



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
COLÉGIO TÉCNICO INDUSTRIAL DE SANTA MARIA
Curso de Eletrotécnica**



Apostila de Automação Industrial

Elaborada pelo Professor M.Eng. Rodrigo Cardozo Fuentes

Prof. Rodrigo C. Fuentes
Campus- UFSM – Prédio 5
Email: fuentes@smail.ufsm.br
Web-site: w3.ufsm.br/fuentes

**SANTA MARIA – RS
2005**

ÍNDICE

2. CONTROLE DE PROCESSOS.....	2.1
2.1. Introdução:	2.1
2.2. Tipos de Sistemas de Controle	2.6
2.2.1. <i>Sistema de controle em Malha Aberta.....</i>	<i>2.6</i>
2.2.2. <i>Sistema de Controle em Malha Fechada.....</i>	<i>2.7</i>
2.3. Respostas de um Sistema de Controle.....	2.9
2.4. Estratégias de Controle:.....	2.12
2.4.1. <i>Controle Liga/Desliga (On-OFF):</i>	<i>2.12</i>
2.4.2. <i>Controle Proporcional:</i>	<i>2.13</i>
2.4.3. <i>Controle Derivativo:.....</i>	<i>2.14</i>
2.4.4. <i>Controle Integral:.....</i>	<i>2.14</i>
2.5. Os Elementos Controladores na Prática.....	2.17
2.5.1. <i>Controle analógico</i>	<i>2.17</i>
2.5.2. <i>Controle Digital.....</i>	<i>2.17</i>
2.6. Conclusão.....	2.18
2.7. Bibliografia	2.18

2. CONTROLE DE PROCESSOS

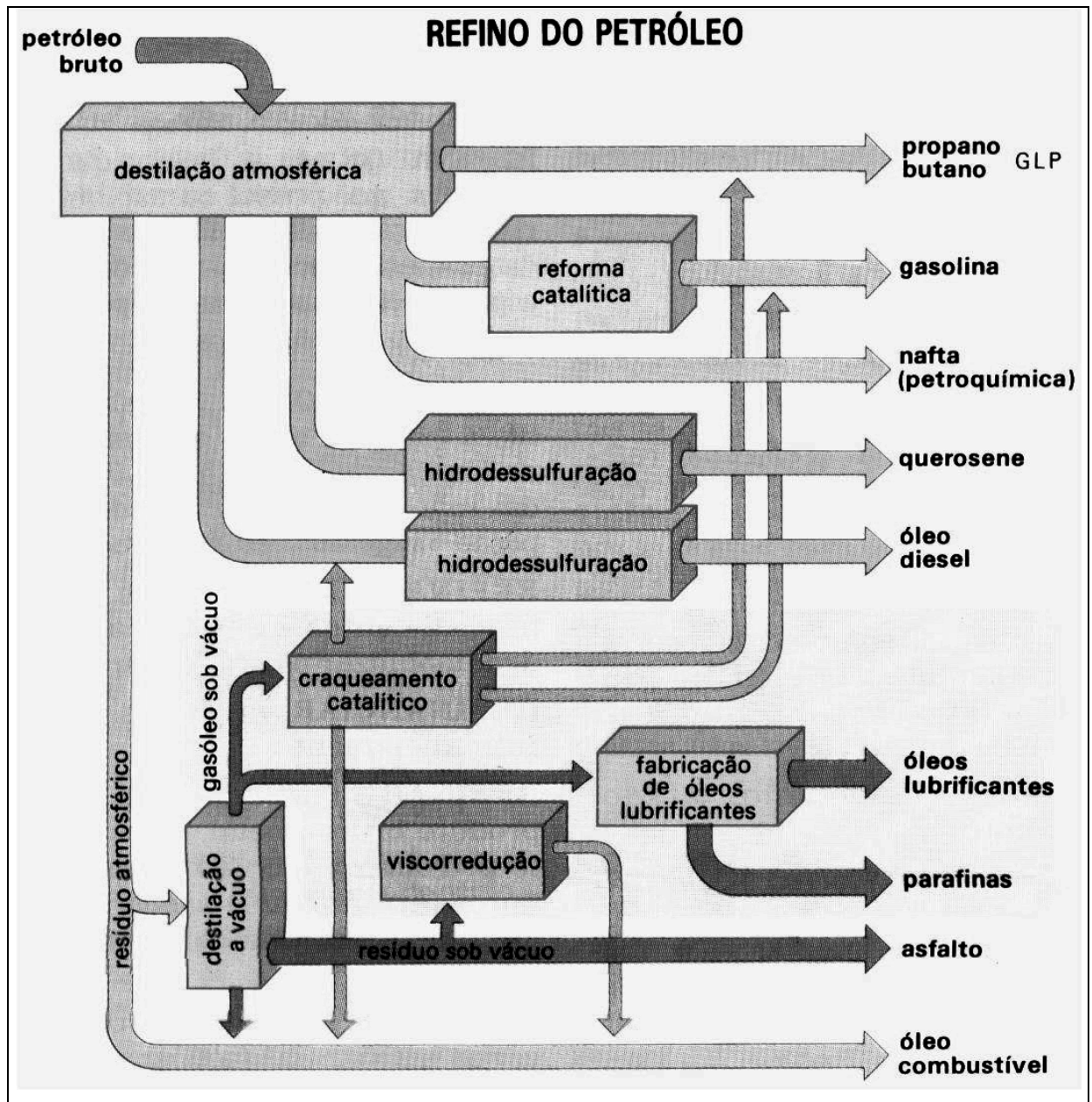
2.1. Introdução:

O controle de processos é a base fundamental da automação industrial. Desde a aplicação mais simples até os processos de produção de fluxo contínuo, como em uma planta petroquímica, são analisados e desenvolvidos através dos elementos básicos do controle de processos. Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais, os tipos de sistemas de controle e as estratégias mais utilizadas no controle industrial. A teoria é desenvolvida a nível técnico profissionalizante de forma simples e objetiva sem a utilização de um aprofundamento matemático.

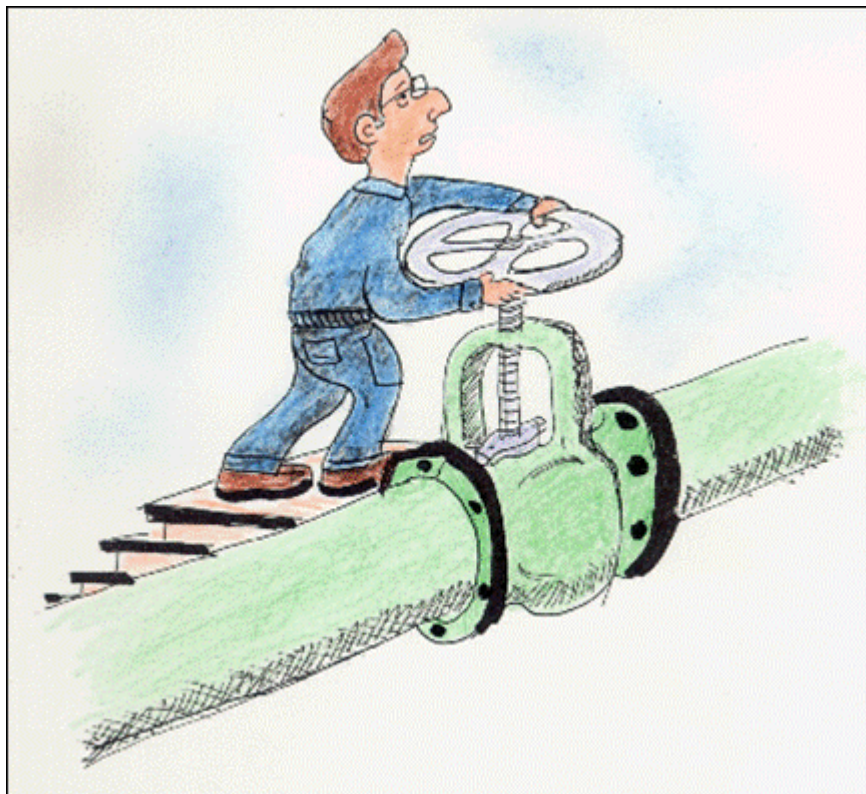
Processo Industrial: É o conjunto formado por equipamentos mecânicos, elétricos, eletrônicos, hidráulicos ou pneumáticos, que através de sucessivas operações utilizando matérias primas e energia resultarão em um produto acabado e resíduos.



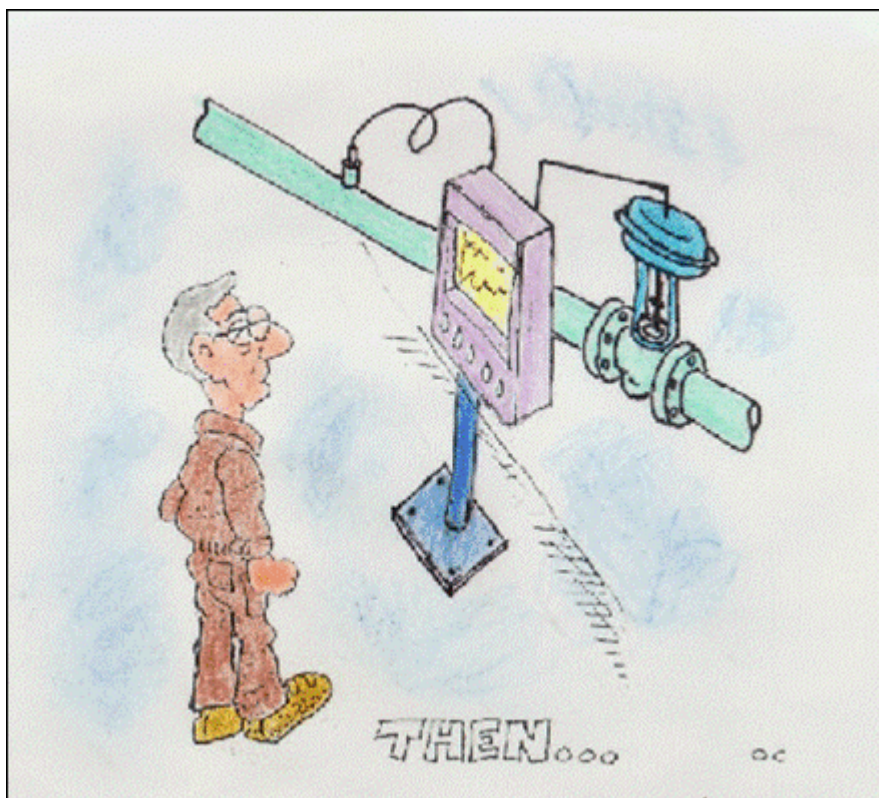
Os controles manuais que exigem um operário presente nos processos, vêm sendo substituídos por controles automáticos. Para se obter o controle automático de um processo é necessária então a inclusão de um elemento controlador de processo.



Exemplo de um processo industrial

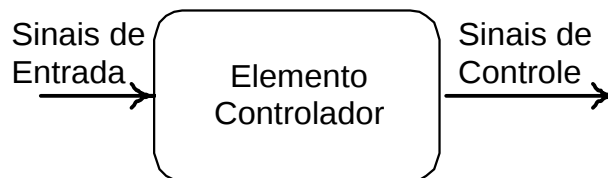


Controle Manual



Controle Automático

Elemento Controlador de Processo: O elemento controlador de processo é formado por um conjunto de circuitos elétricos, eletrônicos ou mecânicos que recebem informações através dos **sinais de entrada** que representam informações essenciais ao processo. Estes sinais são processados e transformados em **sinais de controle** que atuam diretamente no comando do processo.



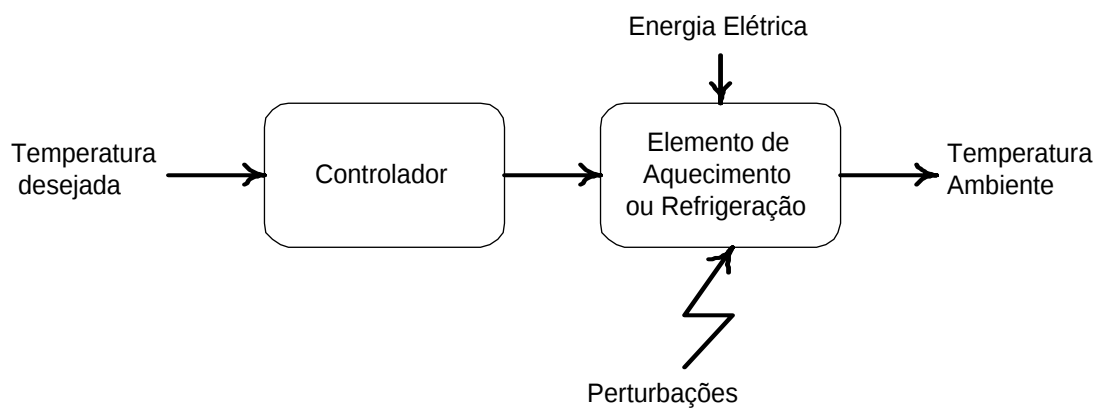
Em um controlador as **entradas** são alimentadas por sinais elétricos oriundos de sensores, conversores, interruptores, enquanto os **sinais de controle** são aplicados a elementos atuadores, válvulas, motores, conversores, etc.



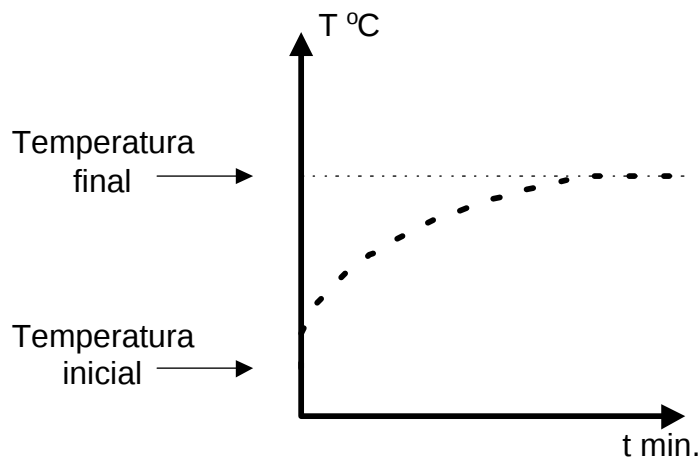
Os controladores são geralmente baseados em circuitos eletrônicos analógicos ou digitais. Os sistemas analógicos são geralmente constituídos por amplificadores operacionais, enquanto os digitais são baseados em processadores, que além de exigir um circuito eletrônico (hardware), exigem a confecção de programas (software).

Exemplo: O processo de controle de temperatura ambiente de uma residência.

O elemento controlador deste processo é formado por um termostato onde ajusta-se a temperatura desejada (set-point SP). A saída é representada pela temperatura ambiente que será controlada (Valor real ou valor do processo – PV). O processo é realizado pelo elemento de aquecimento ou refrigeração (compressor e demais componentes) que deve igualar a temperatura desejada com a temperatura ambiente.



Processo de Controle de Temperatura Ambiente



Resposta do Sistema de Aquecimento

Durante a operação do processo podem ocorrer alterações devido a agentes inesperados que são as chamadas ***perturbações***. As perturbações podem afetar significativamente os resultados a serem obtidos nas saídas do processo (PV).



Até este momento utilizamos os seguintes conceitos:

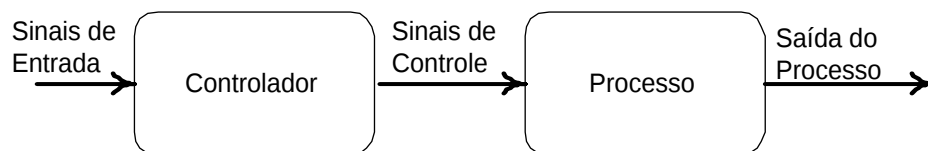
- Processo Industrial
- Elemento Controlador de Processo
- Sinais de entrada
- Sinais de controle
- Valor desejado ou Set-point (SP)
- Valor real ou valor do processo (PV)
- Perturbações

2.2. Tipos de Sistemas de Controle

Existem basicamente dois tipos de sistemas de controle: **Sistemas de Malha Aberta e Sistemas de Malha Fechada.**

2.2.1. Sistema de controle em Malha Aberta

Para um **sistema de malha aberta** os sinais de entrada são estabelecidos de forma que o sistema proporcione a saída desejada. Os sinais de entrada, entretanto não são modificados de forma a seguir as alterações nas condições de operação ou perturbações que possam ocorrer durante o processo. Pode-se dizer que um sistema de malha aberta não apresenta uma informação do estado da saída do processo.



Sistema de Controle em Malha Aberta

Muitos sistemas de controle em malha aberta utilizam um elemento de controle que envia um sinal para iniciar uma ação depois de um intervalo de tempo, ou uma sequência de ações em instantes de tempo diferentes. **O elemento controlador em tais sistemas é essencialmente um dispositivo seqüencial operado pelo tempo.**



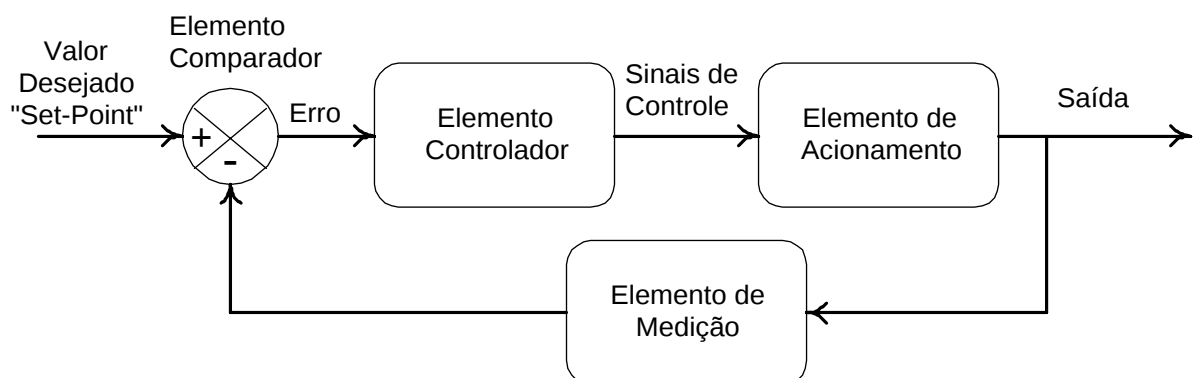
Timer Mecânico



Timer Digital

2.2.2. Sistema de Controle em Malha Fechada

Em um **sistema em malha fechada**, a grandeza a ser controlada é monitorada através de um **elemento de medição**. Esta informação é comparada com o **valor desejado** (set-point - SP) através de um **elemento comparador** produzindo-se um **signal de erro**. Este sinal de erro é processado pelo **elemento controlador** gerando sinais de controle que atuarão sobre o processo. Os elementos atuadores do processo agirão de tal maneira que, sejam corrigidos eventuais desvios, causados por modificações nas condições de operação, ou perturbações no processo.



Sistema de Controle em Malha Fechada

Pode-se verificar que em um sistema de malha fechada são adicionados novos elementos. O **elemento de medição** que fará a monitoração da saída e o **elemento comparador** que fará a comparação entre o valor de saída do processo

(PV) e o valor desejado (referência ou Set-Point). O valor resultante da comparação entre o valor medido na saída e o valor desejado (set-point) é chamado **erro**.

Para ilustrar ainda mais as diferenças entre sistemas em malha aberta e em malha fechada, vamos considerar como exemplo a operação de um motor elétrico de corrente contínua.

Em um sistema em malha aberta, a velocidade de rotação do eixo pode ser determinada somente por um ajuste inicial da tensão aplicada ao motor. Qualquer mudança na tensão de alimentação, temperatura ou variação da carga no eixo do motor, alterará a velocidade de rotação do motor e não será compensada pelo sistema de controle (não existe ramo de realimentação). Em um sistema de controle em malha aberta, a saída do sistema não tem efeito no sinal de entrada.

Em um sistema de malha fechada, no entanto, o ajuste inicial do controlador será para uma velocidade em particular do motor, e esta se manterá pela realimentação mesmo que ajam mudanças na fonte de alimentação ou de carga no eixo, dentro de certos limites. A saída passa a ter efeito direto no sinal de entrada da planta, modificando-o para manter o sinal de saída no valor desejado.

**Motor****Sensor****Controlador**

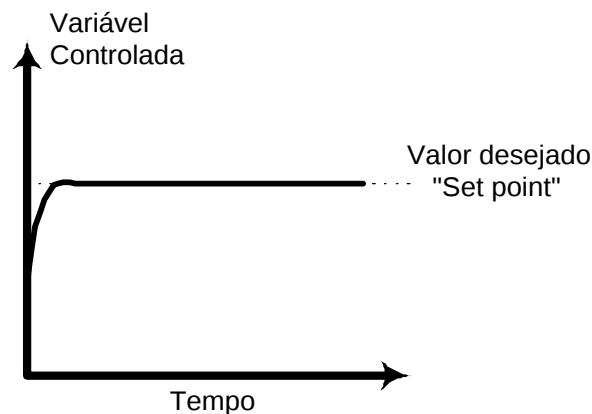
Os sistemas em malha aberta têm a vantagem de ser relativamente simples e, em consequência, de baixo custo. Entretanto são facilmente imprecisos, já que não existe correção para os erros. Em um sistema de malha fechada pode-se combinar os valores reais com os desejados, entretanto, atrasos de tempo no sistema, podem comprometer uma ação corretiva e, em consequência, ocasionar oscilações na saída e instabilidade. Os sistemas de malha fechada são mais

complexos, bem mais onerosos e com maiores possibilidades de danos, pois normalmente são compostos de um número maior de componentes.

2.3. Respostas de um Sistema de Controle

Em um sistema de controle automático de malha fechada o elemento comparador produz um erro de acordo com o valor medido na saída do processo (PV) e o valor desejado (SP). O elemento controlador irá atuar de maneira a anular a diferença existente entre os dois, **produzindo uma ação de controle**.

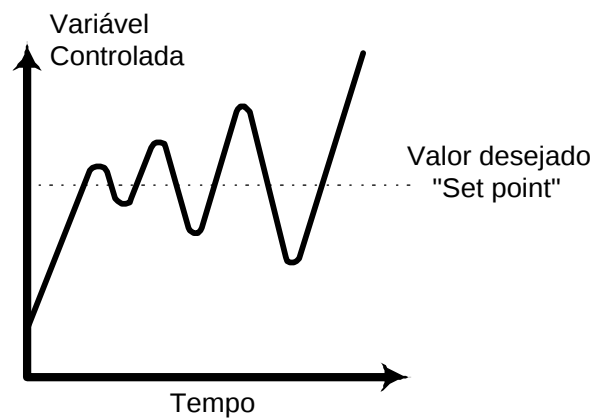
É desejável que o elemento controlador produza uma **resposta rápida e com a maior precisão possível**.



Exemplo de uma resposta próxima ao Ideal

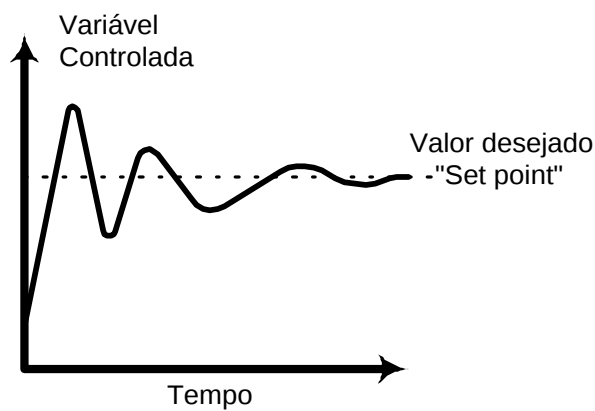
Se esta ação corretiva for demasiadamente forte o valor do processo ultrapassará o valor desejado “**Overshoot**” e conseqüentemente entrará em oscilação.

Esta oscilação pode ampliar-se tornando o processo instável conforme a figura abaixo.



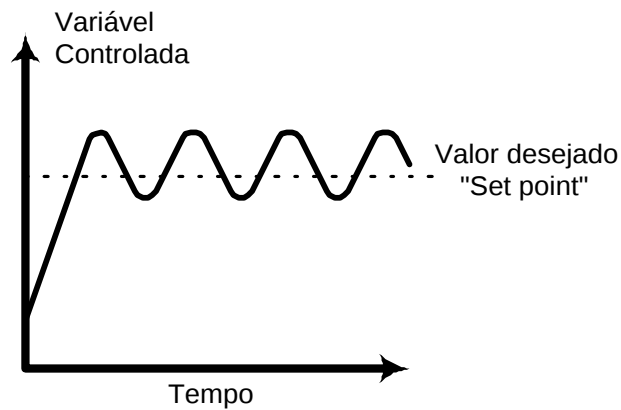
Exemplo de uma resposta Instável

A oscilação pode ser amortizada e atingir após transcorrido um determinado tempo o set-point. Veja a figura abaixo.



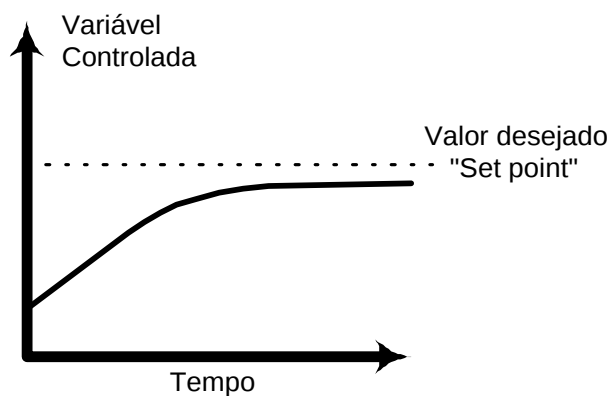
Exemplo de uma resposta Estável

A oscilação pode permanecer e produzir uma resposta oscilatória no processo. Veja a figura abaixo.



Exemplo de uma resposta Oscilatória

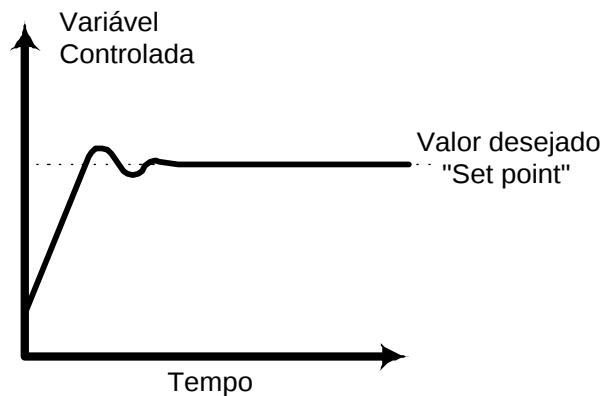
Por outro lado, se a ação do elemento de controle apresentar baixa intensidade. O processo levará muito tempo para anular o erro, ou às vezes nunca o eliminará. Veja a figura abaixo.



Exemplo de Uma resposta muito lenta

Para obter uma boa regulação o elemento controlador deve satisfazer as seguintes condições:

- Estabilidade
- Curto tempo de resposta
- Pequeno Overshoot



Esta resposta apresenta uma boa relação entre tempo de resposta e overshoot.

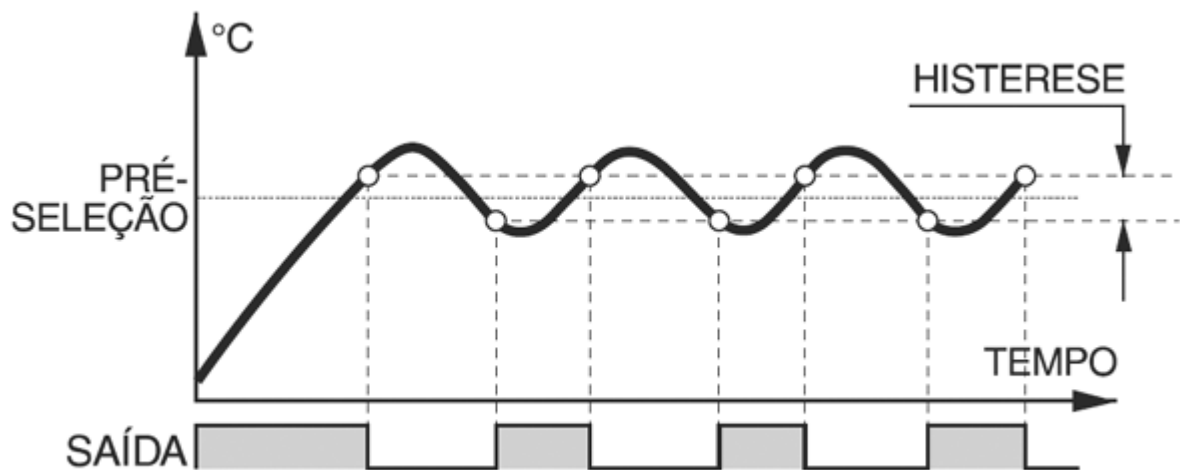
2.4. Estratégias de Controle:

As estratégias de controle são técnicas aplicadas aos controladores industriais que permitem tipos de respostas diferentes e adequadas a cada sistema de controle, minimizando erros de posição, velocidade e tempo de resposta.

2.4.1. Controle Liga/Desliga (On-OFF):

Nesta estratégia de controle o sinal de controle que é aplicado ao processo, ou apresenta valor nulo, ou um determinado valor fixo. A ação de controle gerada pelo controlador poderá ligar (on) ou desligar (off) o elemento atuador do processo.

Trata-se de uma estratégia bastante simples e de larga aplicação prática em processos que permitem uma faixa de variação do valor da grandeza a ser controlada entre um nível máximo e mínimo próximos ao set-point. Esta faixa de variação é denominada histerese. A grandeza a ser controlada apresentará uma resposta oscilatória variando dentro da faixa de histerese.



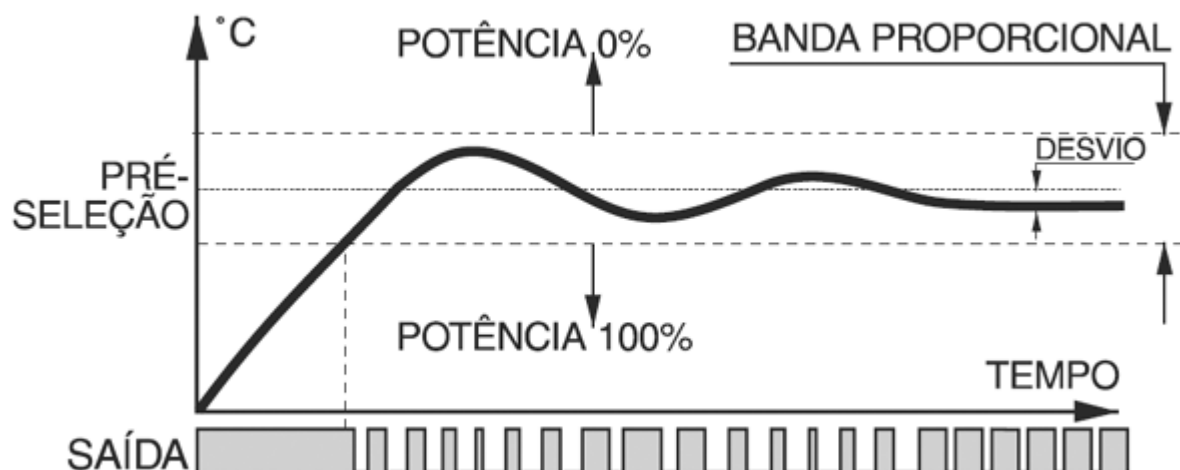
Controlador On/Off

➡ Aplica 100% de potência na carga quando o valor do processo (PV) estiver abaixo da pré-seleção mais a histerese, e 0% de potência quando estiver acima da pré-seleção menos a histerese. Resultará em OSCILAÇÃO do valor do processo (PV) ao longo do tempo.

2.4.2. Controle Proporcional:

Este controlador produz na sua saída um sinal de controle que é proporcional ao erro ou seja quanto maior o erro maior será a ação corretiva produzida pelo controlador na saída. Esta proporcionalidade é representada por uma constante k_p que define o fator de amplificação do controlador (ganho).

Esta estratégia é largamente empregada no controle industrial pois minimiza os erros ao longo do tempo permanecendo apenas um desvio em relação ao set-point denominado off-set.



Controle Proporcional

☞ A potência aplicada na carga varia de forma proporcional à diferença (desvio) entre a pré-seleção e o valor medido no processo (sensor), dentro da faixa determinada pelo ajuste de $XP\%$ a potência aplicada na carga é 0% e abaixo dessa banda é 100%. É indicado para processos estáticos. Resultará em **ESTABILIZAÇÃO** da temperatura ao longo do tempo.

2.4.3. Controle Derivativo:

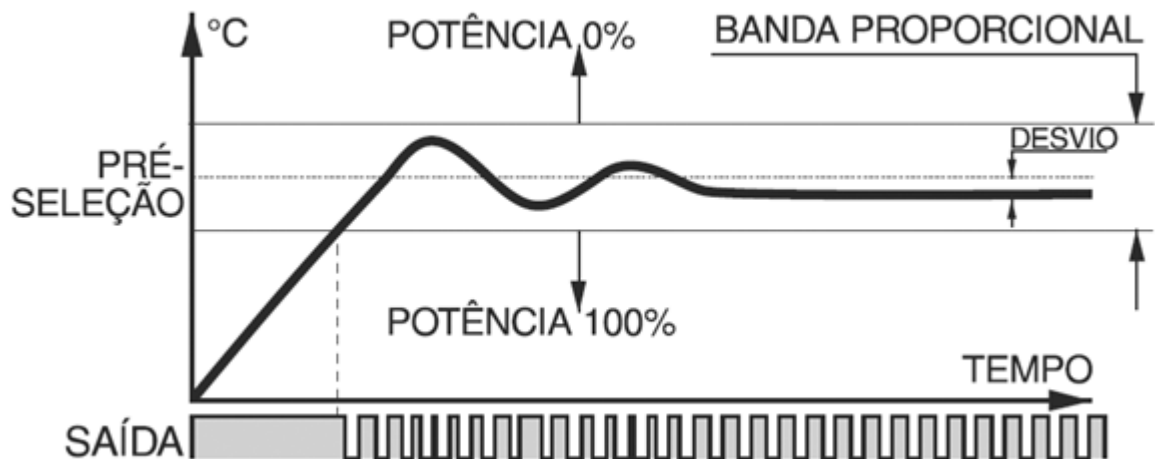
A saída do controlador é proporcional a taxa de variação do sinal de erro ou seja a derivada do erro. Este tipo de controlador proporciona uma ação bastante rápida sempre que ocorrerem variações na saída, entretanto não minimiza erros de regime permanente. Nesta estratégia deve ser definida a constante derivativa k_d .

Esta estratégia é muito utilizada em sistemas de posicionamento, movimentação de ferramentas e controle de rotação. Onde são exigidas ações rápidas frente às modificações nas condições de operação ou perturbações.

2.4.4. Controle Integral:

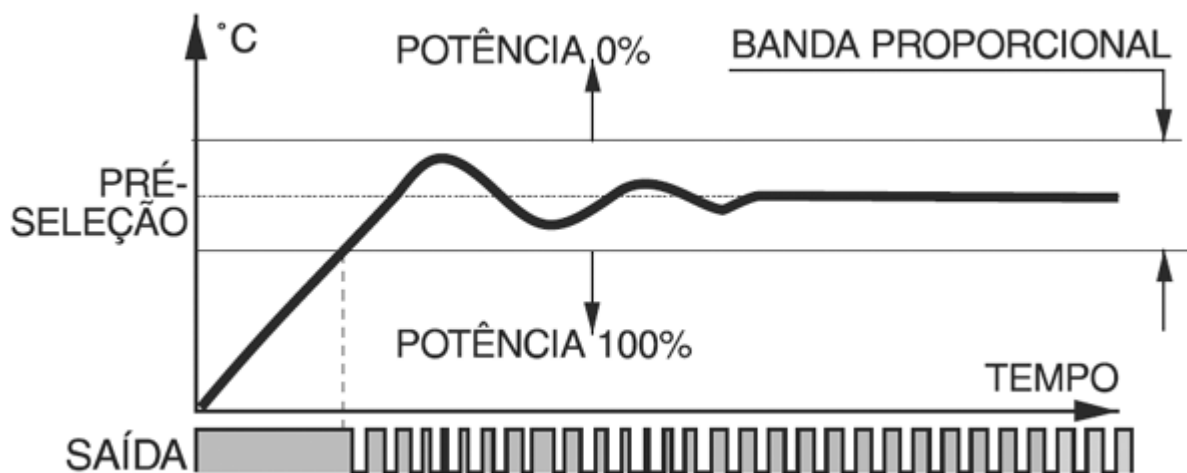
A saída do controlador é proporcional ao somatório do sinal de erro em um determinado instante de tempo, ou seja, a integral do erro. Este tipo de controlador minimiza os erros de regime permanente do sistema, entretanto sua ação de resposta é lenta. Nesta estratégia deve-se definir o valor do ganho integral através da constante k_i .

Além destas estratégias de controle podem-se encontrar controladores associados como PI (proporcional-integral), PD (proporcional-derivativo), ou PID (proporcional-integral-derivativo).



Controle Proporcional Derivativo

Funciona conforme o controle proporcional, acrescido de uma maior velocidade de reação do controlador às variações do processo. É obtida por um circuito eletrônico de ação derivativa. É indicado para processos dinâmicos. Resultará numa RÁPIDA ESTABILIZAÇÃO do valor do processo ao longo do tempo.



Controle Proporcional Integral Derivativo

👉 O controle PID (proporcional integral derivativo) funciona conforme o controle PD, acrescido de uma estabilização o mais próximo possível do valor da pré-seleção. É realizada por um circuito eletrônico cuja ação é obtida através de um algoritmo matemático que efetua a integral do desvio. Resultará numa RÁPIDA e PRECISA ESTABILIZAÇÃO do valor do processo ao longo do tempo.

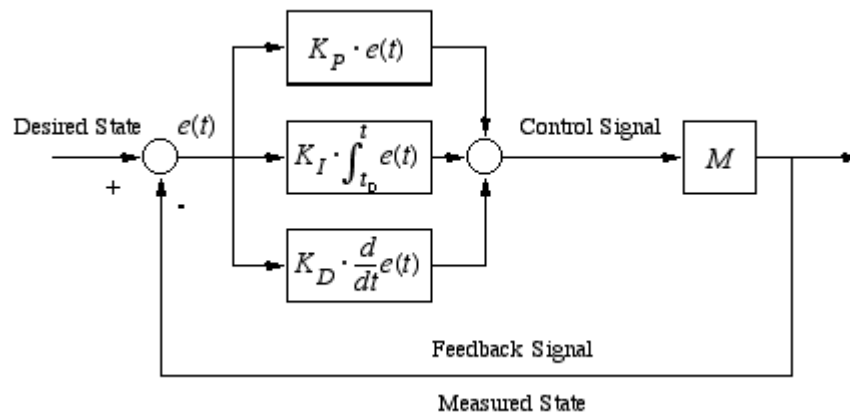
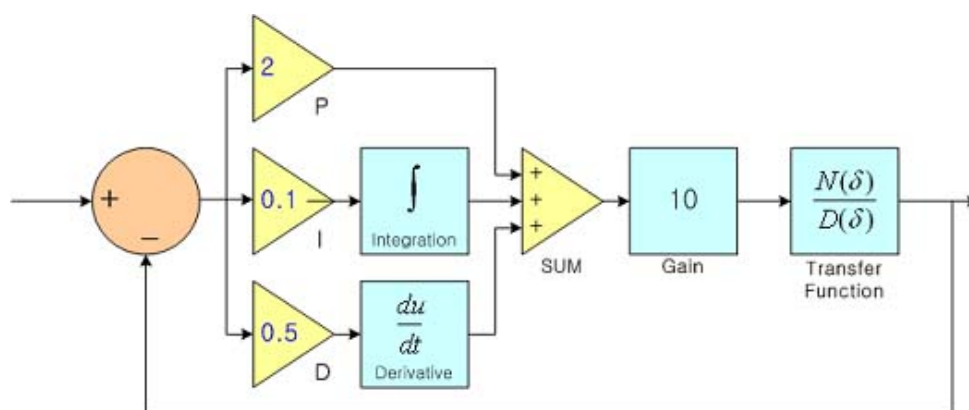


Diagrama do controlador PID

A principal habilidade a ser desenvolvida pelos profissionais de controle é a correta escolha da estratégia em função do processo físico a ser controlado. Outra definição refere-se ao correto dimensionamento dos valores de ganho k_p , k_d e k_i dos quais dependerá a resposta do sistema.



Controlador PID com os valores dos ganhos



Leia o artigo Teoria de Controle PID da revista Mecatrônica Atual n.3 de abril de 2002.

2.5. Os Elementos Controladores na Prática

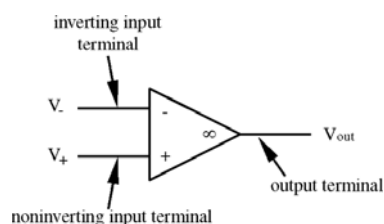
Na maioria das vezes as estratégias de controle são implementadas na prática através da utilização de circuitos eletrônicos. Estes circuitos podem utilizar a tecnologia da eletrônica analógica ou da eletrônica digital.

2.5.1. Controle analógico

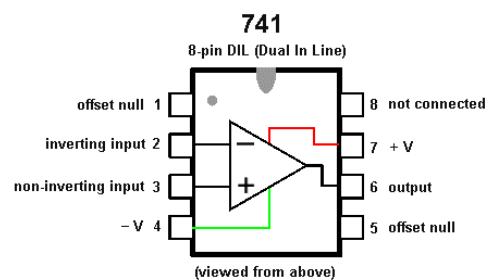
O controle analógico apresenta grande velocidade de ação devido a própria natureza analógica dos sinais envolvidos no processo. Sua tecnologia é baseada nos amplificadores operacionais. Estes circuitos apesar de sua simplicidade apresentam grande versatilidade podendo implementar desde um simples comparador até um controlador proporcional integral derivativo (PID).



Circuito Integrado



Esquema elétrico



Identificação dos terminais



Leia o artigo Amplificadores Operacionais Aplicados a Indústria da revista Saber Eletrônica n.342 de julho de 2001.

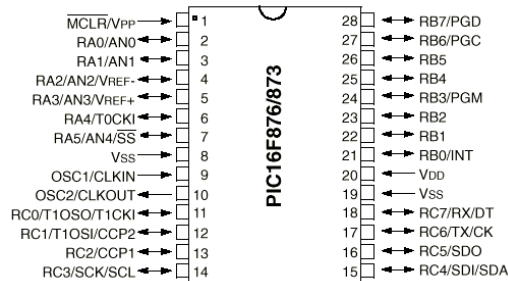
2.5.2. Controle Digital

Os controladores de processos que utilizam a tecnologia digital são implementados através dos microprocessadores, memórias e microcontroladores. No controle digital são necessárias conversões dos sinais elétricos analógicos em informações digitais (conversão A/D). Estas informações são processadas através de um Hardware e um Software específicos produzindo as informações de controle que novamente são traduzidos em sinais analógicos (conversão D/A).

O controle digital tem apresentado grande evolução na última década com a produção de microcontroladores com características cada vez mais complexas e velocidades de processamento cada vez maiores.



Microcontrolador



Identificação dos terminais



Hardware

2.6. Conclusão

Neste capítulo estudamos os principais conceitos que envolvem o controle automático de processos. Lembre-se que a abordagem deste tema foi ampla mas sem o devido tratamento matemático. Para o devido aprofundamento sugiro a consulta em bibliografias e artigos específicos.

2.7. Bibliografia

- Rosário, João Maurício. **Princípios de Mecatrônica** – Editora Prentice Hall
- Ogata, Katsuhiko . **Engenharia de Controle Moderno** – Editora Prentice Hall do Brasil Ltda.
- Pazos, Fernando. **Automação de Sistemas & Robótica** – Editora Axcel Books.
- Bolton W. **Engenharia de Controle** – Editora Makron Books – 1995.