

Considerações sobre regulação automática

MANUEL TAVARES DE PINHO

Engenheiro electrotécnico (U.P.)

4 — TIPOS DE REGULADORES

É muito extensa a variedade de reguladores que podemos encontrar no equipamento destinado a funcionar de modo inteira ou parcialmente automático; seria fastidioso, e até inútil para o fim que nos propusemos, entrar em particularidades ou em descrições de pormenor que sejam características dalguns dos modelos que, por escolha mais ou menos discutível, pretendessemos evocar desta maneira. O que nos interessa é destacar aquilo que define, em generalidade, a função de cada regulador e reunir em grupo, se possível, todos os tipos que se integrem em funções idênticas, de modo a sistematizar e a simplificar o seu estudo; por tal motivo, iremos empregar, no que se segue, o agrupamento que a lógica sugere e é, normalmente, o que se adopta em casos destes.

Um regulador é simplesmente usado porque há que executar certo trabalho ou preencher certa função, pois foi mesmo criado para tais fins: será sempre agindo que responderá, conforme às condições impostas de antemão. Acção é, pois, uma linguagem própria dum regulador, diremos, mesmo, a única linguagem porque ele pode exprimir-se; segundo essa linguagem, isto é, as expressões usadas no diálogo regulador-sistema, assim a acção será dife-

renciada e é, pois, natural que usemos esse facto para individualizar os tipos diversos de regulador; temos, deste modo, encontrado um excelente critério de classificação, de resto, o mais apropriado: o do modo de acção do regulador.

Como primeira divisão, podemos enquadrá-los em duas grandes famílias: reguladores de *acção descontínua* e reguladores de *acção contínua*. Os primeiros agirão somente com intermitências, isto é, a grandeza de regulação será função descontínua do tempo, embora ante a contínua evolução da grandeza regulada; o termostato nosso conhecido pertence a este grupo: no sistema onde se encontra, a temperatura (grandeza regulada) pode oscilar continuamente, mas no termostato o estado de fecho ou de abertura dos contactos (grandeza de regulação) somente sofrerá alteração nos dois limites para os quais está regulado. Os segundos, pelo contrário, desenvolvem uma acção em permanência, isto é, a grandeza de regulação é agora uma função contínua do tempo ⁽¹⁾ conjuntamente com evolução do mesmo tipo sofrida pela grandeza regulada; a torneira de bóia, também já evocada, é um regulador contínuo: se o nível de água (grandeza regulada) variar no tempo, variará, também no tempo, a abertura da torneira (grandeza de regulação).

(*) Continuação do número 80

⁽¹⁾ Habitualmente, a expressão matemática que define esta função deverá apresentar derivadas igualmente contínuas no tempo.

4.1 — Reguladores de acção descontínua

Dentre os reguladores de acção descontínua merece especial destaque o chamado, vulgarmente, regulador de *tudo-ou-nada*; é caso típico o do termostato. A grandeza de regulação sòmente pode tomar dois valores perfeitamente definidos (no caso citado, fecho ou abertura dos contactos), demorando-se, em cada posição, um lapso de tempo consideravelmente maior que o tempo utilizado para passar de um ao outro estado.

É claro que há outros reguladores de acção descontínua; o de *escalões múltiplos*, em que a grandeza de regulação pode tomar vários valores bem determinados é, afinal, uma espécie de tudo-ou-nada em cada um dos escalões; certo tipo de termostato com dois ou mais pares de contactos seria um caso destes, cada par reagindo a temperaturas diferentes das de qualquer dos outros pares: no início do aquecimento, todos eles se fechariam, depois do que, a certa temperatura, abriria um par (desligando um grupo de resistências, por exemplo), a outra mais alta abriria outro ou, se a temperatura baixasse, fecharia o primeiro, etc. O regulador chamado de *duas ou mais velocidades* é outro de tipo descontínuo: a grandeza de regulação (por exemplo, o estado de abertura de uma válvula) evoluirá com rapidez constante ao passar dum ao outro estado de repouso (no exemplo, do estado de fecho completo ao de abertura total ou vice-versa), ou com vários valores de rapidez constante entre cada par de valores do estado de abertura. Reguladores chamados *passo-a-passo* ou reguladores de *acção intermitente* são, partindo destes nomes, facilmente imagináveis e podem considerar-se, em última análise, como espécie de tudo-ou-nada dentro de certos escalões de regulação.

4.2 — Reguladores de acção contínua

Nos reguladores de acção contínua é que as coisas são mais complicadas; por isso, para melhor esclarecimento, vamos apoiar-nos num exemplo que, por mera comodidade, será aquele que temos empregado já, o da torneira de bóia, embora encarando-o agora sob um ângulo ainda não usado.

4.2.1 — Reguladores de acção proporcional

Consideremos, de novo, o depósito de água, de nível estável em equilíbrio dinâmico; para as condições de caudal desse regime, o valor do nível é o correspondente valor prescrito. Se o caudal de saída crescer e se fixar noutro valor, o nível de água baixará, arrastando a bóia, a abertura da torneira aumentará e, com ela, o caudal de entrada, e um novo regime de equilíbrio se estabelece, estabilizando o nível no valor prescrito respectivo; já atrás encarámos esta situação tendo então notado que a cada valor de caudal de saída se podia atribuir um nível dado e uma abertura correspondente da válvula de entrada. Durante a passagem dum caudal a outro, por exemplo no sentido crescente, o nível baixará a princípio com certa rapidez, depois mais lentamente até atingir o valor estável, e correspondentemente se comportará o grau de abertura da

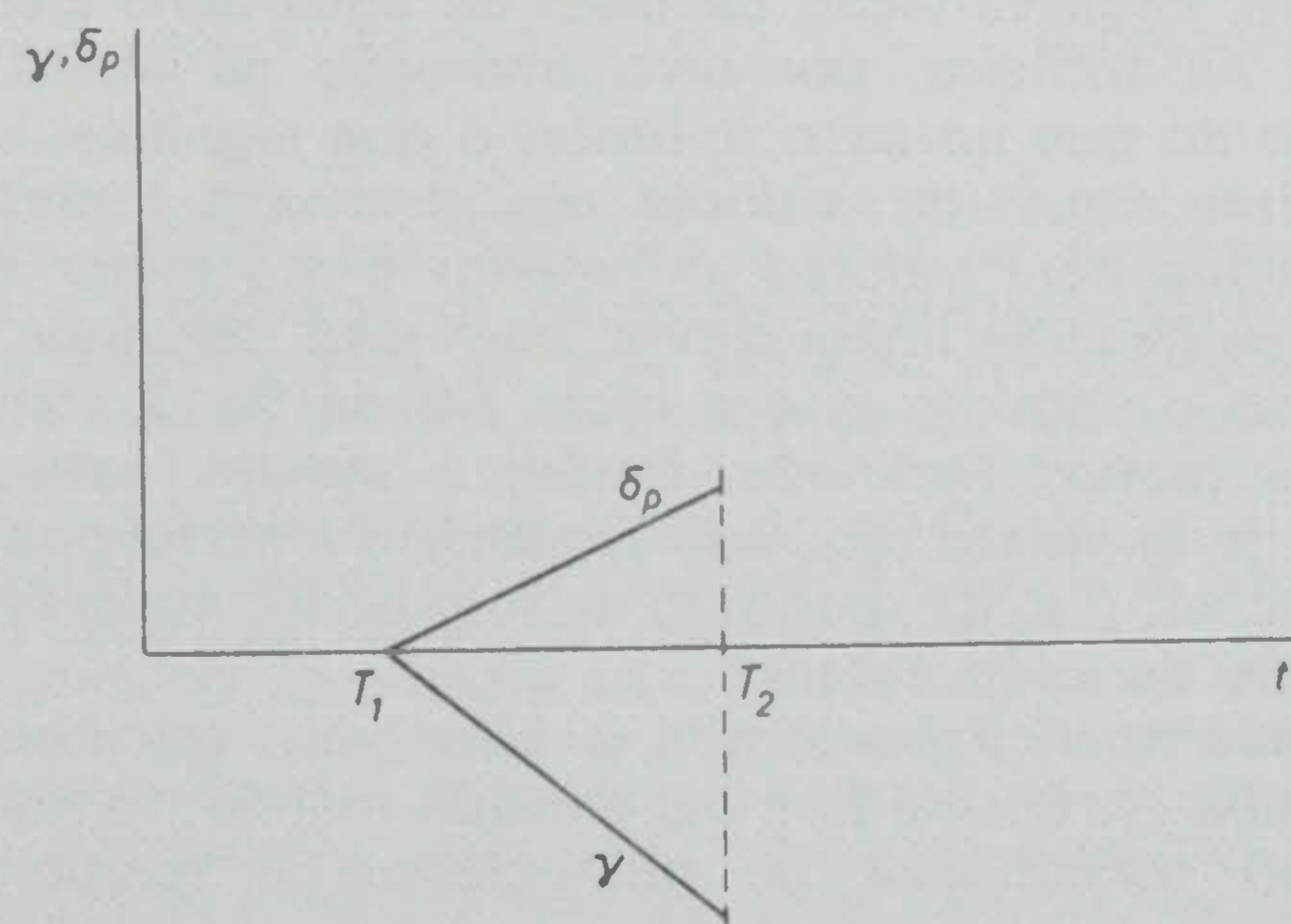
torneira, arrastada pelo movimento de descida da bóia; haverá a cada instante uma correlação proporcionada entre o valor actual do nível de água e a abertura citada ou, se doutro modo o pretendemos, entre o afastamento do valor actual em relação à sua referência (valor prescrito ou valor fixado) e o incremento dado à abertura da torneira em relação ao seu valor primitivo, incremento motivado por aquele afastamento. Temos assim um regulador no qual encontramos uma relação linear entre o incremento dado à grandeza de regulação (abertura de válvula) provocado pelo afastamento da grandeza regulada (nível de água) e esse próprio afastamento.

Esta relação é facilmente traduzível em expressão matemática da forma

$$\delta_p = k_p \gamma,$$

onde γ é o afastamento da grandeza regulada que provoca o incremento δ_p da grandeza de regulação, sendo k_p uma constante que depende simplesmente do género de ligação (eléctrico, pneumático, mecânico, etc.) pelo qual as duas grandezas se encontram, na realização prática do regulador, vinculadas uma à outra. A um regulador deste tipo, ante as suas características, dá-se o nome de *regulador de acção proporcional*, abreviadamente *regulador P*, significando que o incremento δ_p é proporcional ao afastamento γ .

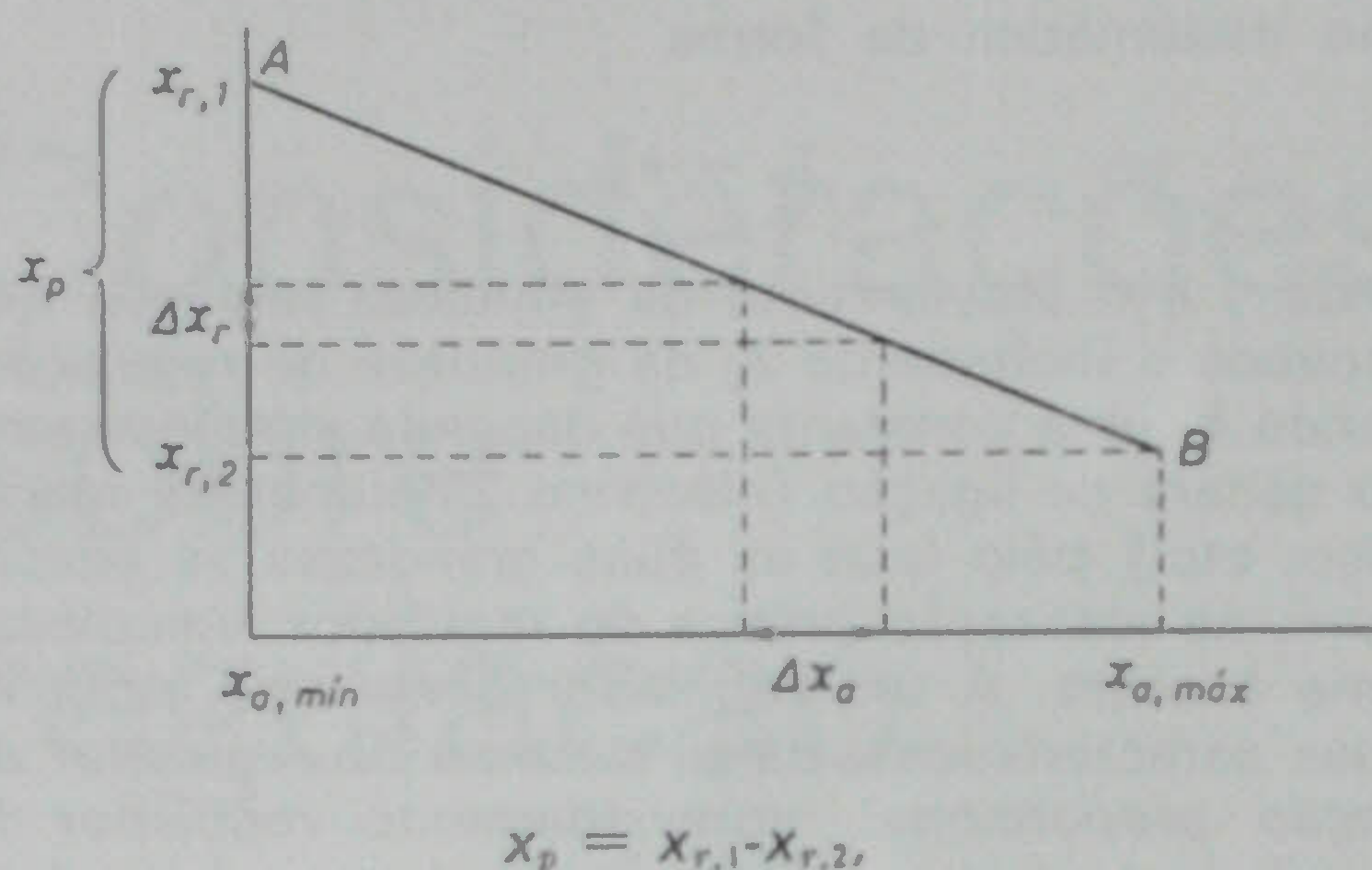
Se, no nosso exemplo, o caudal de saída variar no tempo, será o valor de γ uma função do tempo e igualmente o será o valor de δ_p ; na fig. 1 admitimos, para simplificar, que no intervalo de tempo T ($=T_2-T_1$) a variação de γ foi linear ($\gamma=k_1 t$ ⁽²⁾), isto é, que o nível de água desceu, gráficamente, segundo uma recta; deste modo, o valor de δ_p ($=k_p k_1 t$) terá crescido, durante o mesmo tempo, segundo recta idêntica.



No caso que estamos encarando, diz-nos a nossa sensibilidade de ordem prática que a cada novo nível de água que se atinge (descendo, por exemplo), a bóia vai abrindo a válvula de entrada sòmente o indispensável para ir equilibrando o caudal de saída; logo que este se estabilizar, a bóia

⁽²⁾ Em rigor, em face da figura, deveria escrever-se $\gamma = -k_1 t$; mas para a finalidade da nossa exposição, é indiferente o rigorismo neste caso.

cessará imediatamente a sua descida e estabilizará, igualmente, a abertura da entrada; é evidente que ao mínimo valor desta (que pode mesmo ser o zero) corresponde o máximo valor que o nível pode atingir (com caudal nulo na saída, no limite), e ao máximo que a primeira apresentar, o mínimo valor em que o nível pode sustentar-se dentro dos limites da estabilidade do regulador ⁽³⁾; designemos por $x_{a,min}$ o valor mínimo possível da abertura (grandeza de regulação) e por $x_{a,max}$ o seu máximo valor, e por $x_{r,1}$ o valor máximo do nível (grandeza regulada) correspondente a $x_{a,min}$ e por $x_{r,2}$ o seu valor mínimo correspondente a $x_{a,max}$; chama-se *domínio da correlação de proporção* à diferença (fig. 2).



o que quer dizer que a grandeza de regulação passará de um ao outro dos seus limites quando a grandeza regulada variar de x_p .

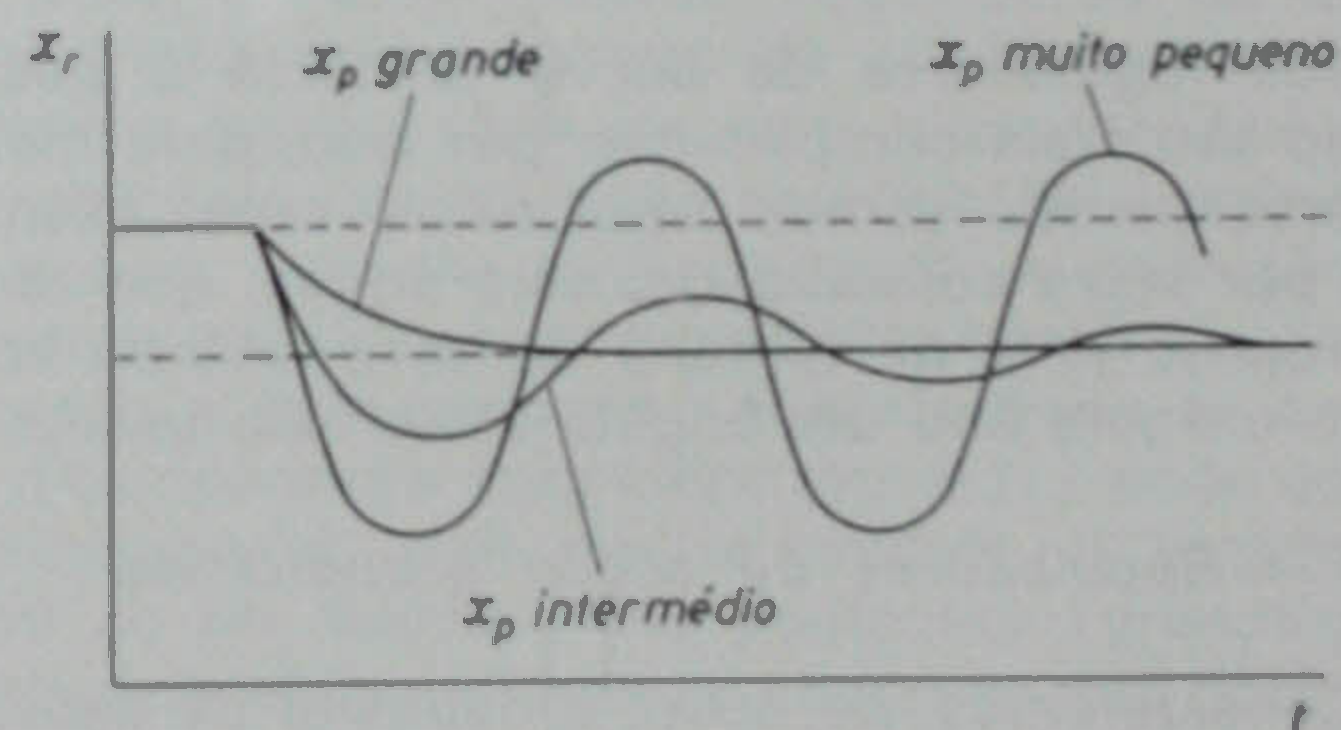
No entanto, em vez de utilizar uma torneira de bóia tão simples quanto a encontramos no mercado, podemos imaginar uma outra na qual a transmissão do movimento da bóia à válvula se faça por meio de um complexo sistema de alavancas, de braços reguláveis à nossa vontade; estamos a pensar naquilo que se poderia até chamar amplificador. Assim, cada variação de nível de água seria traduzida, na torneira, por uma alteração na abertura, maior do que no caso anterior, o que significa, certamente, que os valores $x_{a,min}$ e $x_{a,max}$ seriam atingidos para valores $x_{r,1}$ menor e $x_{r,2}$ maior que os que já atrás imaginámos; com isso, teríamos reduzido o domínio x_p e a recta AB da fig. 2 tornar-se-ia menos inclinada. Então, à mesma variação Δx_r da grandeza regulada passariam a corresponder variações Δx_a da grandeza de regulação, maiores do que as do caso anterior.

A amplificação levada a alto grau, por consequência introduzindo mais elevada inércia no mecanismo transmissor ou aumentando o tempo de resposta da abertura da válvula à movimentação da bóia, pode vir a provocar situações como a seguinte: se a válvula de entrada for do mínimo ao máximo de abertura para variações de nível reduzidas (domínio x_p muito pequeno), qualquer abaixamento desse nível ocasionará enorme caudal de água que excederá, de longe, as necessidades efectivas e o fará crescer, por isso, para além do anterior valor antes que de tal subida, e por via do atraso à transmissão, possa resultar a pretendida acção sobre a abertura para que o caudal de entrada volte a reduzir-se. Mas, eis que, entretanto, o nível excedeu o valor

prescrito e o sinal da bóia vai ser transmitido à válvula para que tal aconteça; nestas condições, o fecho provocado na abertura será quase total, com o que, mantendo o caudal de saída, o nível baixará de novo e irá exceder, para menos, o valor prescrito, recomeçando as condições de onde partimos; o processo repetir-se-á sucessiva e indefinidamente, num regime de instabilidade do valor da grandeza de regulação, periodicamente passando por máximos e mínimos idênticos ⁽⁴⁾. Isso corresponde, na fig. 2, a ter a recta AB quase horizontal.

Esta situação é, talvez, mais sugestiva se tomarmos o exemplo da estufa; além do tempo de resposta do mecanismo transmissor do sinal, há aí que contar com a própria inércia térmica do sistema. Se é diminuto o domínio x_p e há uma baixa, mesmo leve no valor da temperatura, será o cursor levado a um valor exagerado da sua escala de regulação; crescerá muito o valor da corrente e com êle a quantidade de calor cedida à estufa, e, embora o ponteiro do valor actual suba em seguida, acontecerá que, quando atingir o ponto do valor prescrito, donde emitirá a ordem para que o cursor recue, já o sistema recebeu calor suficiente para continuar a temperatura na subida, ainda que o cursor fosse levado ao zero. Efectivamente o que sucede é que este recuará exageradamente e, após um certo tempo, a temperatura baixará além do valor prescrito; ao passar nele, dar-se-á sinal para novo avanço do cursor, demasiado certamente, e tudo volta à primitiva situação, com sucessivos vaivéns deste elemento da regulação.

O valor da grandeza regulada entra, assim, numa espécie de oscilação periódica à volta do valor prescrito; com x_p muito pequeno, a oscilação é indefinidamente de período constante ⁽⁵⁾, mas à medida que crescer x_p , vai-se transformando em oscilação amortecida, acabando por ser aperiódica para grandes valores deste domínio (fig. 3).



Todos os reguladores P dispõem duma escala x_p , com a qual podemos adaptar do melhor modo o domínio da correlação de proporção aos sistemas

⁽³⁾ Se o caudal de saída exceder as possibilidades da entrada, deixará de haver qualquer possibilidade de regulação.

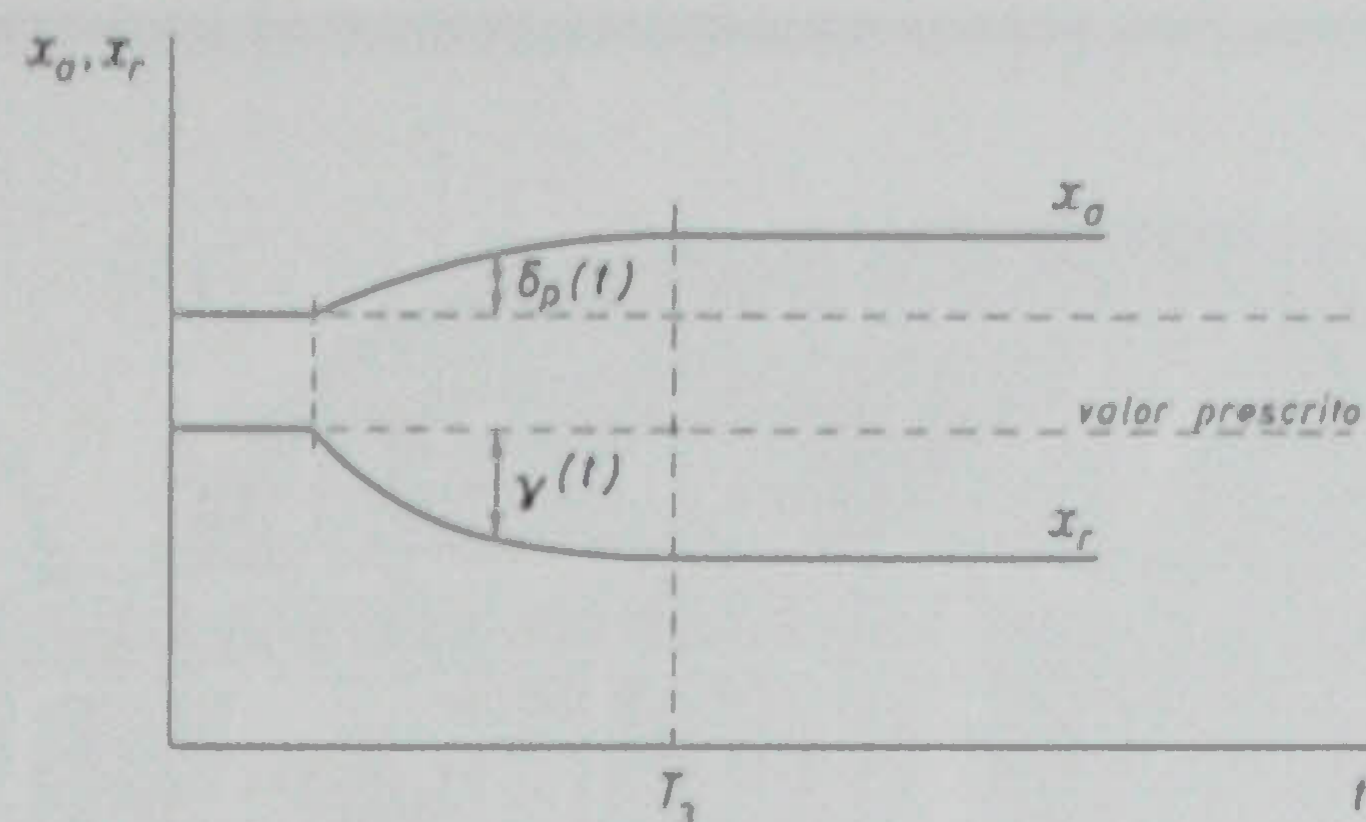
⁽⁴⁾ Nem sempre se atingem os máximos e mínimos das possibilidades da grandeza de regulação; o que é habitual é que o seu valor oscile simetricamente em relação ao valor que seria apropriado para manter no valor prescrito a grandeza regulada.

⁽⁵⁾ O período desta oscilação é um dado de primordial importância para a afinação dos reguladores deste e de outros tipos que referiremos; oportunamente, voltaremos a ele.

em que vão actuar; essa escala pode ser referida a milivolts se o regulador é de género electrónico, ou repartida em percentagem, se ele for mecânico ou pneumático. No primeiro caso, a escala indica directamente a influência do regulador sobre o circuito de regulação, de acordo com o valor da f.e.m. injectada em tal circuito; no segundo, indica, num sistema de medida habitualmente arbitrário, qual a percentagem de x_r , referida à escala total da sua medida, que provoca a passagem de x_a de um ao outro dos seus valores extremos. Em qualquer dos casos, e em consequência daquilo que atrás vimos, valores muito pequenos de x_p conduzem a uma exagerada sensibilidade do regulador (grandes variações de x_a para reduzidas variações de x_r) e, por isso, a instabilidade na regulação; devem ser evitados. Pelo contrário, valores muito elevados conferem aos reguladores falta de resposta pronta e, por isso, desadaptação frequente às condições ideais do sistema a regular, especialmente se as condições de funcionamento são habitualmente muito variáveis; além disso, em certos reguladores, nos quais a reacção se faz por pendulação de um ponteiro indicador, valores elevados de x_p dão origem a grandes amplitudes de oscilação desse ponteiro e, então, a outro tipo de instabilidade, a do próprio equipamento de medida do valor actual da grandeza regulada, com a consequente instabilidade do valor da grandeza de regulação.

Os reguladores deste tipo são todos estáticos; na verdade, se partindo dum estado de equilíbrio dado, o sistema evolue para outro estado de equilíbrio definido por outras condições, a grandeza regulada altera o seu valor e já não volta àquele que apresentava no princípio. Pela própria natureza do seu funcionamento, jamais um regulador P será capaz por si só, de repor esse valor inicial; daí, que sempre tenha de aceitar-se um afastamento permanente todas as vezes que se alteram as condições em que o regime do sistema é considerado, pois que é precisamente o afastamento permanente, que aqui podemos tomar mesmo como a diferença entre os valores prescritos de dois regimes em equilíbrio, que condiciona as novas relações entre as grandezas regulada e de regulação, intimamente ligadas entre si no decorrer do tempo. No caso do depósito, mudando na saída o seu caudal, o nível evolui tomando outro valor, de modo a que a entrada de novo se lhe ajuste; de forma igual na estufa, se as perdas de calor variarem, a temperatura altera-se o necessário para que o cursor procure a justa posição pela qual as calorias fornecidas se adaptem às novas condições; qualquer seja o caso, se a situação final se mantiver, a grandeza regulada (e com ela a de regulação) não mais regressará ao seu valor de início ⁽⁶⁾.

As curvas de evolução das grandezas regulada e de regulação, durante a transição entre regimes



permanentes, traduzem tão perfeitamente o modo de actuar de cada regulador de acção contínua que as características de cada um deles se depreendem num instante se delas se puder dispor; sendo compreensível, obviamente, que seja desejável que a passagem dum regime ao outro se efectue sempre sem oscilações, sem instabilidade, para que se atinjam os valores finais com a maior firmeza, é conveniente que os regimes transitórios sejam sempre aperiódicos e é, por isso, nestas condições que as curvas irão ser apresentadas.

Assim, nos reguladores de tipo P , a curva característica da evolução da grandeza regulada é aquela que, na fig. 3, corresponde ao caso de x_p grande; trata-se de uma curva de desenvolvimento exponencial, à qual podemos associar uma constante de tempo determinada, conforme o valor da qual será mais ou menos rápida a passagem de um ao outro dos valores da grandeza regulada. Na fig. 4 repetimos a curva a que aludimos, na mesma apresentando a curva representativa da correspondente variação da grandeza de regulação que, pelas razões que apresentámos, segue evolução idêntica à da grandeza regulada; a figura é completada com a menção do afastamento γ e do incremento δ_p , que, a partir do instante T_3 , tomam valor constante. Adiante nos interessará reconsiderá-los.

(Continua)

⁽⁶⁾ É importante que não surja aqui uma confusão; todos sabemos que, quer seja o nível do depósito, quer seja a temperatura da tal estufa, serão reconduzidos aos seus valores iniciais se, após alteração das condições em que o sistema funciona, se retornar às do regime primitivo: o depósito, se estava cheio, voltará a encher até ao mesmo nível e a temperatura da estufa, se baixou por nova introdução de peças, outra vez irá até igual valor. Aqui, partimos dum grupo de condições iniciais, alterámo-las e depois repusêmo-las: no primeiro caso, porque retomámos o caudal de saída (nulo, no exemplo), no segundo, porque fechámos a porta da estufa e demos tempo para que aquecesse o que nela introduzimos; quer dizer, impusêmos condições finais iguais às do princípio, razão pela qual voltámos aos valores iniciais da grandeza regulada, sem qualquer afastamento. Outro é, pois, o caso que encarámos ao pôr em confronto as situações de dois regimes diferentes entre si e que justifica a afirmação que deu origem a esta nota.