

# CONTROLADORES

Por definição, *loop* de controlo é todo o sistema de controlo constituído por: elemento primário de medida, transmissor/conversor de sinal, controlador e elemento final de controlo (EFC) (Válvula de controlo, conversor de frequência, triac, e outros). Os *loops* de controlo podem ter dois ou mais EFC. Por exemplo: no controlo de temperatura para aquecimento/arrefecimento e ou controlo fino/grosso; no controlo pH para injeção de ácido/cal. Nos processos industriais utilizam-se os seguintes tipos de controlo:

- Duas posições (ON/OFF);
- Duas posições Flutuante;
- Proporcional de tempo variável;
- Proporcional;
- Proporcional + Integral;
- Proporcional + Derivativo;
- Proporcional + Integral +Derivativo.

## CONTROLO ON/OFF

Os controladores ON/OFF podem ter uma ou duas saídas de controlo, com dois estados lógicos (ON/OFF) e com ou sem banda diferencial (zona morta entre estados).

Na regulação ON/OFF o elemento final de controlo move-se rapidamente entre dois estados e, este tipo de controlo caracteriza-se por um ciclo contínuo de variação da variável controlada. A forma do referido ciclo é semelhante à função  $sen \alpha$ .

Neste tipo de controlo normalmente é usada a banda diferencial, a qual permite que o elemento final de controlo (EFC) permaneça na última posição para valores da variável dentro do intervalo da banda diferencial (Figura 1). Assim os ajustes neste tipo de controlo são definidos pela banda diferencial e pelo *set value* (SV).

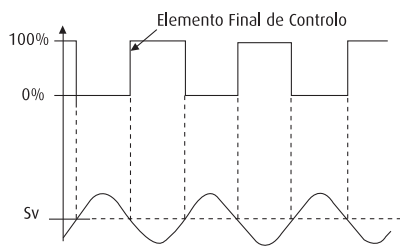


Figura 1 - Controlo ON/OFF normal.

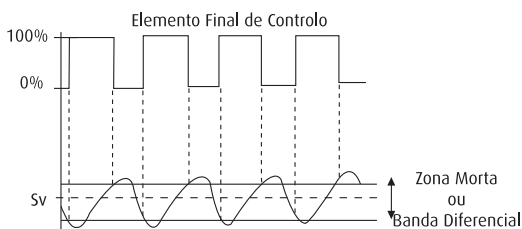


Figura 2 - Controlo ON/OFF com Banda Diferencial.

## CONTROLO FLUTUANTE

Este tipo de controlo utiliza o controlo ON/OFF. A diferença reside no elemento final de controlo o qual muda de posição com uma velocidade constante, isto é, faz o percurso entre 0% ~ 100% e vice-versa num tempo pré-determinado. Relativamente ao controlo ON/OFF, o controlo flutuante tem a vantagem de reduzir as oscilações da variável controlada.

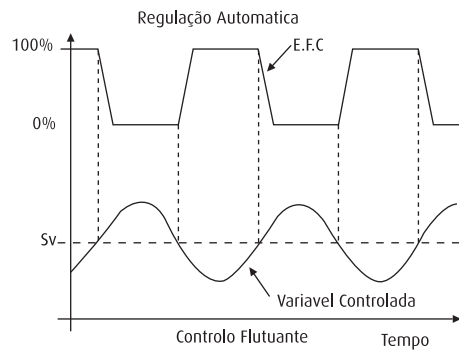


Figura 3 - Controlo flutuante.

## CONTROLO PROPORCIONAL DE TEMPO VARIÁVEL

Neste sistema de controlo existe uma relação pré-determinada entre o valor da variável controlada e a posição média em tempo do elemento final de controlo ON/OFF. O tempo de ciclo ON/OFF é constante, mas a relação entre os tempos ON e OFF dentro de cada ciclo varia proporcionalmente ao valor de *offset* ( $offset = set\ value - process\ value$ ).

Este tipo de controlador tem uma regulação pela banda proporcional (%) e pelo tempo de ciclo (s). Em que a banda proporcional (BP) é a percentagem do campo de medida da variável controlada que o elemento final de controlo (EFC) necessita para efectuar um percurso completo, isto é, passar de completamente aberta a completamente fechada (Figura. 5).

Nota que para  $BP > 100\%$  e para todo o campo de medida da variável controlada, não é possível controlar o EFC no seu movimento completo.

Assim na Figura 4 é possível verificar que para um controlador com  $BP = 20\%$  e 10 s de tempo de ciclo, significa que com um  $offset = 0\%$  o elemento final de controlo (EFC) posiciona-se em ON durante 5 s e em OFF nos restantes 5 s. Com um  $offset = -5\%$ , o EFC posiciona-se em ON durante 7,5 s e em OFF os restantes 2,5 s. Para um valor de  $offset \leq -10\%$  ou  $offset \geq 10\%$ , o EFC posiciona-se respectivamente em ON ou OFF durante todo o ciclo.

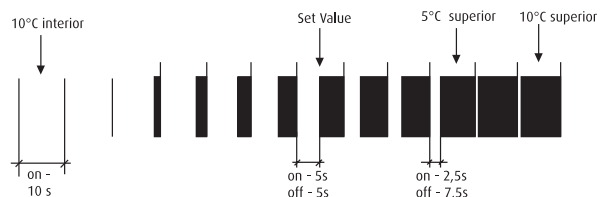


Figura 4 - Controlo proporcional de tempo variável.

### CONTROLO PROPORCIONAL (P)

Neste sistema de controlo existe uma relação linear contínua entre o valor da variável controlada e a posição do elemento final de controlo (EFC), dentro do valor da banda proporcional (BP). Sempre que ocorre uma variação de *offset*, a posição do EFC sofre uma variação proporcional, dependente do valor da BP. Os valores normais da BP estão compreendidos entre 3% ~ 500% da escala do controlador (Figura 5). Estes controladores tem um comutador de acção directa ou reversa, o qual permite seleccionar o sentido de variação da saída (*output*) por variação do *offset*.

As seguintes equações mostram o comportamento do controlador com BP.

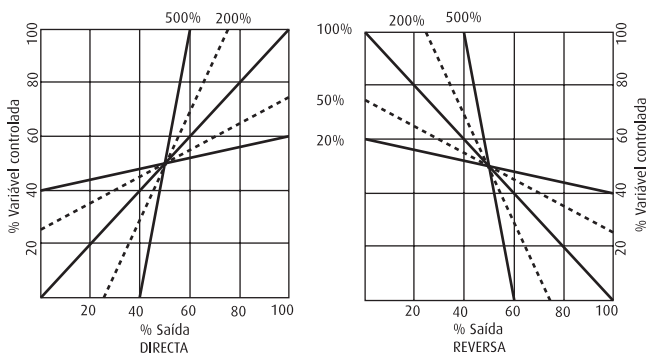


Figura 5 · Banda Proporcional de acção DIRECTA e REVERSA.

$$O = K\varepsilon + MR \quad k = \frac{\Delta O}{\Delta \varepsilon} \quad BP = \frac{100\%}{K}$$

O - Variável Manipulada  
 K - Ganho Proporcional  
 BP - Banda Proporcional  
 $\varepsilon$  - *Offset*  
 MR - Manual Reset

Na Figura 6 observa-se que o controlo proporcional introduz na variável manipulada (O) uma variação de sentido contrário à perturbação que a variável de carga produz no processo, de modo a que a variável controlada seja reconduzida a um valor próximo do valor desejado (*SET VALUE*). Porém, mantendo-se a variação de carga, não é possível eliminar completamente o *offset*. No controlo proporcional, após uma variação de carga e sem alteração do *SET VALUE*, a única forma de eliminar o *offset* é por variação da variável manipulada (controlador em modo manual). Esta operação chama-se *Manual Reset*.

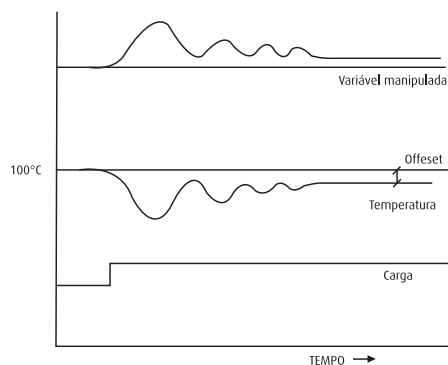


Figura 6 · Controlo proporcional.

### CONTROLO PROPORCIONAL + INTEGRAL (PI)

Nos controladores com modo integral a função *reset* é feita automaticamente. O nome integral provém da existência de dispositivos capazes de integrar o *offset* do sistema. Como se sabe, o modo proporcional não é suficiente para reconduzir o processo ao equilíbrio desejado, após variação da carga ou do *SET VALUE*.

O modo integral gera um sinal de correcção de *offset* que depende do tempo decorrido. O sinal de correcção cessa quando se anular o *offset*. A acção do modo integral em cada instante  $t$  está relacionada com o *offset* pela expressão:

$$O_i = \frac{K}{T_i} \varepsilon t$$

$T_i$  é uma constante (regulável) denominada tempo integral, e vem expressa em segundos ou minutos.

Na Figura 7 pode ver-se a resposta ao degrau de um controlador proporcional + Integral, num sistema de malha aberta.

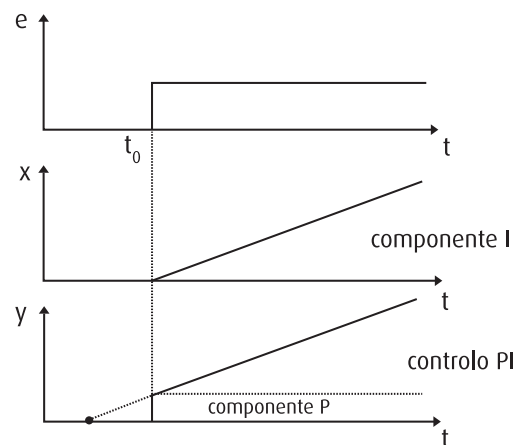


Figura 7 · Resposta da acção P + I.

### CONTROLO PROPORCIONAL + DERIVATIVO (PD)

Com os modos de controlo anteriores, o equilíbrio do processo após uma variação de carga ou de *SET VALUE* pode ser lento. Para acelerar a estabilização do processo introduz-se um dispositivo capaz de gerar um sinal de controlo que depende da velocidade de variação do *offset*.

Se num tempo curto  $\Delta t$  o *offset* tiver a variação  $\Delta \varepsilon$ , a acção do modo derivativo está relacionada com o *offset* pela expressão (aproximada):

$$O_d = K_d T_d \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t}$$

$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t}$  representa a velocidade de variação do *offset*.  $T_d$  é uma constante (regulável) denominada Tempo Derivativo, e vem expressa em segundos. E representa o tempo pelo qual a acção derivativa antecipa o efeito da acção proporcional sobre o elemento final de controlo. Isto é, se a acção derivada é de 60 segundos, a posição do elemento final de controlo antecipa-se 60 segundos, à que teria normalmente por acção proporcional (Figura 8).

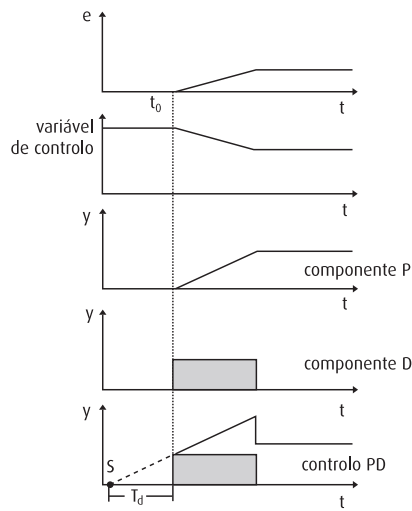


Figura 8 · Resposta da acção P + D.

**CONTROLO PROPORCIONAL + INTEGRAL + DERIVATIVO (PID)**

O tipo de controlador que permite fazer face a praticamente todas as situações de controlo é aquele que se obtém por associação dos três modos de controlo (P+I+D). Com este tipo de controlador tira-se partido da acção estabilizadora do modo P, elimina-se o *offset* por meio do modo I e consegue-se uma resposta mais rápida na estabilização e uma diminuição da amplitude dos desvios devido à acção antecipada do modo D. A equação relaciona no modo PID a variável manipulada (O) com o valor de *offset* ( $\epsilon$ ):

$$O = K \left( \epsilon + \frac{1}{T_i} \int \epsilon \cdot dt + T_d \frac{d\epsilon}{dt} \right) + MR$$

Os parâmetros PID podem ser ajustados para valores dentro dos intervalos:

- P - [3 ~ 500] %
- I - [1 ~ 6000] seg
- D - [0 ~ 600] seg

**SELECÇÃO DO TIPO DE CONTROLADOR**

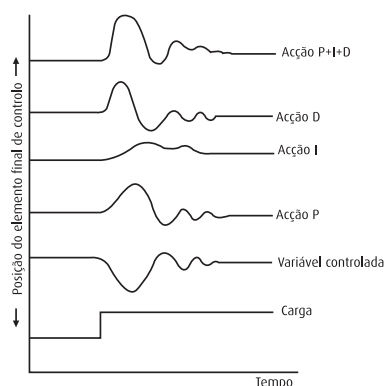


Figura 9 · Resposta da acção P + I + D.

Na Figura 9 pode-se observar como as três acções de controlo combinadas PID actuam sobre o elemento final de controlo.

Assim as características essenciais, para cada acção de controlo podem-se resumir:

1. A acção proporcional modifica a posição do elemento final de controlo (EFC), proporcionalmente ao desvio da variável controlada relativamente ao valor desejado (*SET VALUE*);
2. A acção integral move o EFC a uma velocidade proporcional ao desvio da variável controlada relativamente ao valor desejado;
3. A acção derivativa corrige a posição do EFC proporcionalmente à rapidez da variação da variável controlada.

Considerando estas características, a selecção do sistema de controlo é um compromisso entre a qualidade de controlo que se deseja e o custo do sistema de controlo.

Como economicamente existe pouca diferença entre o controlador PI e um PID, no caso de um processo em que as suas perturbações são pouco conhecidas deve-se adquirir o controlador PID para termos uma maior flexibilidade no controlo do processo.

Os controladores digitais, hoje, incorporam as três acções de controlo, de modo que a escolha e aplicação das mesmas depende mais de um critério técnico, para que o processo esteja bem controlado, do que económico.

A Tabela 1 deve consultar-se, apenas, como um guia geral aproximado para a escolha do sistema de controlo.

Tabela 1 · Guia de selecção do sistema de controlo.

Malha de Controlo	Resistência / Capacidade do processo	Rapidez da variação da variável do processo	Reacção do processo	Aplicações
Controlo ON/OFF	Moderada ou Grande	Qualquer	Lenta	O controlo de nível e de temperatura são processos de reacção lenta.
Flutuante	Pequena	Qualquer	Rápida	Processos com pequenos tempos de atraso.
Proporcional	Média	Moderada	Lenta ou Moderada	Pressão, temperatura e nível em que <i>Offset</i> não é inconveniente.
Proporcional + Integral	Qualquer	Qualquer	Qualquer	A maioria das aplicações, incluindo as de caudal.
Proporcional + Derivativo	Qualquer	Qualquer	Moderada	Quando é necessário uma grande estabilidade com um pequeno <i>Offset</i> , sem necessidade de acção integral.
Proporcional + Integral + Derivativo	Qualquer	Rápida	Rápida	Processos com variação rápida e atrasos apreciáveis (controlo de temperatura num permutador de calor).

**CRITÉRIOS DE QUALIDADE DO CONTROLO**

A estabilidade do controlo é uma característica da malha de controlo que faz com que a variável do processo volte ao valor desejado depois de uma perturbação.

Existem três critérios desejáveis para a estabilidade e estão representados na Figura 10:

O *critério de área mínima* ou *critério de estabilidade* indica que a área da curva de recuperação da variável do processo ao valor desejado deve ser mínima, para conseguir que o desvio seja mínimo no tempo mais curto (Figura 10a). Assim para obter esta área mínima a relação de amplitude entre picos de ciclos sucessivos tem de ser de ¼.

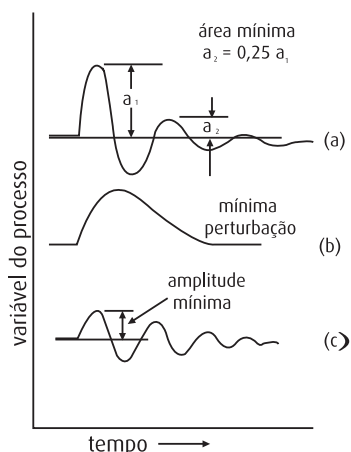


Figura 10 · Critérios de qualidade do controlo.

Este critério é um compromisso entre a estabilidade de resposta do controlador e a rapidez do retorno da variável do processo ao valor desejado ou a um valor estável: uma relação maior de  $\frac{1}{4}$  daria maior estabilidade, mas prolongava o tempo de estabilização da variável do processo aumentando a possibilidade de aparecimento de perturbações; enquanto que numa relação menor que  $\frac{1}{4}$  a variável do processo voltará mais rapidamente ao valor desejado, mas prejudicará a estabilidade do sistema.

O *critério de mínima perturbação* requer uma curva de recuperação não cíclica similar à curva b da Figura 10. E aplica-se quando, por exemplo, as

correções rápidas ou cíclicas de um elemento final de curso podem perturbar seriamente outros processos de controlo associados.

O *critério de amplitude mínima* indica que a amplitude do desvio deve ser mínima (Figura 10c) e aplica-se especialmente nos processos em que o produto ou o equipamento podem ser danificados por desvios momentâneos excessivos. Em que a magnitude do desvio é mais importante que a sua duração. Por exemplo, no caso de fusão de algumas ligas metálicas em que estar a uma temperatura acima do valor desejado durante um período de tempo pode destruir o metal.

Quando se inicia o arranque de uma planta faz-se, normalmente, um primeiro ajuste dos controladores, isto é, fixa-se os valores das acções de controlo PID. Dado que no arranque o tempo é limitado, os instrumentistas iniciam com valores de acção conhecidos pela sua experiência e só depois ajustam definitivamente estes valores.

A Tabela seguinte é um guia de referência destes valores iniciais:

Tabela 2 · Valores das acções de controlo.

Malha de Controlo	Ganho	Banda proporcional %	Integral (minutos)	Derivativo (minutos)
Pressão (líquidos)	0,2 - 2	500 - 50	0,005 - 0,05	Não é necessária
Pressão (gases)	2 - 100	50 - 1	0,1 - 50	0,02 - 0,1
Caudal	1,25 - 0,4	80 - 250	0,5 - 15	Não é necessário
Nível	1 - 2	100 - 50	Não é necessária	0,01 - 0,05
Temperatura	2 - 5	50 - 20	0,5 - 15	0,5 - 3