

Controle de Processos

Aula 06 - Sintonia de controladores PID: Método da integral do erro e método do relé

Apresentação

Na última aula conhecemos dois métodos heurísticos: o método de Cohen e Coon e o método do modelo interno (IMC). Nesta aula, mais dois métodos serão apresentados: o Método da Integral do Erro e o Método do Relé. O primeiro utiliza como critério a soma dos erros ao longo do tempo. Já o segundo tem especial importância na indústria, pois fornece uma metodologia para se obter alguns parâmetros da planta, sem abrir a malha de controle.



Vídeo 01 - Apresentação

Objetivos

Ao final desta aula, os alunos deverão estar aptos a:

1. Conhecer as características funcionais do Método da Integral do Erro e do Método do Relé;
2. Aplicar o método da integral do erro e o método do relé para sintonizar controladores PID industriais.

Avaliação de Malhas de Controle

Na literatura moderna associada a sistemas de controle encontram-se formulações matemáticas para descrever índices de desempenho necessários em aplicações.

Conceito: Define-se índice de desempenho como uma medida quantitativa do desempenho de uma malha, sendo escolhido de modo que a ênfase seja dada às especificações necessárias do processo. Uma malha é considerada uma estrutura de controle ótima quando seus parâmetros são ajustados para que o índice em questão alcance um valor mínimo ou máximo.

Campos e Teixeira (2010) argumentam que, na prática, o desempenho de uma malha de controle, mesmo já sintonizada, é difícil de se manter constante ao longo do tempo e que avaliar as malhas é importante, pois:

- As malhas são ajustadas em uma condição de operação que pode mudar com o tempo.
- Os equipamentos podem mudar suas dinâmicas, em função de desgaste e sujeira.
- O grande número de malhas de controle a serem avaliadas continuamente em um complexo industrial podem ser milhares.

Noção Intuitiva da Integral do Erro

Integrar significa somar, acumular. Antes de falarmos sobre o método da integral do erro, falaremos sobre a integral do erro de uma forma intuitiva. Conforme já vimos, a operação matemática chamada integral é uma operação que, usualmente, não é estudada em cursos de nível médio. No entanto, a ideia intuitiva do que essa operação representa é relativamente simples.

A integral do erro absoluto (módulo da diferença entre o SP e a PV) ao longo do tempo nos dá uma noção da qualidade do controlador. Quanto maior a integral do erro, pior é a malha de controle em questão. A literatura apresenta dois índices de desempenho baseados na integral do erro: o IAE (integral do valor absoluto do erro entre a PV e o SP em um horizonte de tempo/análise) e o ITAE (integral do produto do tempo pelo valor absoluto do erro entre o SP e a PV em um horizonte de tempo/análise). O primeiro índice (IAE) difere do segundo (ITAE), pois, pelo fato deste ser multiplicado pelo tempo, considera mais os erros ao final do horizonte de tempo em questão. O primeiro índice considera os erros igualmente ao longo do horizonte de tempo em questão.

Veja a seguir uma apresentação das noções gerais a respeito dos índices de desempenho utilizados nos métodos de sintonia de controladores.



Vídeo 02 - Índices de Desempenho

Método da Integral do Erro

Este método, assim como os estudados nas aulas anteriores, também considera que a dinâmica do processo pode ser representada por um modelo de 1ª ordem com ganho K , constante de tempo τ (tau) e tempo morto θ (teta). Em Lopez et al. (1967), é descrito um método que minimiza os índices (IAE ou ITAE) para um problema do tipo regulador (perturbação de carga). Foram considerados sistemas com fator de incontabilidade entre 0 e 1. Como resultado do trabalho, foram obtidas as seguintes equações para sintonia dos controladores:

$$K_p = \frac{1}{k} * (A * (\frac{\theta}{\tau})^B)$$

$$T_i = \frac{\tau}{(C * (\frac{\theta}{\tau})^D)}$$

$$T_d = \tau * (E * (\frac{\theta}{\tau})^F)$$

As constantes A, B, C, D, E e F, para o caso **regulador**, são obtidas de acordo com o controlador desejado e com o critério que deve ser minimizado. A Tabela 1 apresenta essas constantes para o caso regulador.

Controlador	Critério	A	B	C	D	E	F
PI	IAE	0.984	-0.986	0.608	-0.707	-	-
PI	ITAE	0.859	-0.977	0.674	-0.680	-	-
PID	IAE	1.435	-0.921	0.878	-0.749	0.482	1.137
PID	ITAE	1.357	-0.947	0.842	-0.738	0.381	0.995

Tabela 1 - Tabela de constantes para sintonia do PID pelo método da integral do erro (caso regulador).

Fonte: Campos e Teixeira (2010).

Clique a seguir e assista a uma introdução complementar da abordagem do método da integral do erro.



Vídeo 03 - Método da Integral do Erro

Em Rovira et al. (1969), é descrito um método que minimiza o IAE e o ITAE para um problema do tipo **servo** (perturbação no *setpoint* - mudança na referência do sistema). As equações para o caso **servo** são mostradas a seguir.

$$K_p = \frac{1}{K} * (A * (\frac{\theta}{\tau})^B)$$

$$T_i = \frac{\tau}{(C + D * (\frac{\theta}{\tau}))}$$

$$T_d = \tau * (E * (\frac{\theta}{\tau})^F)$$

As constantes A, B, C, D, E e F, para o caso servo, são obtidas de acordo com o controlador desejado e com o critério que deve ser minimizado. A Tabela 2 apresenta essas constantes para o caso servo.

Controlador	Critério	A	B	C	D	E	F
PI	IAE	0.758	0.861	1.02	-0.323	-	-
PI	ITAE	0.586	-0.916	1.03	-0.165	-	-
PID	IAE	1.086	-0.869	0.740	-0.130	0.348	0.914
PID	ITAE	0.965	-0.850	0.796	-0.147	0.308	0.929

Tabela 2 - Tabela de constantes para sintonia do PID pelo método da integral do erro (caso servo).

Fonte: Campos e Teixeira (2010).

Seja um processo com a seguinte dinâmica: ganho estático (K) igual a 1, constante de tempo (τ) igual a 2 e tempo morto (θ) igual a 1. Considere um controlador PI, então a sintonia ótima para um degrau na perturbação de carga obtida pela Tabela 1 será (Critério ITAE):

$$K_p = \frac{1}{K} * (A * \frac{\theta^B}{\tau}) = \frac{1}{1} * (0.859 * \frac{1^{-0.977}}{2}) = 1.6908$$

e

$$T_i = \frac{\tau}{(C * (\frac{\theta}{\tau})^D)} = \frac{2}{(0.674 * (\frac{1}{2})^{-0.68})} = 1.8521$$

A sintonia ótima deste PI para um degrau no *setpoint* obtida pela Tabela 2 será (Critério ITAE):

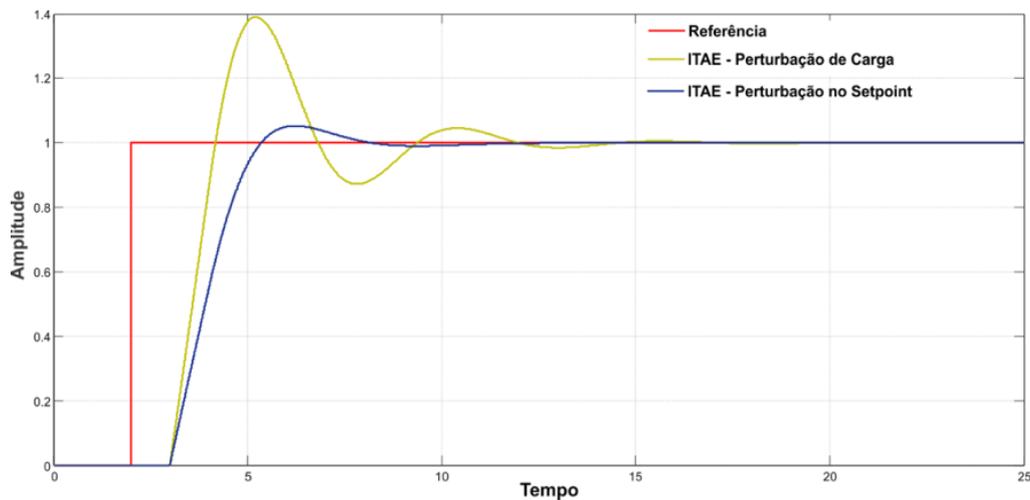
$$K_p = \frac{1}{K} * (A * (\frac{\theta}{\tau})^B) = \frac{1}{1} * (0.586 * (\frac{1}{2})^{-0.916}) = 1.1057$$

e

$$T_i = \frac{\tau}{(C + D * (\frac{\theta}{\tau}))} = \frac{2}{(1.03 + (-0.165) * (\frac{1}{2}))} = 2.1108$$

Nota-se, assim, que o cálculo dos parâmetros do controlador pela Tabela 2 é mais suave (mais robusta), pois dá origem a ganhos proporcionais menores e tempos integrais maiores. A Figura 1 mostra o desempenho dessas duas sintonias para um degrau no *setpoint* (os controladores foram sintonizados pelas Tabelas 1 e 2, logo após aplicado um degrau no *setpoint*).

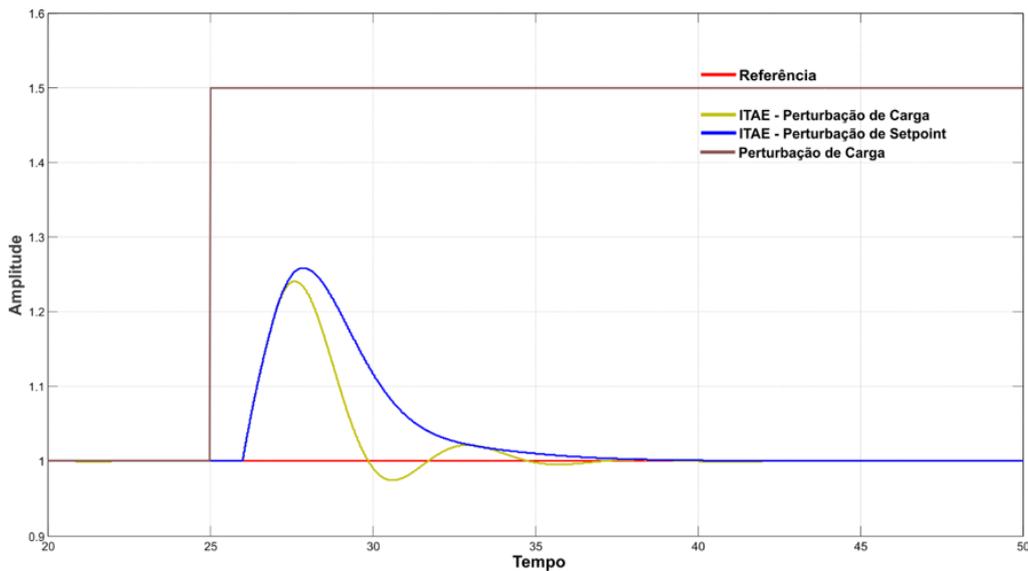
Figura 01 - Respostas do processo com o controlador PI. Comparação entre as sintonias propostas nas Tabelas 1 e 2 para um degrau no *setpoint*.



Como era de se esperar, o PI ajustado pela Tabela 2 apresentou o melhor desempenho.

A Figura 2 mostra o desempenho dessas duas sintonias para um degrau na perturbação de carga (os controladores foram sintonizados pelas Tabelas 1 e 2, logo após aplicada uma perturbação na carga).

Figura 02 - Respostas do processo com o controlador PI. Comparação entre as sintonias propostas nas Tabelas 1 e 2 para uma perturbação de carga.



Como era de se esperar, o PI ajustado pela Tabela 1 apresentou o melhor desempenho.

Nota: Na prática, na maioria dos casos deve-se buscar uma sintonia mais robusta para as malhas de controle, portanto aquelas obtidas para um degrau no setpoint (Tabela 2) costumam ser mais indicadas de modo geral.

A vantagem do método da integral do erro é que considera toda a curva de resposta do sistema, em vez de somente dois pontos, como é o caso do método do decaimento.

Sintonia Automática de Controladores - Método do Relé

Por sintonia automática (*Auto-tuning*) entende-se o procedimento em que os parâmetros do controlador são calculados automaticamente, através da introdução de um comando (solicitação) por um operador (*on-demand*). Tipicamente, o

operador pressiona um botão ou envia um comando ao controlador para ativar a função *auto-tuning*. A metodologia de sintonia automática envolve os seguintes passos (método direto):

1. Ativação do modo *auto-tuning*.
2. Geração de um distúrbio no processo.
3. Avaliação da resposta ao distúrbio.
4. Cálculo dos parâmetros do controlador.
5. Atualização dos parâmetros do controlador.

Esta seria basicamente, a mesma metodologia executada (por alguém com experiência) para sintonizar um controlador manualmente (exceto a ativação do *auto-tuning*). O processo precisa ser perturbado de alguma forma de modo a se determinar sua dinâmica. Por exemplo, pode-se perturbar o processo injetando-se degraus em sua entrada. A avaliação da resposta à perturbação pode incluir a determinação de um modelo para o processo ou uma simples caracterização da resposta.

A abordagem de sintonia automática pode ser dividida em duas categorias - abordagens baseadas em modelo e abordagens baseadas em regras. Nas abordagens baseadas em modelo, um modelo do processo é obtido explicitamente e a sintonia é baseada nesse modelo. Nas abordagens baseadas em regras, nenhum modelo do processo é obtido. A sintonia é baseada em regras similares às usadas pelos operadores para sintonizar controladores manualmente (ALVES, 2010).

O controlador de grande uso na indústria é o PID e a maioria dos controladores PID comerciais apresentam a característica *auto-tuning*. Experiência industrial com reguladores PID tem claramente indicado que a sintonia automática é altamente desejável na medida em que diminui o tempo de condicionamento da malha (sintonia). Essa ferramenta pode ser aplicada em controladores digitais ou em sistemas distribuídos para controle de processos (DCS - *Distributed Control System*).

A sintonia automática pode também ser executada por dispositivos externos que são conectados ao processo. Esses dispositivos devem conter as informações sobre o controlador para que possam sugerir os valores apropriados para os

parâmetros (ALVES, 2010). Essas informações devem incluir, por exemplo, a estrutura do controlador e unidades do controlador (ganho ou banda proporcional, minutos ou segundos, tempo ou repetições por tempo etc.).

O ajuste automático de controladores possui algumas vantagens frente à sintonia manual, que são elas:

- Tempo reduzido de estimação de parâmetros.
- Custo favorável de implementação.
- Conhecimento aprofundado de controle não é necessário.
- Aplicável à maioria dos sistemas de controle presentes na indústria.

Porém, a sintonia manual possui uma importante vantagem frente à automática, pois através dela é possível obter excelentes resultados, graças à capacidade humana de análise. No entanto, a formação de um especialista em controle é demorada, e diferentes especialistas podem chegar a diferentes conjuntos de parâmetros para um mesmo sistema. Além disso, o tempo para efetuar uma sintonia manualmente pode ser bastante longo, já que é necessário esperar e analisar a resposta do sistema (NEVES, 2009).

Descrição do Método de Realimentação a Relé

Os dois métodos de sintonia de controladores PID, apresentados por Ziegler e Nichols (1942), foram muito utilizados em aplicações industriais devido à sua forma simples de utilização. Contudo, existem casos nos quais o seu emprego não é adequado. O primeiro método apresenta restrições consideráveis, pois exige que a planta seja estável em malha aberta. Dessa forma, em plantas com comportamento integrativo (ou seja, plantas que quando excitadas por entradas de testes apresentam respostas que crescem indefinidamente, sem estabilizar) não é possível aplicar essa metodologia. Esse método também exige que o sistema tenha comportamento dominante, via de regra, de 1ª ordem.

O segundo método exige que a planta alcance o limite de estabilidade em malha fechada, a fim de se obter o ponto crítico. Neste ponto, a resposta do processo exhibe oscilações quando submetida a um controle proporcional - não apresentando controle sobre a amplitude da oscilação na saída do processo. Em muitas aplicações

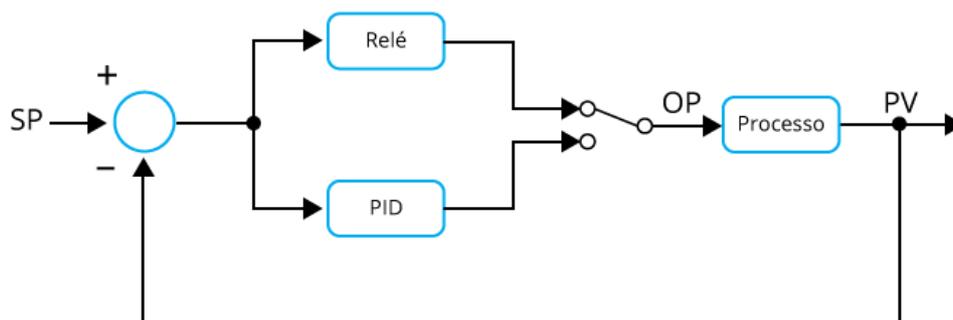
práticas a dinâmica oscilatória é contestável. Ainda pode requerer tempo se várias tentativas são necessárias ou se o processo tem dinâmica lenta (um longo teste experimental pode resultar na redução de produção e na baixa qualidade do produto).

As limitações dos métodos de Ziegler e Nichols levaram Åström e Hägglund (1984) a proporem a utilização de um relé na realimentação do sistema a ser sintonizado, o que deu origem ao “método do relé para ajuste de PID”. Eles desenvolveram essa técnica atrativa e alternativa para reproduzir, aplicar e automatizar o método da curva de oscilação de Ziegler-Nichols. No teste auto-tuning via relé um simples ensaio experimental é utilizado para estimar K_u e P_u .

Nota: O relé consiste em uma perturbação que tem como objetivo provocar oscilação sustentada no processo, a fim de determinar o ganho crítico (K_u) e o período crítico (P_u).

O diagrama de blocos do método é mostrado na Figura 3. Existe um Switch (chave/interruptor) que seleciona entre a realimentação do relé ou do controlador PID.

Figura 03 - Dispositivo de sintonia automática - Metodologia do Relé.



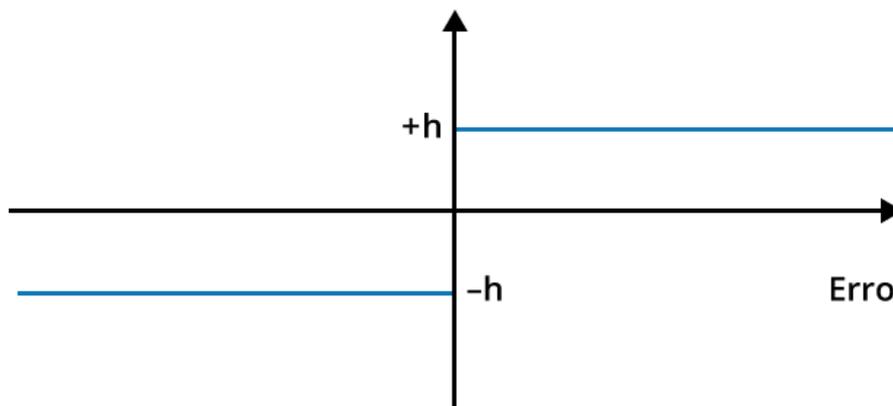
Fonte: Adaptado de Dantas et al. (2011).

Quando se deseja sintonizar o controlador do processo, a função PID é desligada e o sistema conectado ao relé. A resposta do sistema começa a oscilar. O período e a amplitude da oscilação são determinados quando obtida uma oscilação em regime permanente. Estes fornecem K_u e P_u . Os parâmetros do controlador

podem, então, ser determinados a partir desses valores, por exemplo, pelo método de oscilação de Ziegler-Nichols. Deste modo, o controlador PID novamente é conectado (automaticamente) e o controle executado de acordo com a nova sintonia do controlador.

Um relé é um elemento com comportamento estático que, no entanto, pode causar oscilações em um sistema dinâmico. O sinal de saída do relé depende do sinal de entrada (erro), de acordo com o gráfico mostrado na Figura 4 para um relé ideal.

Figura 04 - Comportamento de um relé ideal em função do erro.



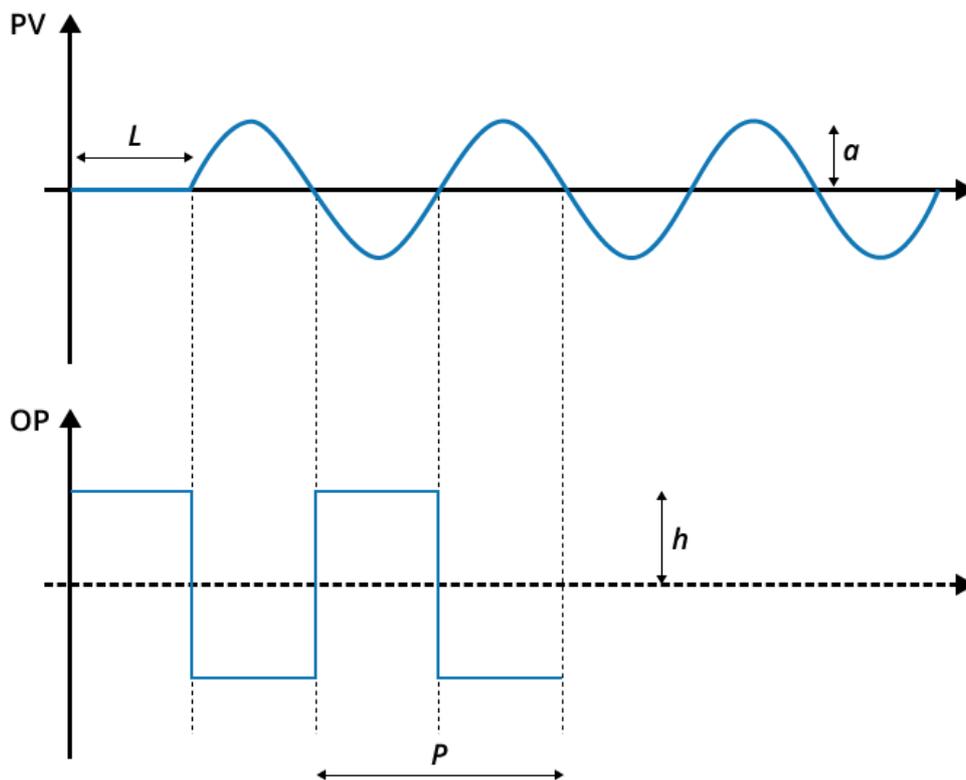
Pela Figura 4, a saída do relé é uma constante positiva ou uma constante negativa (em alguns casos, não necessariamente positiva e negativa). O único parâmetro que deve ser especificado é a amplitude do relé h (entrada para o processo que deve ser escolhida de forma a limitar as oscilações na PV). Uma malha para a medida da oscilação do relé pode ser adicionada de modo a garantir que a saída permaneça dentro de limites razoáveis. Neste método as escalas de tempo do processo não precisam ser conhecidas antecipadamente, já que o período crítico é determinado de maneira automática.

De maneira mais formal, a comutação do relé ideal (clássico) é regida pela seguinte regra [$\text{erro}(t) = SP - PV$]:

- Se [$\text{erro}(t) \geq 0$], então *saída do relé* = $+h$
- Se [$\text{erro}(t) < 0$], então *saída do relé* = $-h$

A maioria dos processos encontrados na indústria, quando em malha fechada com o relé mostrado na Figura 3, irão oscilar com período P e amplitude a . Considerando-se que as condições para o sistema oscilar tenham sido atingidas, como na Figura 5, o sinal de saída (PV) terá oscilações com período (P) e amplitudes constantes (a) após o ciclo inicial e a entrada (OP) do processo será uma onda quadrada (originada pelo relé).

Figura 05 - Resultado de um processo com realimentação a relé, mostrando a saída do relé (OP) e a saída do processo (PV).



Fonte: http://automatica.ing.unibs.it/mco/tco/3_pid/rele.html Acesso em: 28 jan. 2016.

Essa oscilação usualmente é pequena e controlada (oscilação limitada e controlada na PV é um dos benefícios do método do relé). Assim, o método proposto estima o valor do ganho último e do período último (que será aproximadamente igual a P) conforme as equações abaixo.

$$K_u = \frac{4 * h}{\pi * a}$$

$$P_u \approx P$$

Em que π (Pi)=3.1416.

Com as estimativas do ganho último e do período último, utiliza-se o método da oscilação de Ziegler-Nichols para sintonia. Ao aplicar o método do relé, uma das etapas da metodologia consiste em escolher um valor de h adequado a fim de não fazer o sistema operar fora da sua faixa.

Nota: O método do relé funciona direcionando a variável de processo para uma série de oscilações através da modificação na variável que está sendo manipulada (neste caso OP). A amplitude de oscilação “ a ” é proporcional à saída do relé “ h ”. Assim, é fácil controlar a amplitude das oscilações na saída do processo através do ajuste da amplitude h da saída do relé.

Segundo Campos e Teixeira (2010), é possível utilizar o PID do sistema de controle para fazer o ensaio do relé: limita-se a saída do PID em $\pm h$ em torno do ponto de operação, aumenta-se o ganho proporcional ao máximo e elimina-se o termo integral e derivativo.

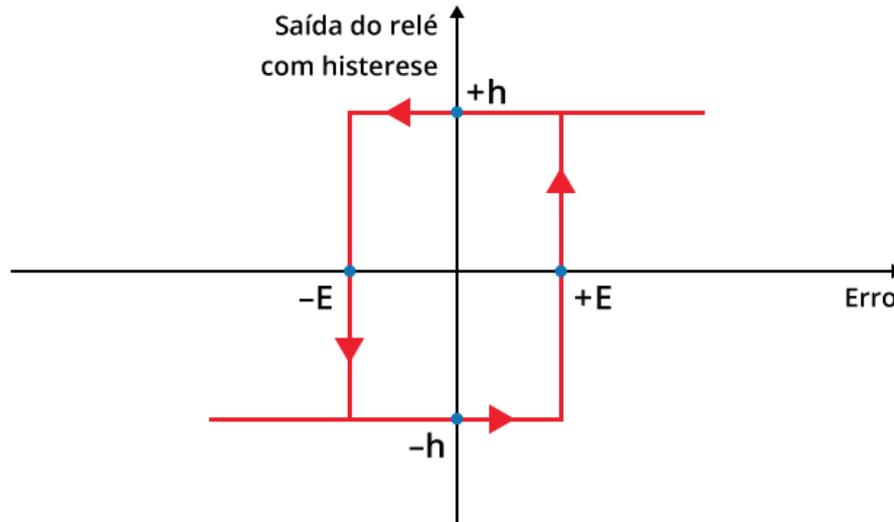
Vamos clicar e assistir a uma aula que busca ressaltar os mais relevantes aspectos teóricos necessários para a compreensão do método do relé.



Vídeo 04 - Método do Relé

Algumas vezes uma histerese é utilizada para evitar o chaveamento frequente e indevido causado por ruído nas medidas da planta. Pois a forma original do relé (Figura 4) é bastante sensível a ruídos de medição e uma pequena quantidade de ruído pode fazer com que o relé dispare de forma aleatória. Esse tipo de estratégia possui uma banda morta ao redor do valor de referência (ver Figura 6), logo, com a histerese existirá um parâmetro adicional a ser especificado [ϵ (épsilon) - maior do que o nível do ruído]. Este, entretanto, poderá ser ajustado automaticamente, desde que o nível de ruído possa ser determinado.

Figura 06 - Comportamento de um relé com histerese em função do erro.



Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hysteresis>. Acesso em: 28 jan. 2016.

Note a partir da Figura 6, que só ocorrerá o chaveamento do relé (entre +h e -h) quando o sinal de erro cruzar os patamares de referência $-\varepsilon$ e referência $+\varepsilon$. Isto é, a comutação do relé apenas se realiza quando a variável de processo (PV), se afastar uma quantidade ε do *setpoint* (SP).

Segundo Alves (2010), caso seja possível medir o nível de ruído, a histerese (ε) deverá ser o dobro da amplitude máxima do ruído.

A inserção da histerese no relé altera a fórmula de cálculo do ganho crítico. Já a determinação do período crítico é feita da mesma forma descrita para o relé clássico. Se o relé é implementado com histerese (ε é a largura da histerese), então utiliza-se:

$$K_u = \frac{4 * h}{\pi * \sqrt{a^2 - \varepsilon^2}}$$

O método de sintonia via relé (*auto-tuning*) tem várias importantes vantagens se comparado com o método da oscilação de Ziegler-Nichols:

1. Somente um teste experimental é necessário em vez do procedimento tentativa e erro.
2. A amplitude da saída do processo (a) pode ser calibrada pelo ajuste da amplitude do relé (h).

3. O processo não é forçado ao limite da estabilidade.
4. O teste experimental pode ser codificado em CLP ou outro dispositivo digital e está automatizado em produtos comerciais.
5. Por se tratar de um método com realimentação, a variável de processo é mantida perto do valor de referência (ponto de operação).
6. Adequa-se a diferentes processos industriais.
7. Aplicação não requer o conhecimento aprofundado do modelo do sistema.
8. Baixa sensibilidade a perturbações, por ser implementado em malha fechada.

A técnica de sintonia utilizando o método do relé realimentado pode apresentar limitações importantes:

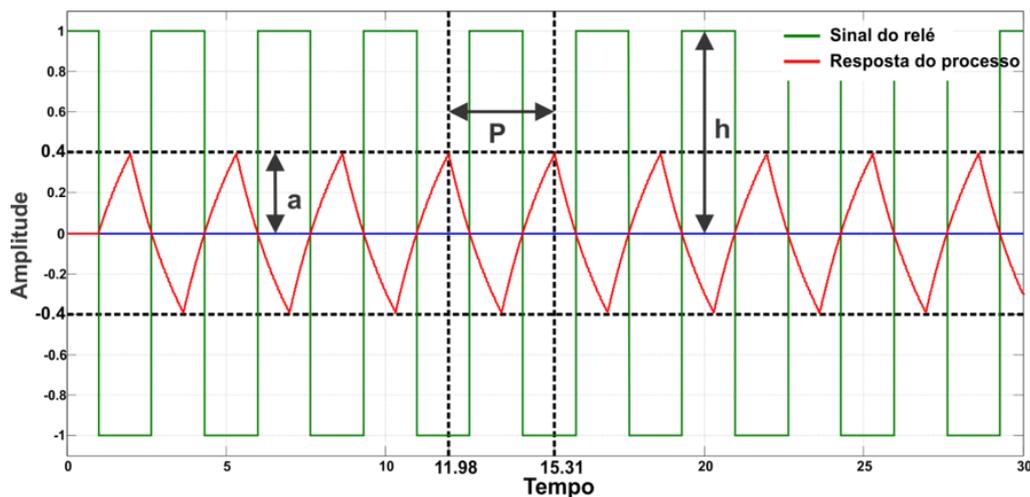
1. Os parâmetros ganho e período crítico são aproximações que podem comprometer o desempenho do controlador sintonizado.
2. Erros significativos podem ocorrer com grande atraso de transporte (tempo morto) no sistema.
3. A sensibilidade do método na presença de ruído para o relé ideal.
4. Não pode ser aplicado a plantas instáveis.

Nota: A implementação da sintonia automática em controladores pode ser realizada através da programação de diversos dispositivos usados na indústria. Pode-se programar um controlador, ou um computador interligado a uma placa de aquisição de dados, que execute os algoritmos para o chaveamento, a lógica do relé e os cálculos para a determinação dos parâmetros do processo.

Como demonstração da sintonia dos controladores pelo método do relé, considere o mesmo sistema discutido anteriormente no método da integral do erro. Isto é, um processo com dinâmica de primeira ordem com atraso, sendo $K=1$, $\tau=2$ e $\theta=1$. De um modo geral, embora conheçamos a dinâmica do processo, não é necessário o profundo conhecimento deste, normalmente, apenas a informação do ganho estático é suficiente para a aplicação do método. A Figura 7 apresenta o

resultado dessa realimentação a relé (com relé ideal), mostrando a saída do relé ($h=\pm 1$) e a saída do processo. Para efeitos de análise, foi aplicado um *setpoint* identicamente nulo ($SP = 0$). As oscilações causadas na saída do processo com a aplicação de um SP nulo se dão pela própria constituição da lógica do relé (no instante em que se aplica a referência igual a zero, o erro é nulo e a saída do relé é igual a 1).

Figura 07 - Resultado de um processo com realimentação a relé, mostrando a saída do relé (OP) e a saída do processo (PV).



As oscilações positivas e negativas podem significar, por exemplo, temperaturas positivas e negativas.

Atividade 01

1. Analisar o porquê da resposta do sistema da Figura 7 oscilar com uma referência identicamente nula.

Olhar o modelo formal do chaveamento do relé ideal e levar em consideração o tempo morto do processo.



Pela Figura 7, podemos então calcular o ganho crítico e o período crítico como segue:

$$K_u = \frac{4 * h}{\pi * a} = \frac{4 * 1}{3.1416 * 0.4} = 3.1831$$

e

$$P_u \approx P = 15.31 - 11.98 = 3.33$$

Usando a Tabela de parâmetros para o 2ª método de Ziegler-Nichols (método da oscilação) e considerando um controlador PI, temos:

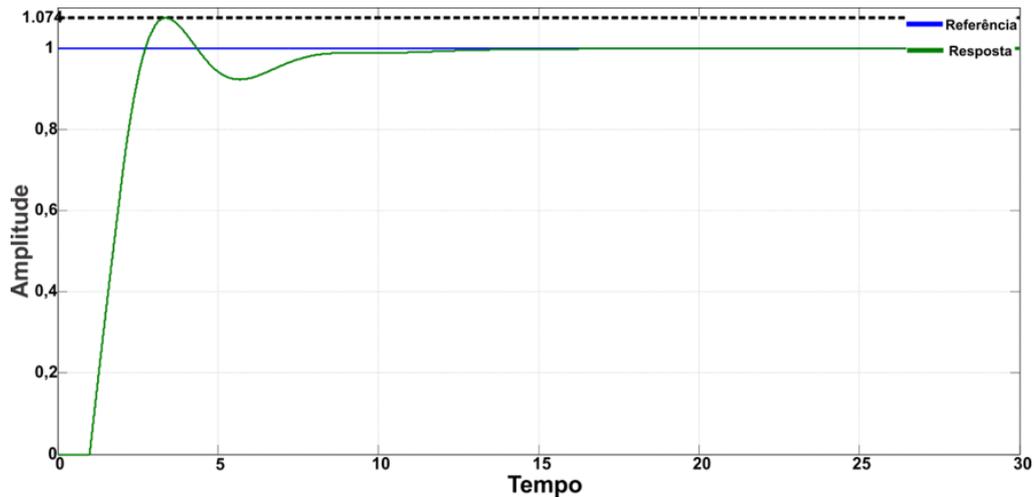
$$K_p = 0.45 * K_u = 0.45 * 3.1831 = 1.14324$$

e

$$T_i = \frac{P_u}{1.2} = \frac{3.33}{1.2} = 2.7750$$

A Figura 8 mostra o desempenho dessa sintonia para um degrau no setpoint.

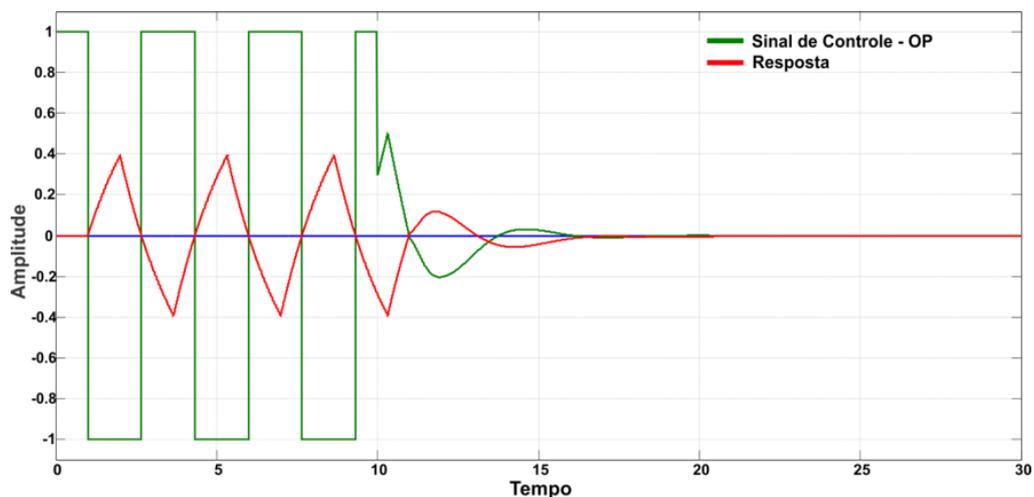
Figura 08 - Resposta do processo com o controlador PI sintonizado pelo método do relé.



Embora estejamos fazendo os cálculos dos ganhos críticos e dos parâmetros do PI manualmente, vale lembrar que eles são todos feitos internamente no controlador (em um CLP, por exemplo), sendo que o usuário só precisa acionar o modo auto-tuning. Daí, tanto o chaveamento do sistema para a realimentação a relé, como o chaveamento para o controlador após os parâmetros terem sido calculados, ocorrem de forma automática.

Na Figura 9, temos uma representação da forma da resposta de um sistema que chaveia para a realimentação a relé com o objetivo de calcular os parâmetros do controlador e novamente chaveia para o controlador quando atingido tal objetivo. Note que, no tempo de aproximadamente 10 unidades, o sistema chaveia para o controlador.

Figura 09 - Resposta do sistema mostrando as formas de onda durante e após o cálculo dos parâmetros do controlador pelo método do relé.



Atividade 02

1. Um determinado sistema, ao ser submetido ao método do relé, com $h = 1$, oscilou com período de 30 segundos com amplitude 2. Obtenha uma sintonia para um controlador PI, para esse sistema, através do método da oscilação de Ziegler-Nichols.

Resumo

Nesta aula foram apresentados o método da Integral do Erro e o método do relé. Os dois métodos têm bastante aceitação em meio industrial. O método do relé, em especial, tem bastante aceitação na indústria, visto que produz oscilações controladas de modo a estimar o ganho último e o período último. É importante ressaltar que, sempre que se utilizam métodos como esses, é preciso interferir na planta, o que deve ser feito com planejamento e cautela.

Apesar de existirem vários métodos de sintonia, nem sempre um comportamento inadequado de uma malha de controle pode ser corrigido através da sintonia do controlador. É importante conhecer as razões de tal comportamento. Por exemplo, sensores e atuadores podem estar mal localizados e montados de forma inadequada, ou podem ter má dinâmica.

Autoavaliação

1. Considere um sistema de 1ª ordem, atraso com ganho estático 2.5, constante de tempo 3 minutos e tempo morto de 30 segundos. Encontre a sintonia de um controle PI e um PID para esse sistema, tanto considerando o critério IAE como o critério ITAE.
2. Um determinado sistema, ao ser submetido ao método do relé, com $h = 3$, oscilou com período de 60 segundos e com amplitude 3. Obtenha uma sintonia para um controlador PI para esse sistema através do método de Ziegler-Nichols.

Referências

ALVES, José Luiz Loureiro. **Instrumentação, controle e automação de processos**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. Automatic tuning of simple regulators with specification on phase and amplitude margins. **Automatica**, [S.l.], v. 20, n. 5, p. 645-651, set. 1984.

CAMPOS, Mario Cesar M. Massa de; TEIXEIRA, Herbert C. G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

DANTAS, A. O. A. et al. Desenvolvimento de um sistema supervisório para planta didática de vazão com controle PID sintonizado utilizando o método do relé. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 6., 2011. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Associação Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 2011. p. 1-8.

LOPEZ, A. M. et. al. Tuning controllers with error-integral criteria. **Instrumentation technology**, [S.l.], v. 14, p. 57-62, nov. 1967.

ROVIRA, A. A.; MURIL, P. W.; SMITH, C. L. Tuning controllers for set-point changes. **Instruments and control systems**, [S.l.], dez. 1969.

SOUZA NEVES, M. G. D. **Auto-tuning de controladores PID pelo método relay**. 2009. Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Universidade Técnica de Lisboa.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum Settings for Automatic Control Circuits. **Transactions ASME**, v. 64, p. 759-768, nov. 1942.