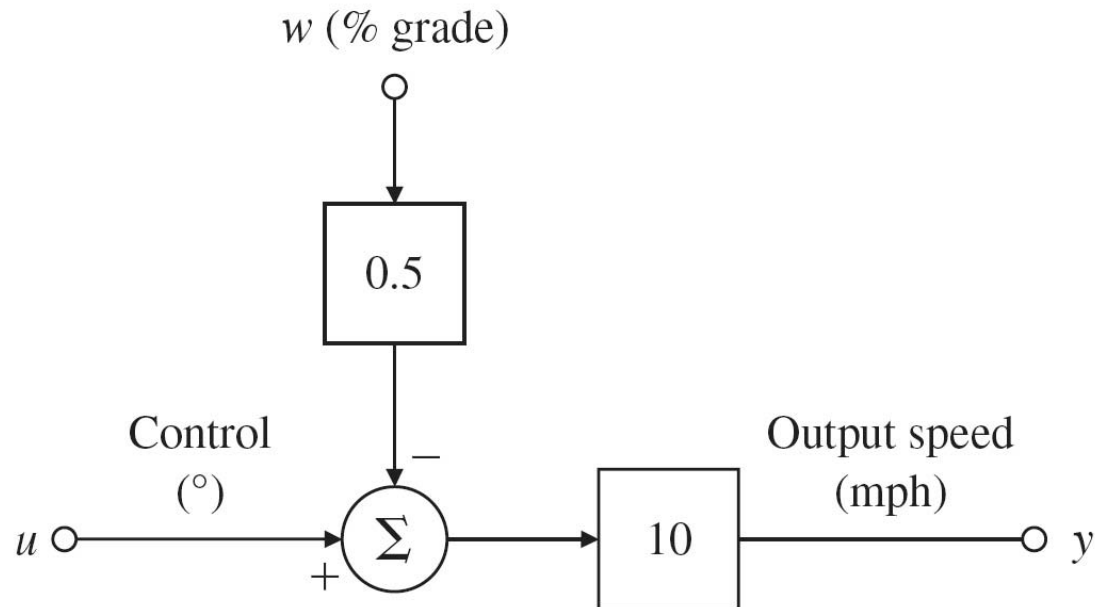


Para este exemplo, ignoramos a resposta dinâmica do carro e consideramos apenas o comportamento em regime permanente. Além disso, assumimos que o intervalo de velocidades considerado pode ser aproximado por relações lineares.

1 Análise do Controle Realimentado

Admita que após medirmos uma velocidade de 65 mph (milhas por hora), observamos que uma mudança de 1° no ângulo do acelerador causa uma mudança de 10 mph na velocidade.

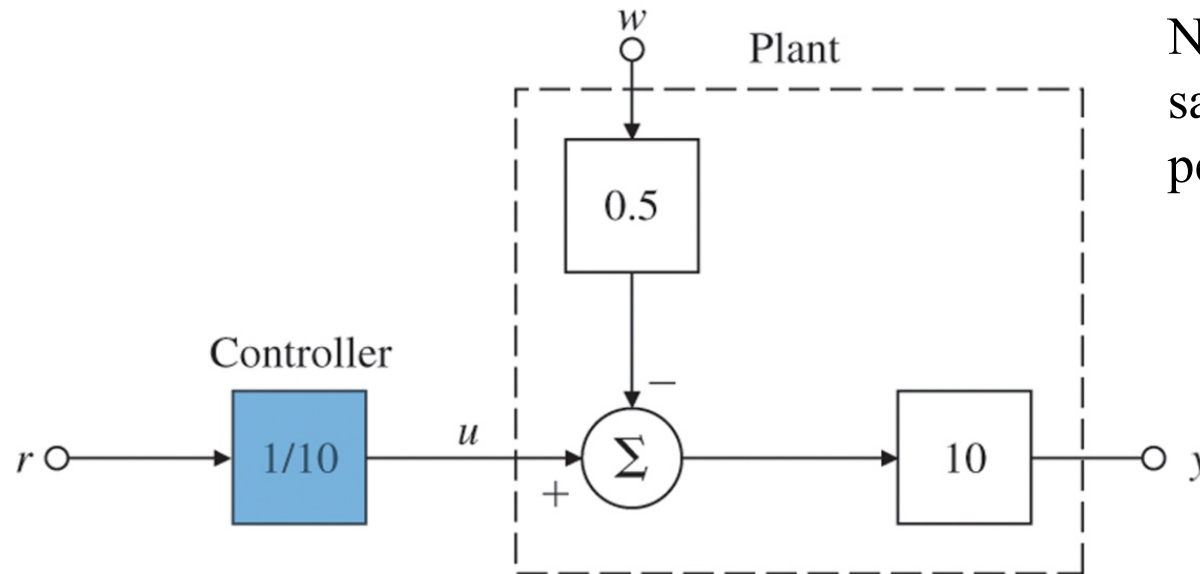
A partir de observações durante a condução para cima e para baixo em aclives e declives na estrada, verifica-se mudanças de grau de 1%, causando uma mudança de velocidade de 5 mph. O velocímetro utilizado é para ser exato a uma fração de 1 mph. Com estas relações, podemos desenhar o diagrama de blocos abaixo.



1 Análise do Controle Realimentado

Para esta análise, desejamos comparar os efeitos de 1% no grau sobre a velocidade da saída quando a velocidade de referência for ajustada para 65 mph em malha aberta e em malha fechada.

No primeiro caso, o controlador não utiliza a leitura do velocímetro, mas ajusta $u = r/10$. Este é um exemplo de sistema de controle em malha aberta.



Neste exemplo, a velocidade de saída da malha aberta, y_{ol} , é dada pela equação,

$$y_{ol} = 10(u - 0.5w)$$

$$= 10\left(\frac{r}{10} - 0.5w\right)$$

$$= r - 5w$$

O erro na velocidade de saída é dado por,

$$e_{ol} = r - y_{ol} \\ = 5w$$

e o erro percentual é dado por,

$$\%e = 500 \frac{w}{r}$$

1 Análise do Controle Realimentado

Se $r = 65$ e o automóvel estiver num trecho plano da estrada, então $w = 0$ e a velocidade será de 65 mph sem erro. Entretanto, se $w = 1$ correspondendo a 1% no grau então a velocidade será de 60 mph e temos um erro de 5 mph, o qual representa um erro percentual de 7.69% na velocidade. Para uma grau de 2%, o erro de velocidade será de 10 mph, o que implica num erro de 15.38%, e assim por diante.

O exemplo mostra que não existe erro quando $w = 0$, mas isto depende que o ganho de controlador seja exatamente o inverso do ganho da planta de 10.

Na prática, o ganho da planta está sujeito a mudanças, e se não mudar, erros são introduzidos do mesmo modo.

1 Análise do Controle Realimentado

O diagrama de blocos de um sistema realimentado é exposto abaixo, onde o ganho do controlador foi ajustado para 10. Neste caso, as equações são,

$$y_{cl} = 10u - 5w$$

$$u = 10(r - y_{cl})$$

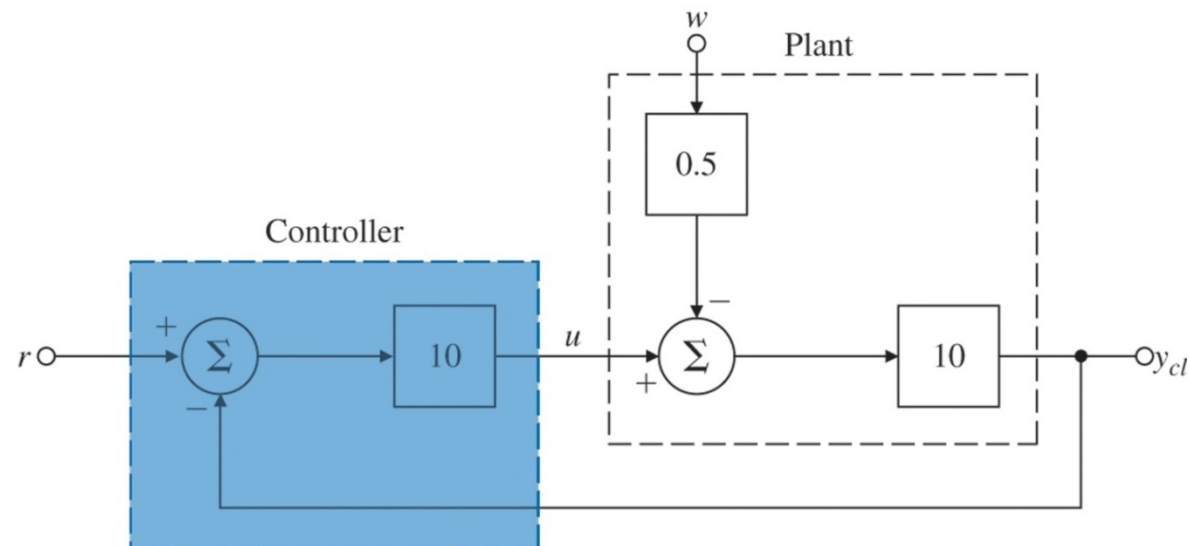
Combinando as mesmas,

$$y_{cl} = 100r - 100y_{cl} - 5w$$

$$101y_{cl} = 100r - 5w$$

$$y_{cl} = \frac{100}{101}r - \frac{5}{101}w$$

$$e_{cl} = \frac{r}{101} + \frac{5w}{101}$$



1 Análise do Controle Realimentado

Assim, a realimentação reduziu a sensibilidade do erro de velocidade ao grau por um fator de 101, quando comparado com o sistema em malha aberta. Todavia, existe agora um pequeno erro de velocidade ao nível do solo, pois quando $w = 0$,

$$y_{cl} = \frac{100}{101}r = 0.99r \text{ mph}$$

Este erro vai sendo reduzido a medida que o ganho da malha for ampliado.

Se considerarmos novamente uma velocidade de referência de 65 mph e compararmos as velocidades com um 1% do grau, o erro percentual na velocidade de saída é dado por,

$$\begin{aligned} \% \text{ erro} &= 100 \frac{\frac{65 \times 100}{101} - \left(\frac{65 \times 100}{101} - \frac{5}{101} \right)}{\frac{65 \times 100}{101}} \\ &= 100 \frac{5 \times 101}{101 \times 65 \times 100} \\ &= 0.0769\% \end{aligned}$$

1 Análise do Controle Realimentado

A redução da sensibilidade da velocidade aos distúrbios do grau e o ganho da planta neste exemplo é devido ao ganho de laço de valor 100, no sistema realimentado. Infelizmente existem limites ao valor deste ganho, quando a dinâmica é introduzida, pois a realimentação pode deteriorar a resposta ou ainda tornar o sistema instável.

Em todo caso, o controle realimentado é uma importante técnica amplamente difundida nos processos industriais. Entre suas vantagens, podem-se destacar:

- A ação corretiva ocorre tão logo que a variável controlada desvia-se do ponto de ajuste, independente da fonte ou tipo de distúrbio;
- O controlador PID é versátil e robusto. Se as condições mudam, uma nova sintonia do controlador usualmente produz um desempenho satisfatório.

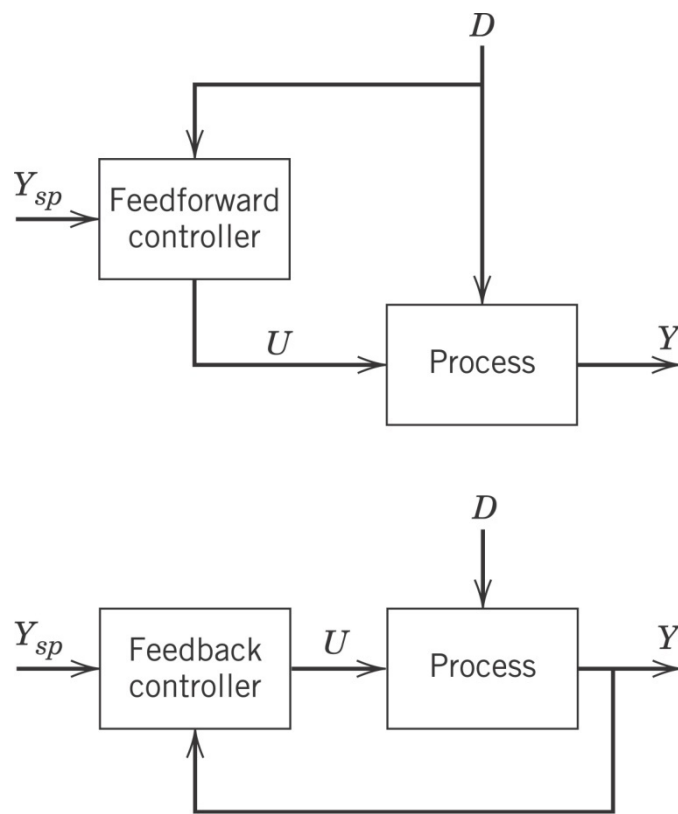
1 Análise do Controle Realimentado

Entretanto, o controle realimentado também apresenta certas desvantagens inerentes:

- Nenhuma ação corretiva é tomada até que ocorra o desvio na variável controlada;
- Ele não oferece ação de controle preditiva para compensar os efeitos de distúrbios conhecidos ou mensuráveis;
- Em alguns casos, a variável controlada não pode ser mensurada *on-line* e conseqüentemente este controle não é realizável.

2 Controle *Feedforward*

Em contraste com o controle realimentado, o controle por alimentação direta (*Feedforward*) mede as variáveis de perturbação e toma ações corretivas antes que as mesmas afetem o processo.



Diagramas de blocos simplificados dos controles feedforward e realimentado são mostrados ao lado. No controle feedforward, qualquer distúrbio é corrigido imediatamente, antes de afetar a variável controlada. Além disso, o controle feedforward não utiliza a variável controlada, pois de outra forma constituiria um controle realimentado. Este ponto é importante, porque mostra como é possível controlar uma variável sem a necessidade de uma medição da mesma.

2 Controle *Feedforward*

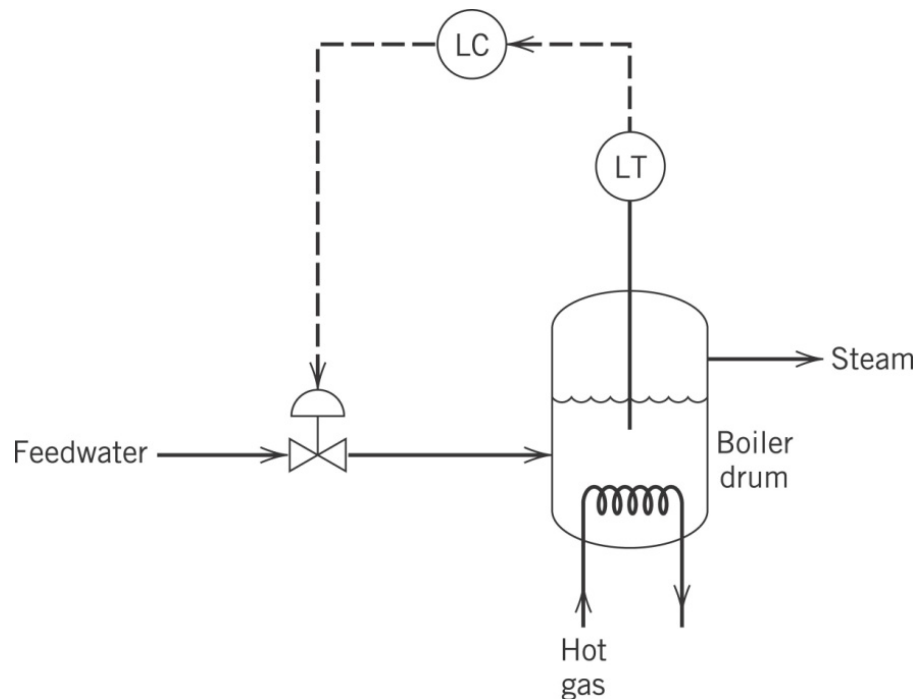
Apesar das melhorias apresentadas pelo controle feedforward, o mesmo possui algumas desvantagens:

As variáveis de distúrbio precisam ser medidas on-line. O que é impraticável em várias aplicações.

A qualidade do controle depende da precisão no modelo do processo. Em particular, precisamos saber como a variável controlada responde a mudanças nos distúrbios e na variável manipulada.

A seguir, ilustramos uma aplicação do controle feedforward num processo industrial.

2 Controle *Feedforward*



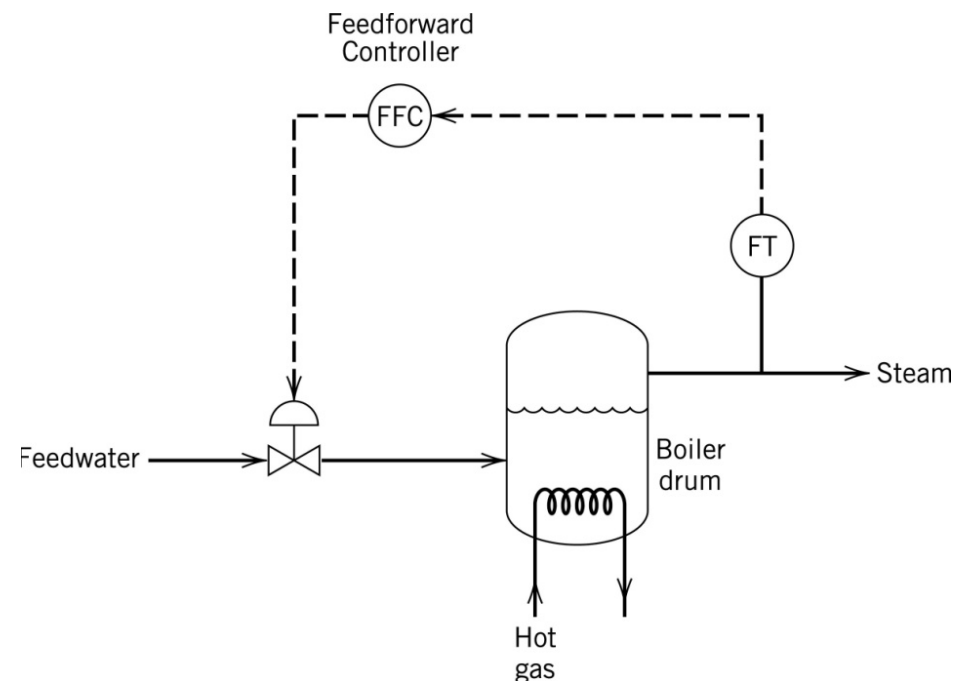
O diagrama instrumental ao lado exibe a aplicação da técnica *feedback* ao controle de nível do líquido de uma caldeira. Este sistema de controle mede o nível do líquido em ebulição e usa o mesmo para ajustar a taxa de alimentação de água.

Como resultado da pequena capacidade líquida do cilindro da caldeira, este controle é bastante sensível a variações bruscas na variável de perturbação, a taxa de fluxo de vapor. Outra dificuldade é que grandes valores de ganhos de controle não podem ser usados porque a medição do nível exibe flutuações para líquido em ebulição.

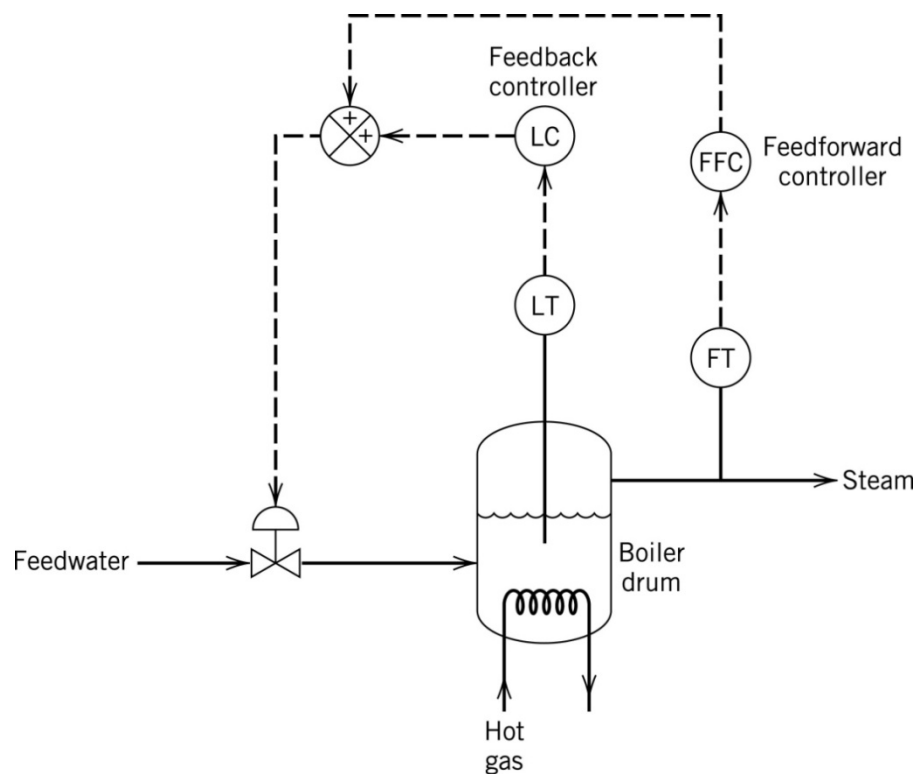
Portanto, grandes ganhos de controle tendem a amplificar o ruído e produzir variações indesejáveis na taxa de alimentação de água.

2 Controle *Feedforward*

O diagrama instrumental abaixo exhibe a aplicação da técnica *feedforward* ao controle de nível do líquido de uma caldeira. Neste sistema, a taxa de fluxo de vapor é medida e o controlador ajusta a taxa de fluxo de água de forma a equilibrar a demanda de vapor. Observa-se que a variável controlada, o nível de líquido, não é medida. Uma outra alternativa seria a medição da pressão de vapor no lugar do fluxo do mesmo.



2 Controle *Feedforward*



Na prática, o controle feedforward é frequentemente usado em combinação com o controle feedback. Neste caso, o controle feedforward é usado para reduzir os efeitos dos distúrbios medidos, enquanto o controle feedback compensa as imprecisões no modelo do processo, erros de medição e distúrbios não mensurados. Uma configuração típica é ilustrada no diagrama instrumental ao lado, onde as saídas dos controladores são adicionadas e esta combinação é aplicada à válvula de controle.

3 Controle por Razão;

O controle por razão é um tipo especial de controle feedforward, onde uma variável é manipulada em relação a outra para satisfazer um objetivo. Este objetivo é manter a razão das duas variáveis do processo a um valor específico. Assim, a razão,

$$K = \frac{x}{y}$$

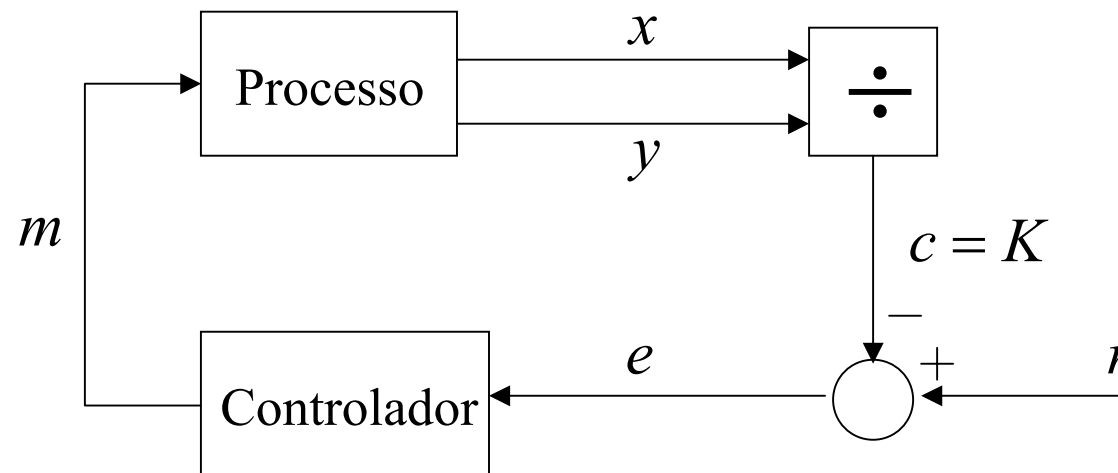
é a *variável controlada* no lugar de variáveis individuais. As variáveis x e y são variáveis físicas.

Neste sentido, o controle por razão pode ser implementado através das duas formas seguintes.

3 Controle por Razão;

Método I:

Uma das formas de implementar a função de controle por razão é através do cálculo direto de x / y .



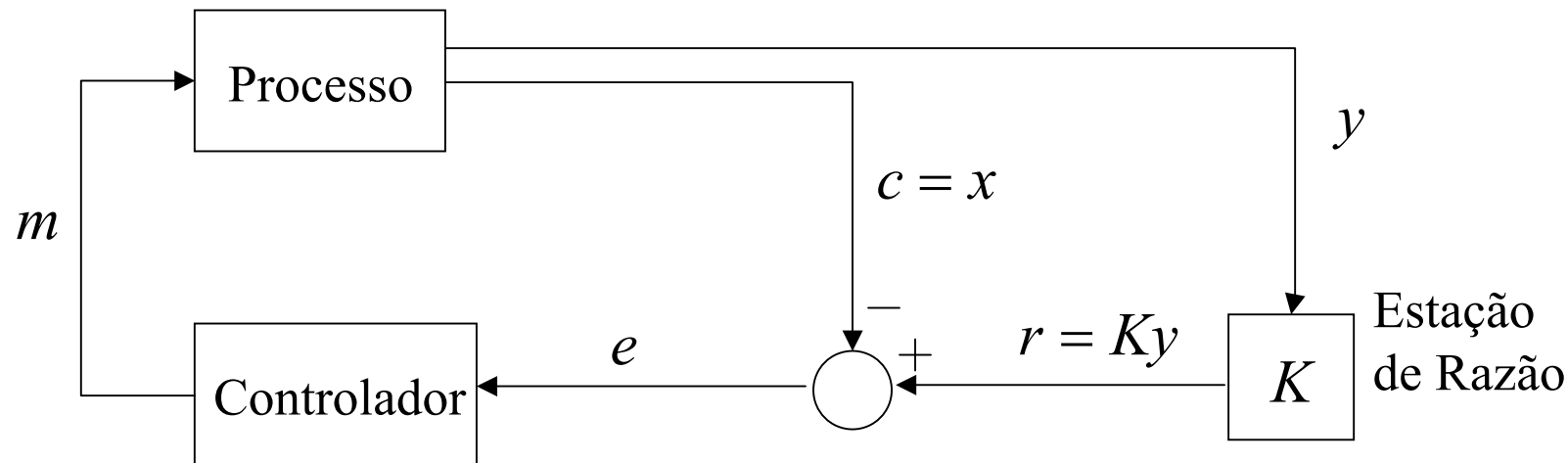
Se x é a *variável manipulada*, o ganho varia com a variável y . Assim, o elemento divisor incluído na malha fechada faz o processo variar de forma não-linear.

$$\frac{dK}{dx} = \frac{1}{y}$$

3 Controle por Razão;

Método II:

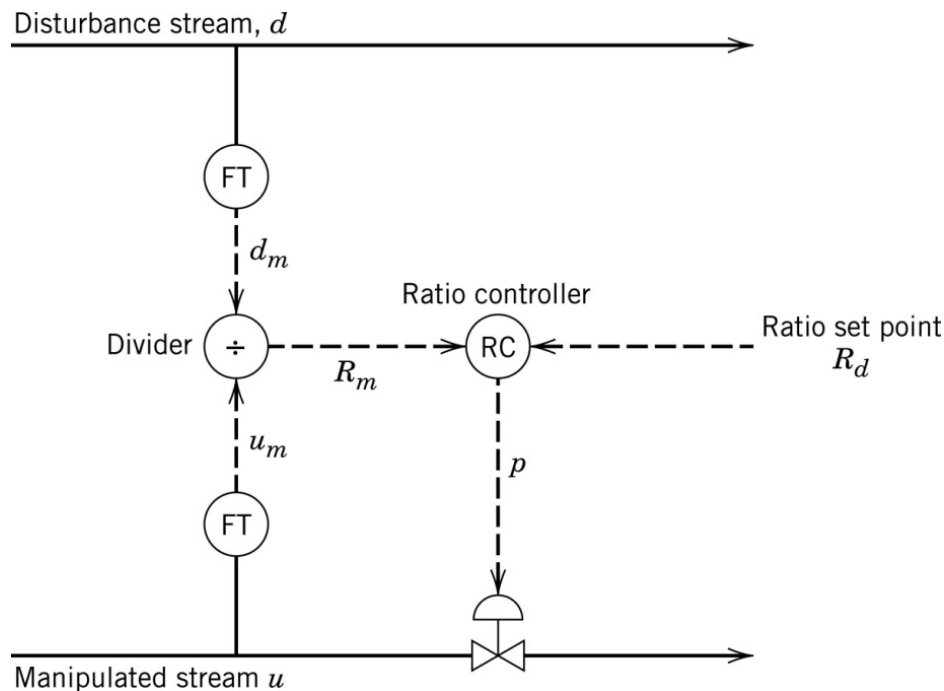
Para contornar os problemas da não-linearidade, o divisor é retirado. Desta forma, o controle por razão é realizado num circuito de set-point, fazendo $r = x/K$, se y for a *variável manipulada*, ou $r = Ky$, se x é a *variável manipulada*. A figura abaixo ilustra esta última situação. Neste caso, a razão das duas variáveis é mantida pelo ajuste do set-point do controlador usando um ganho ajustável conhecido como *estação de razão*. A entrada para este dispositivo é a *variável de distúrbio*, a qual é multiplicada por uma constante. A saída desta estação é o set-point que mantém a razão das variáveis.



3 Controle por Razão;

Para efeito didático, vamos expor um exemplo prático desta técnica. Considere o diagrama instrumental abaixo para o Método I. Admita que as taxas dos elementos na tubulação de distúrbio e na tubulação manipulada sejam medidas, e a taxa medida seja calculada,

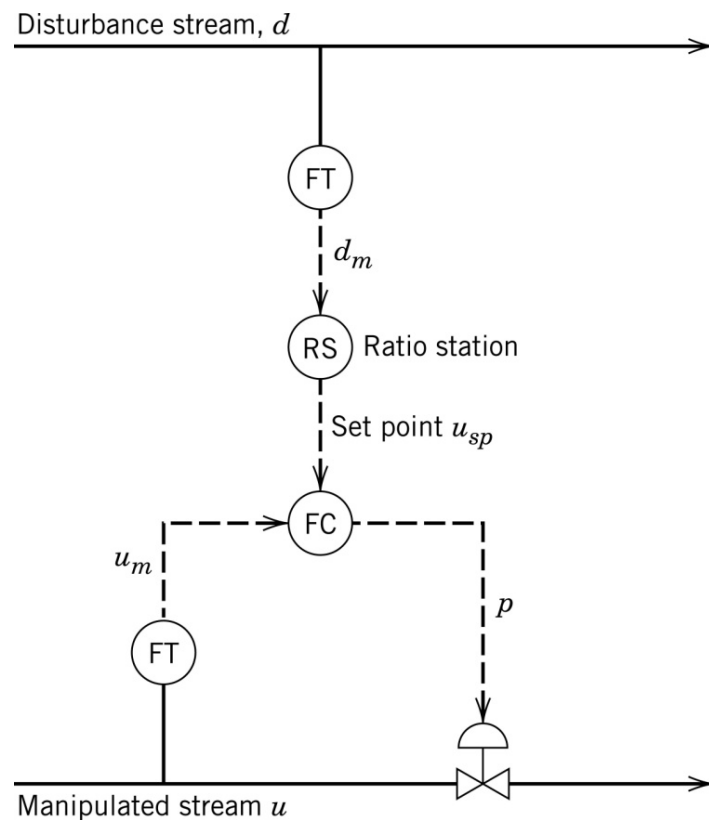
$$R_m = \frac{u_m}{d_m}$$



A saída do elemento divisor é enviada ao controlador de razão (RC), o qual compara a razão calculada R_m com a razão desejada R_d e portanto, ajusta a taxa de fluxo manipulada u .

3 Controle por Razão;

No Método II, a taxa de fluxo da tubulação de distúrbio é medida e transmitida para a estação de razão (RS), a qual multiplica este sinal por um ganho ajustável K_R , cujo valor é a razão desejada. O sinal de saída desta estação é então usado como set-point u_{sp} para o controlador de fluxo, o qual ajusta a taxa de fluxo da tubulação manipulada, u .



Observa-se em ambos os Métodos I e II, que a variável de distúrbio d é medida. Logo, o controle por razão é, em essência, um tipo de controle feedforward.

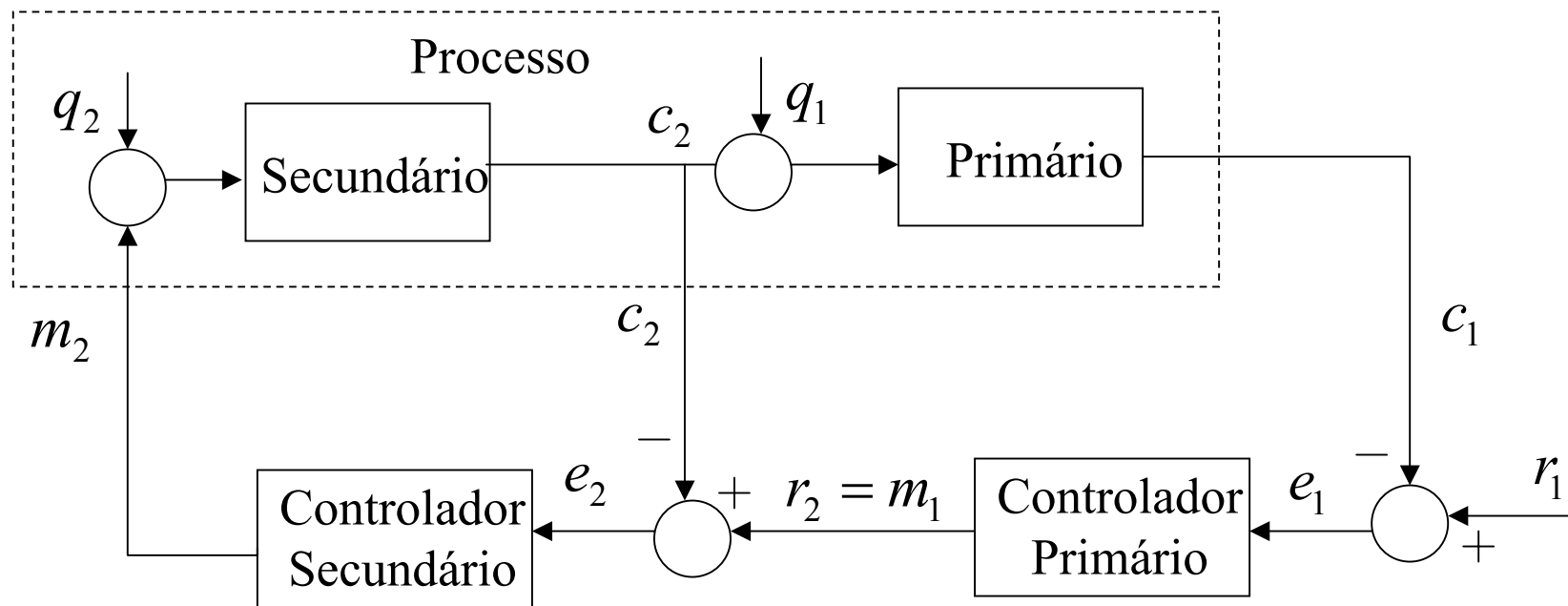
4 Controle em Cascata;

De acordo com as conclusões obtidas até agora, o controle feedback não toma ações corretivas enquanto a variável controlada não sofrer os efeitos dos distúrbios. Por outro lado, o controle feedforward oferece melhorias quando comparado com o feedback. Entretanto, o controle feedforward requer que os distúrbios sejam medidos explicitamente e que o modelo da planta esteja disponível para efetuar o cálculo da saída do controlador.

Uma abordagem alternativa, que pode melhorar significativamente a resposta dinâmica aos distúrbios, emprega um ponto de medição secundária e uma realimentação secundária. O ponto de medição secundária está localizado de modo que reconhece a condição de distúrbio mais cedo do que a variável controlada, embora não seja necessário medir a perturbação. Esta abordagem denomina-se controle em cascata. Este tipo de controle é particularmente útil quando distúrbios são associados a variável manipulada ou quando o elemento de controle final exhibe comportamento não-linear.

4 Controle em Cascata;

Um esquema de controle é denominado cascata quando a saída de um controlador pode ser usada para manipular a referência de outro controlador. Cada controlador tem sua própria entrada, mas apenas o controlador primário (mestre) tem uma referência independente e apenas o controlador secundário (escravo) tem a saída do processo. A variável manipulada, o controle secundário, e sua medição constitui uma malha fechada no interior de uma malha primária (veja figura abaixo).



4 Controle em Cascata;

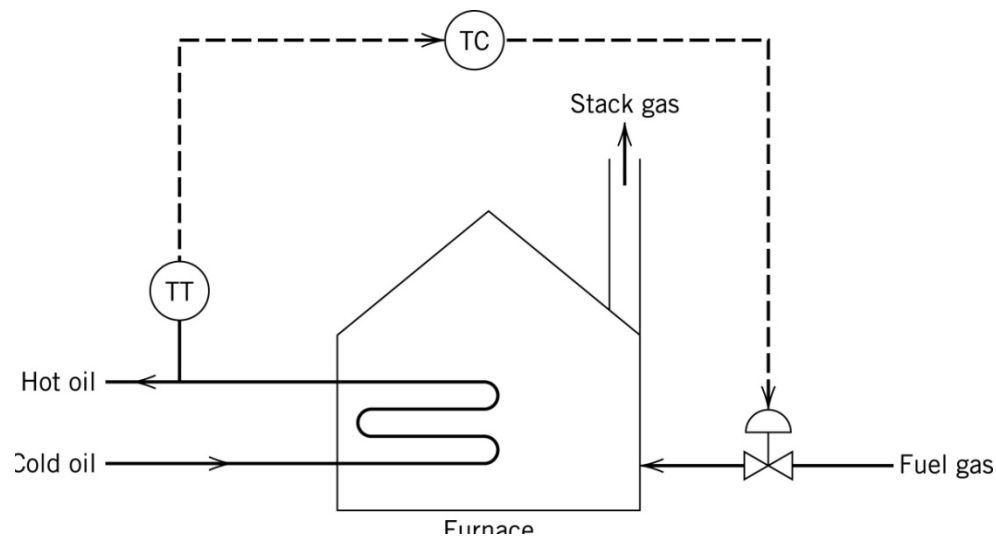
As principais vantagens do controle em cascata são:

- Os distúrbios q_2 são corrigidos pelo controlador secundário antes de possam influenciar a variável primária.
- Variações de ganho na parte secundária do processo são superadas dentro de sua própria malha.
- O atraso de fase na parte secundária do processo é reduzida de forma mensurável pela malha secundária. Isto melhora a velocidade de resposta da malha primária.
- A malha secundária permite uma exata manipulação do fluxo de massa ou energia pelo controlador primário.

Todavia, é preciso reconhecer que o controle em cascata não pode ser implementado a menos que uma variável intermediária adequada possa ser medida. Muitos processos não podem ser facilmente quebrados dessa forma.

4 Controle em Cascata;

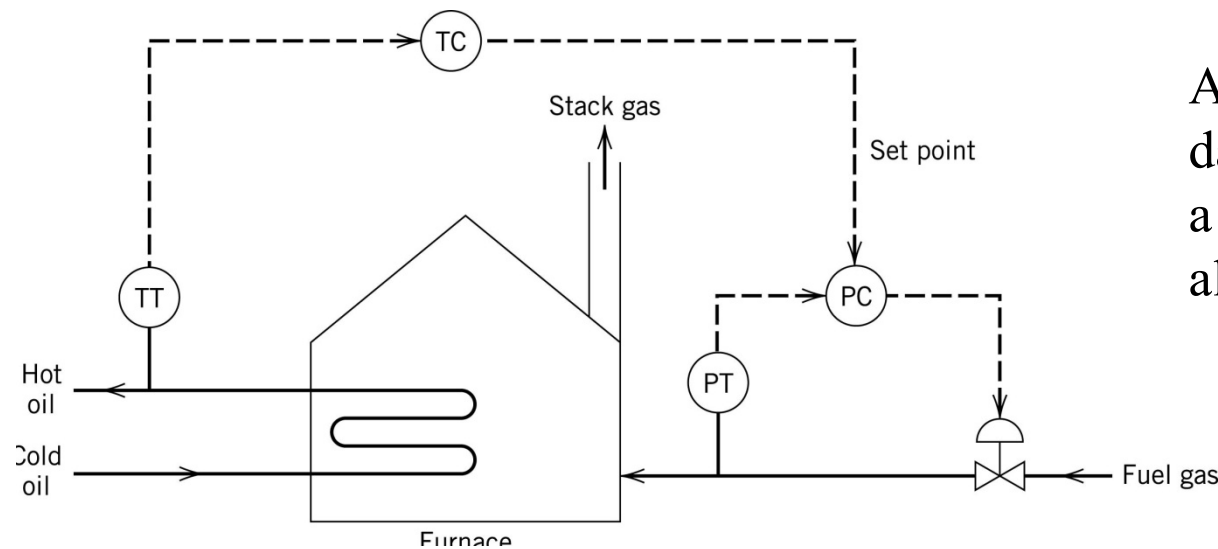
A seguir, apresenta-se um exemplo onde o controle em cascata pode ser vantajoso. Um sistema de controle *feedback convencional* é apresentado abaixo, onde o mesmo é aplicado ao problema de controle da temperatura de um forno. Admita que o controle realize um trabalho satisfatório de regulação da temperatura do óleo quente a despeito dos distúrbios na taxa de fluxo de óleo ou na temperatura do óleo frio. Entretanto, se ocorrer um distúrbio na pressão de combustível de abastecimento de gás, o fluxo de gás vai mudar, o que perturba a operação do forno e altera temperatura do óleo quente.



Só então o controlador de temperatura (TC) começa a tomar medidas corretivas ajustando o fluxo de gás combustível. Desta forma, o controle feedback pode resultar em respostas muito lentas a mudanças na pressão de combustível de abastecimento de gás. Este distúrbio está claramente associado a variável manipulada.

4 Controle em Cascata;

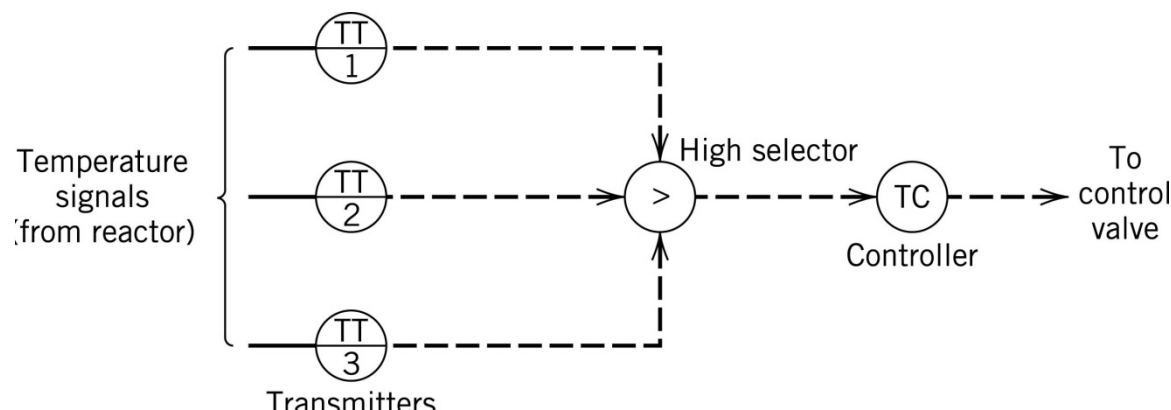
A figura abaixo mostra uma configuração de *controle em cascata* para o forno, o qual consiste de uma malha de controle primário (utilizando TT e TC) e uma malha de controle secundário que controla a pressão por PT e PC. A medição primária é da temperatura do óleo quente, a qual é utilizada pelo controlador primário TC para estabelecer o set-point do controlador secundário. A medição secundária é a pressão de gás combustível, a qual é transmitida para controlador escravo PC. Se um distúrbio ocorrer na pressão de alimentação, o controlador de pressão vai reagir rapidamente para assegurar a pressão de gás combustível em seu set-point.



A melhoria consiste no controle da válvula ser ajustado tão logo a mudança na pressão de alimentação seja detectada.

5 Controle Seletivo e *Override*

Para problemas de controle onde o número de variáveis manipuladas é superior ao de variáveis controladas, *seletores* são utilizados para o compartilhamento das variáveis manipuladas entre as variáveis controladas. Este tipo de controle é usado para melhorar o desempenho de sistemas de controle assim como para proteger os equipamentos de condições operacionais perigosas. Em diagramas de instrumentação, o símbolo ($>$) denota um seletor de alta e ($<$) denota um seletor de baixa.



Como exemplo, um seletor de alta pode ser usado para determinar o ponto quente da temperatura em um reator químico, de acordo com a figura ao lado. Neste reator, a saída do seletor de alta é a entrada para o controlador de temperatura (TC).

5 Controle Seletivo e *Override*

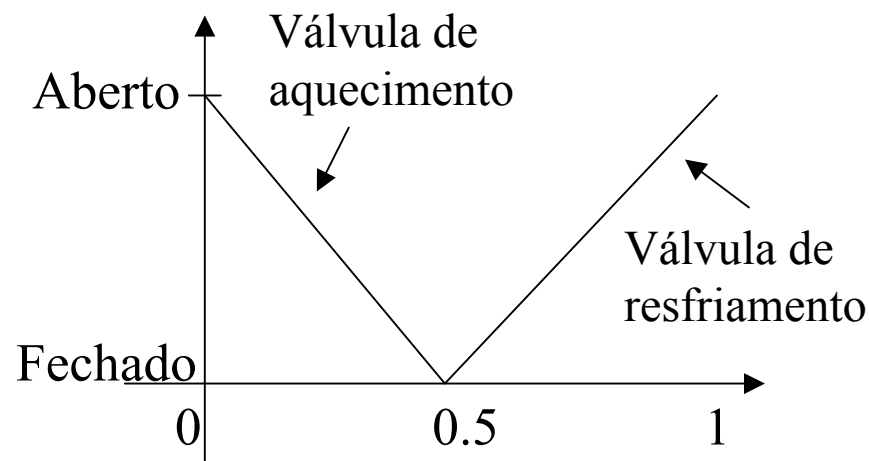
O uso de limites altos e baixos para variáveis de processo representa outro tipo de controle seletivo denominado *override*, onde um segundo controlador pode substituir (*override*), ou assumir a partir do primeiro controlador. Esta é uma ação menos radical do que um bloqueio, o qual é utilizado para o desligamento de emergência do processo.

Um exemplo deste tipo de controle é uma coluna de destilação, a qual tem limites inferiores e superiores na entrada de calor para o refeedor da coluna. O nível mínimo assegura estoque líquido nas bandejas, enquanto o limite máximo existe para impedir o início de inundações.

Outro exemplo de aplicação do controle *override* é em sistemas de controle de tiragem forçada de combustão para evitar um desequilíbrio entre o fluxo de ar e fluxo de combustível, o qual poderia resultar em condições operacionais perigosas.

6 Controle *Split Range*

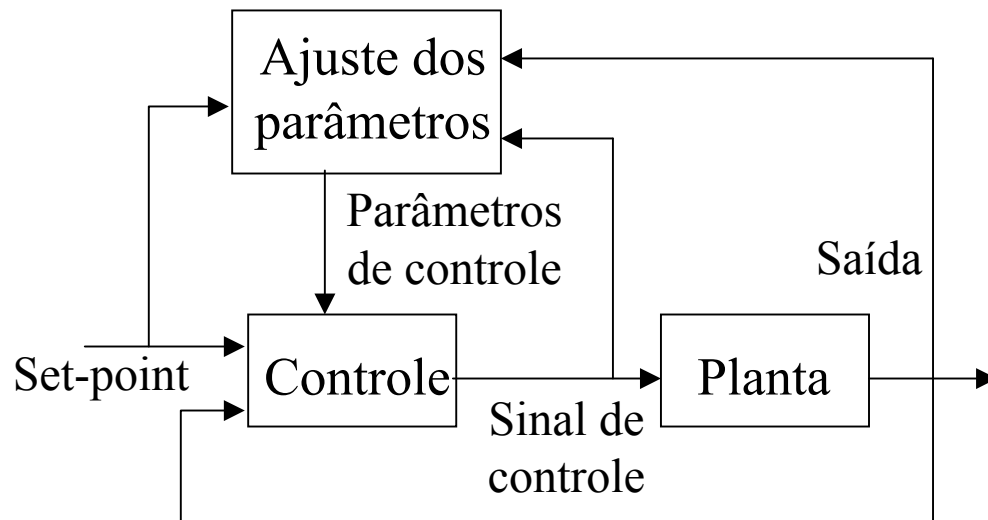
Como vimos no controle em cascata, existe uma única variável de controle e diversos sinais medidos. A situação dual é usada quando existe apenas uma variável medida e diversas variáveis controladas. Sistemas deste tipo são comuns, i.e., em conexão com aquecimento e resfriamento. Um dispositivo é usado para aquecer e outro para resfriar. Em outras palavras, o *split range* consiste num sinal medido e em diversos atuadores. O princípio do controle *split range* é ilustrado na figura abaixo, a qual mostra a relação estática entre as variáveis medidas e as variáveis controladas.



Quando a temperatura é muito baixa, é necessário suprir com calor. O aquecedor, portanto, tem seu valor máximo quando a variável medida é zero. Este por sua vez decai linearmente até a metade do intervalo, onde nenhum aquecimento é oferecido. Por outro lado, o resfriamento é aplicado quando a variável do processo está acima do valor médio, o qual é amplificado.

7 Controle Adaptativo

Um problema de controle de processos requer inevitavelmente uma sintonia *on-line* do controlador para garantir um grau de controle satisfatório. Se as condições operacionais do processo ou do ambiente mudarem significativamente, o controlador deve ser reajustado. Se estas mudanças ocorrem freqüentemente, então o controle adaptativo deve ser considerado.



Por definição, um controlador adaptativo é um controlador com parâmetros ajustáveis e um mecanismo para ajustar estes parâmetros. Um controlador adaptativo pode ser interpretado como um sistema que possui duas malhas. Uma delas é um feedback convencional, com o processo e o controlador. A outra malha é de ajuste dos parâmetros (figura ao lado).

7 Controle Adaptativo

Auto-ajuste X Adaptação

Opiniões divergentes ocorrem quanto ao correto modo de descrever o mecanismo de ajuste automático. Esta é principalmente uma questão de nomenclatura. Por exemplo, o mecanismo de ajuste pode ser dito para oferecer uma *adaptação* ou uma sintonia automática. Desta forma, a terminologia: sistema auto-ajustável e sistema adaptativo. Em essência, ambos os termos transmitem a mesma idéia. Entretanto, por razões históricas eles podem apresentar diferentes significados.

Especificamente, a idéia de mecanismo auto-ajustável foi originalmente concebida com o significado de manipular a sintonia inicial de um controlador. Assim, após a sintonia inicial, o mecanismo de ajuste não é mais solicitado e pode ser desabilitado. Por outro lado, um mecanismo de adaptação não sofre suspensão e pode fornecer um meio de continuamente se adaptar às freqüentes mudanças.

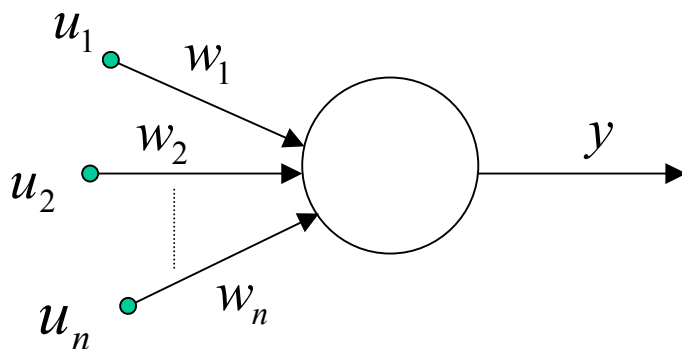
8 Controle Neural

As redes neurais artificiais originaram-se a partir de tentativas de construir modelos simples para a atividade neural no cérebro e as tentativas de conceber dispositivos que poderiam reconhecer padrões e realizar tarefas simples de aprendizagem.

Um modelo simplificado do Neurônio:

Um diagrama simplificado do neurônio é mostrado na figura abaixo. O sistema tem várias entradas e uma saída. Se a saída é y e as entradas são u_1, u_2, \dots, u_n a relação entrada-saída é descrita por

$$y = f(w_1u_1 + w_2u_2 + \dots + w_nu_n) = f\left(\sum_{k=1}^n w_k u_k\right)$$



8 Controle Neural

onde os números w_i são chamados de pesos. A função f é denominada sigmóide. Tal função pode ser representada por,

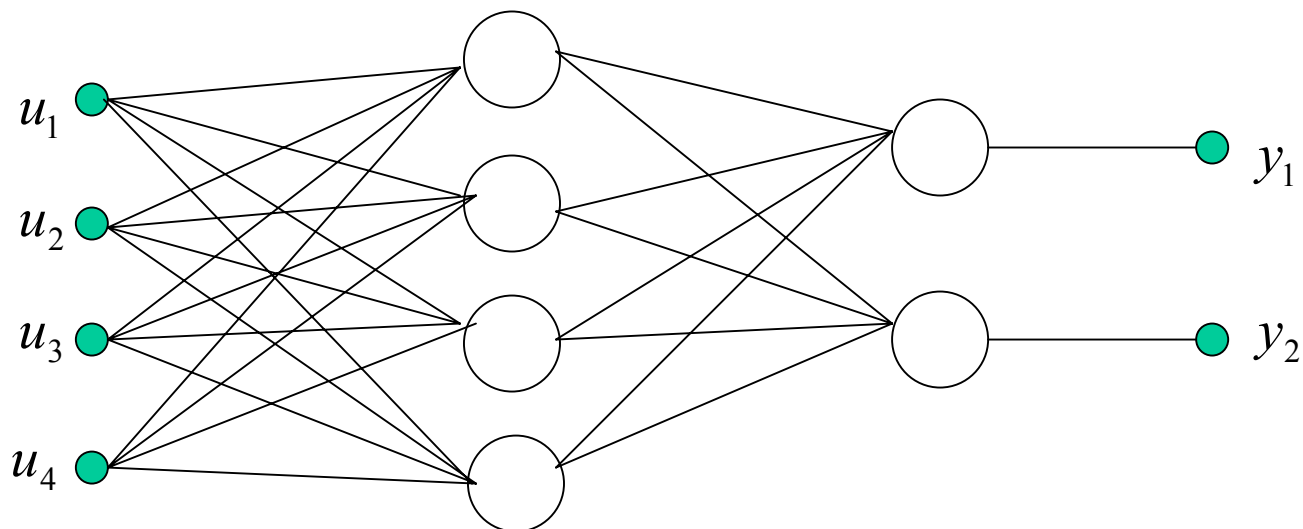
$$f(x) = \frac{e^{\alpha x} - e^{-\alpha x}}{e^{\alpha x} + e^{-\alpha x}}$$

onde α é um parâmetro. Este modelo de um neurônio consiste numa função não-linear.

8 Controle Neural

Redes Neurais Artificiais:

Modelos mais complicados podem ser obtidos através da conexão de neurônios como exposto na figura abaixo. Este sistema é chamado de rede neural. Nesta rede, os neurônios que recebem diretamente as entradas da rede constituem o que se chama de camada de entrada. Os neurônios que recebem como entradas as saídas daqueles da *camada de entrada* constituem a segunda camada e assim sucessivamente até a camada final que é a *camada de saída*. As camadas internas que não são nem de entrada e nem de saída são geralmente referidas como *camadas ocultas*.



8 Controle Neural

Aprendizagem:

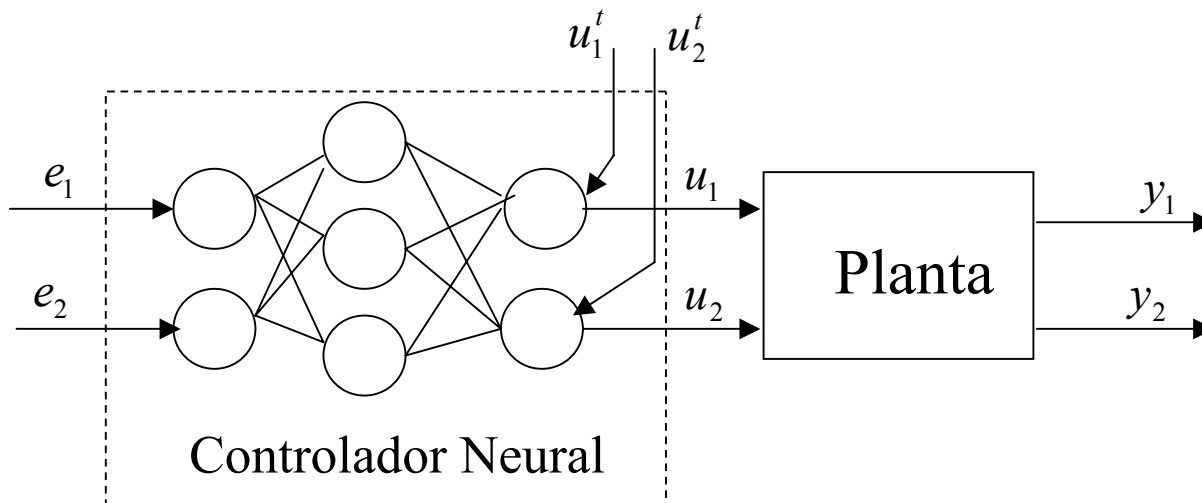
Observa-se que existem vários parâmetros (pesos) numa rede neural. Assumindo que existam n neurônios numa camada, se todos os neurônios estão conectados, n^2 parâmetros são requeridos para descrever as conexões entre duas camadas. Outra propriedade das redes neurais são seus algoritmos de *aprendizado*. Este algoritmos permitem o cálculo deste parâmetros (pesos).

Os parâmetros são tipicamente obtidos de forma recursiva através de um dado valor de entrada para a função e um valor desejado de saída. Os pesos são ajustados de modo que os dados são encontrados. Um novo par de entrada-saída é dado e os parâmetros são ajustados novamente. O procedimento é repetido até que um bom ajuste seja obtido para um conjunto razoável de dados. Este procedimento denomina-se *treinamento*. Um método bastante popular de treinamento de redes neurais é o *Back-Propagation*.

8 Controle Neural

Aplicação em Sistemas de Controle:

Um dos problemas encontrados na utilização de redes neurais artificiais no controle de sistemas dinâmicos é a seleção das informações necessárias para o treinamento. A figura abaixo mostra que inicialmente, os sinais $u(\cdot)$ que originam a resposta $y(\cdot)$ adequada podem não ser conhecidos. Nesse caso, utilizando-se, por exemplo, o algoritmo Back-Propagation juntamente com uma rede multi-camadas, necessita-se de um mecanismo para gerar $u^t(\cdot)$ que poderia, então, compor os pares $(e(\cdot), u^t(\cdot))$ para treinamento da rede.

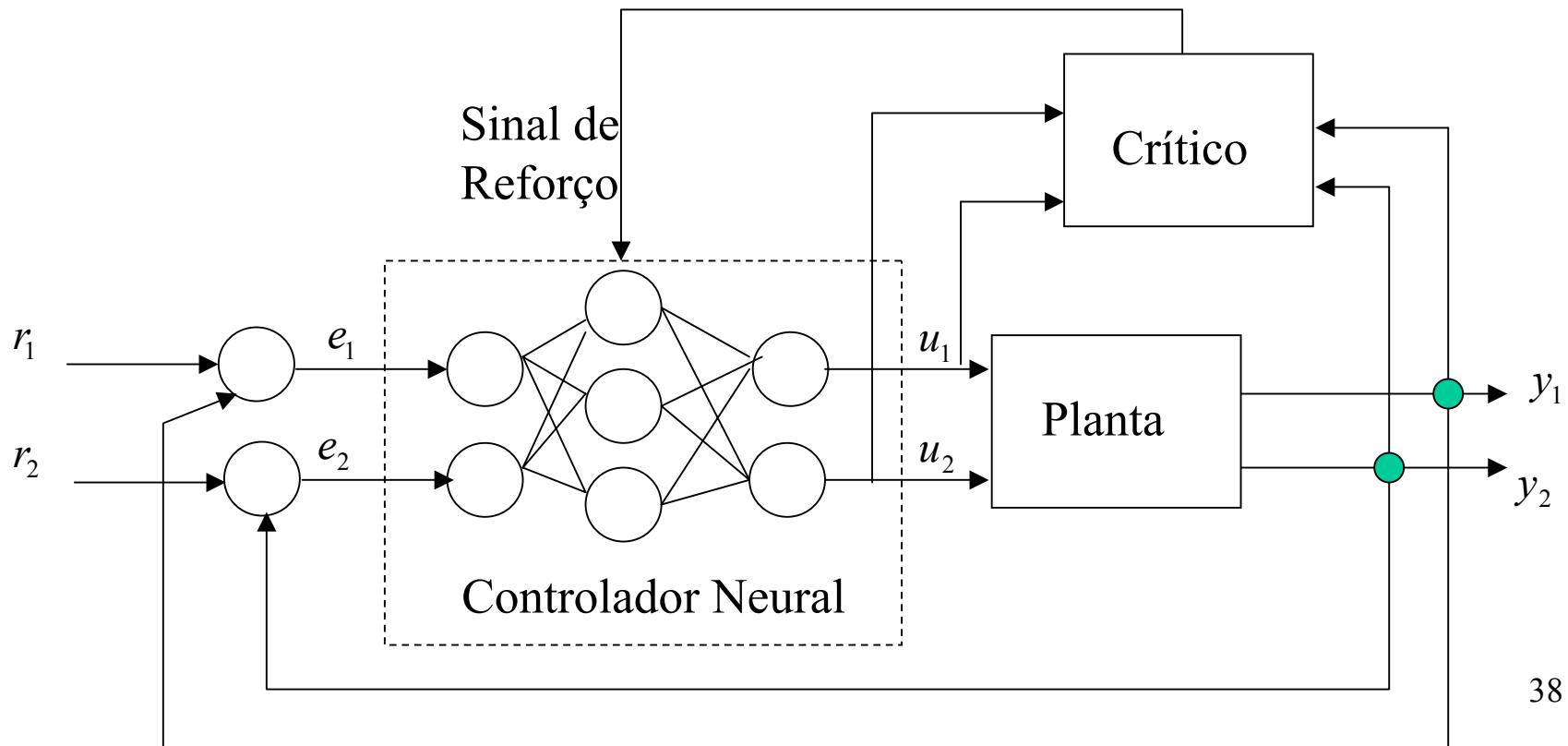


Uma alternativa para gerar $u^t(\cdot)$ é utilizar um controlador convencional, de forma que a rede neural possa “copiar” as suas características.

8 Controle Neural

Aplicação em Sistemas de Controle:

Uma outra possibilidade é utilizar o conceito de *aprendizado por reforço*, onde a rede neural gera ações $u(.)$ aleatórias e o resultado, avaliado por um crítico, é realimentado para ajuste dos pesos da rede, em um mecanismo de punição ou recompensa.



9 Controle Fuzzy

A Lógica Fuzzy:

A lógica Booleana trata com quantidades que são verdadeiras ou falsas e tem se mostrado como importante ferramenta para auxiliar a automatização de raciocínio. Porém, quando os problemas se tornam mais complexos, fica muito difícil ou até impossível representá-los usando sentenças que admitem apenas valores verdadeiros ou falsos.

Assim, a lógica fuzzy, introduzida por Zadeh em 1965, propõe, que no lugar desses únicos valores, sejam usados vários na faixa de zero até um, representando uma variação entre a completa falsidade e a verdade absoluta.

Na lógica fuzzy, a representação destes valores é realizada por variáveis lingüísticas e associa-se às mesmas funções de pertinência, as quais assumem valores entre 0 e 1.

9 Controle Fuzzy

Conjuntos Fuzzy:

Considere a temperatura de uma sala T como uma variável lingüística com três classificações possíveis: *Quente*, *OK* e *Frio*. Uma possível classificação seria dado por,

Quente: se $T > 24 \text{ }^\circ\text{C}$

OK: se $18 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 24 \text{ }^\circ\text{C}$

Frio: se $T < 18 \text{ }^\circ\text{C}$

Entretanto, estas classes de limites são arbitrárias e inapropriadas. Por exemplo, podemos classificar temperaturas de $23.5 \text{ }^\circ\text{C}$ como OK e $24.5 \text{ }^\circ\text{C}$ como Quente ?

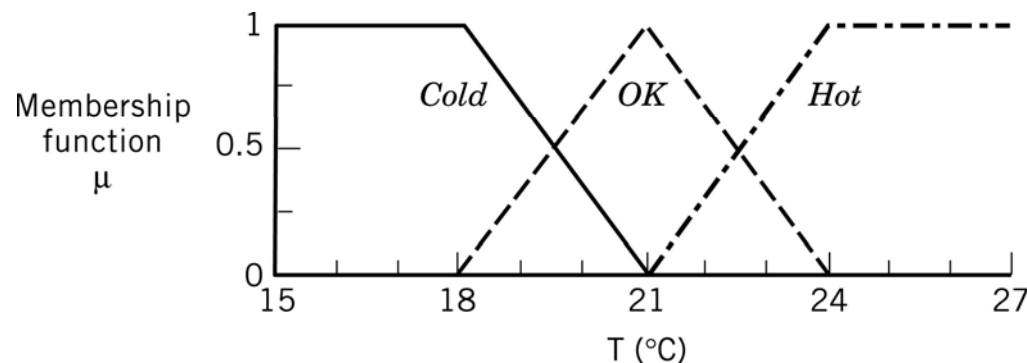
9 Controle Fuzzy

Conjuntos Fuzzy:

Uma classificação mais apropriada é baseada no conceito de *conjuntos fuzzy*.

Na teoria dos conjuntos fuzzy, uma variável física como uma temperatura é convertida em uma categoria lingüística como *Quente* pelo uso de uma *função de pertinência*, μ . A figura abaixo mostra funções de pertinência para as três categorias de temperatura.

Cada μ é limitado entre zero e um. Uma característica da teoria dos conjuntos fuzzy é que uma variável física pode simultaneamente pertencer a mais de uma categoria.



Como exemplo, a figura indica que quando $T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, a temperatura da sala é considerada ambas *Quente* e *OK* com $\mu_{Quente} = 0.33$ e $\mu_{OK} = 0.67$, respectivamente. O valor de μ é chamado de grau de pertinência.

9 Controle Fuzzy

Cada função de pertinência define um conjunto fuzzy, o qual é também referido como uma variável linguística. A conversão de uma variável física para uma variável linguística através de uma função de pertinência específica é um procedimento referido como *fuzzificação*.

Controle Fuzzy:

Os cálculos do controle com lógica fuzzy são executados como um conjunto de regras chamado de *base de regras*. Como exemplo, considere uma versão fuzzy do controlador PI digital de velocidade.

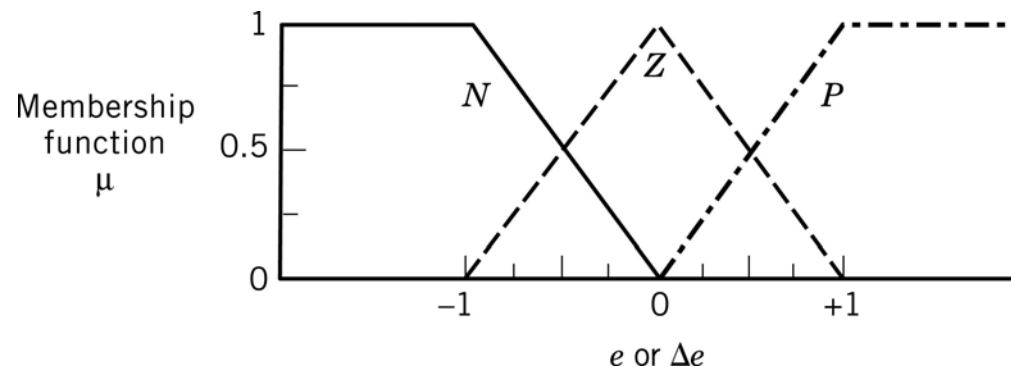
$$\Delta p(k) = K_C \left[\Delta e(k) + \frac{\Delta t}{\tau_I} e(k) \right]$$

A mudança na saída do controlador no k-ésimo instante de amostragem, $\Delta p(k) = p(k) - p(k-1)$, depende do sinal de erro corrente $e(k)$ e da mudança do sinal de erro $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$. Para a versão do fuzzy do controlador PI, e e Δe são convertidos em variáveis linguísticas e os cálculos do controle são realizados um base de regras no lugar da equação acima.

9 Controle Fuzzy

Controle Fuzzy:

Os cálculos do controle com lógica fuzzy são executados como um conjunto de regras chamado de *base de regras*. Como exemplo, considere uma versão fuzzy do controlador PI digital de velocidade. Funções de pertinência típicas são exibidas na figura abaixo, onde admite-se que e e Δe tenham funções de pertinência idênticas para as três variáveis lingüísticas: N (negativo), P (positivo) e Z (zero).



9 Controle Fuzzy

Controle Fuzzy:

A base de regras do controle fuzzy consiste em nove regras selecionadas pelo usuário na tabela abaixo. Para cada par de valores de e e Δe , a correspondente entrada na tabela é uma saída de controle fuzzy para aquela regra. Como exemplo, a regra 2 pode ser expressa como:

Regra 2: IF e é zero AND Δe é positivo, THEN $\Delta p_2 = \text{MI}$ (aumento médio)

		e		
		N	Z	P
Δe	P	1 Z	2 MI	3 LI
	Z	4 MD	5 Z	6 MI
	N	7 LD	8 MD	9 Z

$\frac{\text{error } \Delta \text{ error}}$
 P = positive
 Z = zero
 N = negative

$\frac{\text{Controller output}}$
 MI = medium increase
 LI = large increase
 MD = medium decrease
 LD = large decrease

onde Δp_2 denota a saída do controlador para a regra 2. Neste exemplo, existem nove saídas para o controlador fuzzy, uma para cada regra. A saída do controlador fuzzy são então combinadas para fornecer a saída de controle Δp . Este procedimento é chamado de *defuzzificação*. 44

9 Controle Fuzzy

Controle Fuzzy:

A defuzzificação é baseada em graus de pertinência e conceitos da teoria de conjuntos fuzzy. Uma abordagem geral para um número arbitrário de R regras e o cálculo de Δp como uma soma ponderada das saídas do controle fuzzy.

$$\Delta_p = \frac{\sum_{i=1}^R q_i \Delta p_i}{\sum_{i=1}^R q_i}$$

onde Δp_i é a mudança na saída do controlador fuzzy para a regra i e q_i é a verdade para a regra i . Por definição, q_i é o valor mínimo de dois graus de pertinência associados a regra i .

9 Controle Fuzzy

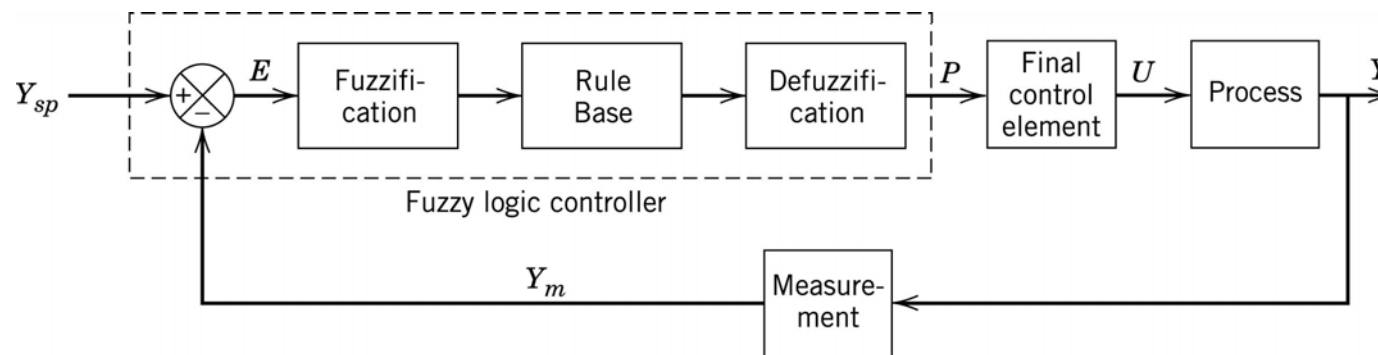
Controle Fuzzy:

Como um exemplo, suponha que $e = -0.3$ e $\Delta e = +0.2$. Então, a figura das funções de pertinência indicam que e tem um grau de pertinência de 0.3 para a variável lingüística N e um grau de 0.7 para Z .

Similarmente, Δe tem um grau de pertinência de 0.2 para P e 0.8 para Z . Portanto, a verdade para a regra 2 é $q_2 = \min(0.7, 0.2) = 0.2$. Os outros q_i valores para as outras regras podem ser determinados da figura das funções de pertinência de forma similar.

9 Controle Fuzzy

Um diagrama de blocos para o controle fuzzy é mostrado na figura abaixo. O sinal de erro E é convertido para um conjunto fuzzy de variáveis lingüísticas (fuzzificação) pela definição de funções de pertinência. A base de regras é então aplicada ao erro fuzzificado. O procedimento de defuzzificação converte a saída do controlador fuzzy de uma base de regras para uma saída de controle P .



Em síntese, o controle fuzzy pode ser visualizado como uma metodologia de incorporar conhecimento e experiência ao projeto do sistema de controle. Ele pode ser também interpretado como um método de projeto heurístico para controladores não-lineares.

OBRIGADO