

# Controle de Processos

## Aula 04 - Sintonia de controladores PID: Métodos de Z-N e CHR

# Apresentação

---

O Projeto de um controlador é a criação de um sistema que, ao ser solicitado por excitações conhecidas, apresenta respostas especificadas (desejadas). O projeto não é único, podendo haver vários projetos apresentando desempenho satisfatório. Ajustar (sintonizar) controladores PID não é uma tarefa trivial. Existem várias pesquisas que demonstram diversos métodos para atingir esse objetivo. Cada método é proposto de acordo com o tipo de sistema que se deseja controlar. Esta aula apresentará os métodos de Z-N (Ziegler-Nichols) e o método CHR.

Veremos agora uma introdução da nossa aula sobre os métodos de Z-N e CHR.



**Vídeo 01** - Apresentação

## Objetivos

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

- Entender quais critérios otimizam controladores PID;
- Aplicar os métodos de Ziegler-Nichols e CHR em problemas de sintonia de controladores PID industriais;
- Identificar, para cada tipo de problema, qual método estudado é o mais apropriado.

# Otimização de Controladores PID

---

As condições de controle de um sistema PID podem ser estudadas utilizando algoritmos de controle integrais e diferenciais, porém, eles são muito complicados, nem sempre estão disponíveis e demandam um tempo muito grande de análise, portanto, são pouco utilizados na prática.

Existem métodos mais simples de regulação de um controlador, principalmente utilizando gráficos de resposta de variáveis do processo.

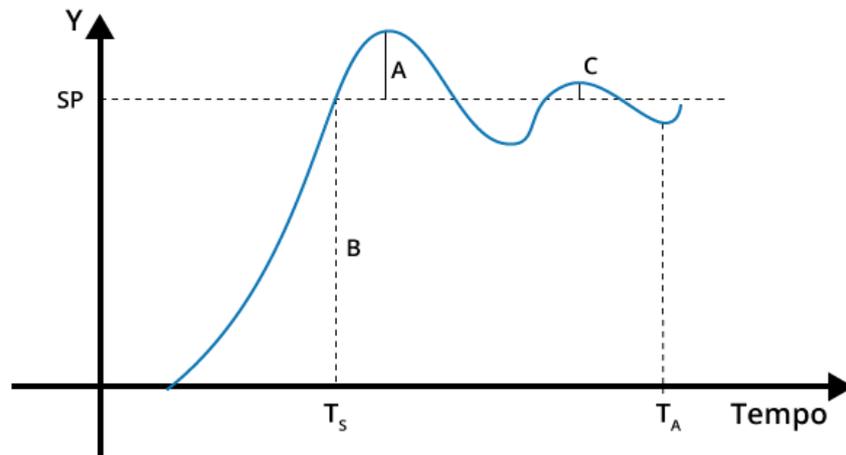
Antes de falar sobre os métodos de sintonia, é preciso ter em mente que toda metodologia encontrada nas pesquisas leva em conta critérios de desempenho que se deseja obter. Toda malha de controle deve, independentemente de qualquer critério adicional, ser estável. A estabilidade é o primeiro critério de desempenho a ser observado. Outros critérios podem dizer respeito ao tempo de estabilização da malha, ao máximo sobressinal, entre outros.

## Critérios de Sintonia de Controladores PID

---

Existem diversos critérios para se definir um desempenho desejável para uma malha de controle e a consequente escolha dos parâmetros do controlador. O teste tradicional de sinal de entrada, no domínio do tempo, é uma variação em forma de degrau no set point. A partir desse teste é possível identificar algumas características na resposta ao degrau, como sobrepasso  $A$  (overshoot) ou a razão de decaimento  $C/A$ , que aparecem na Figura 1.

**Figura 01** - Resposta dinâmica de uma malha de controle (Resposta em malha fechada).



**Fonte:** Adaptado de Campos e Teixeira (2010).

A partir de um teste de resposta ao degrau pode-se, então, definir critérios de desempenho a serem atingidos pela malha de controle. Pode-se definir como critério (ver Figura 1): menor sobressinal (menor relação de  $A/B$  possível); menor tempo de subida ( $T_s$ ) possível; razão de declínio ( $C/A$ ) igual a certo valor; o menor tempo de assentamento/estabilização possível ( $T_A$ ); entre outros. Em seguida, mostraremos métodos que tendem a garantir alguns critérios de desempenho. Para se aplicar esses métodos é preciso aplicar sinais de teste na planta. Aplicar sinais em plantas industriais muitas vezes requer análise e planejamento para que esses sinais não venham interferir de forma significativa a operação do processo.

Vamos assistir sobre as noções gerais a respeito do procedimento de sintonia de controladores.



**Vídeo 02** - Noções Gerais sobre Sintonia de Controladores

# Ajuste (sintonia) dos Parâmetros do Controlador PID pelos Métodos de Ziegler-Nichols

Os métodos de ajuste de controladores mais conhecidos e que são utilizados até hoje, foram desenvolvidos em 1942 por J.G. Ziegler e N.B. Nichols, quando trabalhavam na empresa americana *Taylor Instrument Company*, da cidade de *Rochester*, Nova Iorque. Esses métodos, apesar de serem os mais antigos, ainda são muito utilizados por instrumentistas e profissionais da área de controle de processos.

Os métodos de Ziegler-Nichols são pioneiros na literatura no sentido de proporem uma sintonia heurística (empírica/experimental) para controladores PID. São dois métodos que são empregados de acordo com o tipo de planta.

**Critério dos Métodos:** a resposta do sistema em malha fechada é considerada satisfatória se apresenta uma taxa de decaimento de pelo menos 1/4 por período (É o intervalo de tempo necessário para que ocorra uma oscilação completa ou ciclo. A unidade (SI) do período é o segundo (s). Alternativamente, é o menor intervalo de tempo para uma curva repetir-se com as mesmas características (exemplo, funções seno e cosseno).) (relação de C/A na Figura 1 igual a 1/4).

Os métodos procuram satisfazer o critério acima na maioria das situações práticas. O modelo do controlador PID é o paralelo clássico. Com os métodos pretende-se obter no máximo 25% de *overshoot*.

## Primeiro Método - Método da Curva de Reação

**Objetivo:** Determinação dos valores  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  do controlador PID, a partir das características da resposta transitória do processo em malha aberta.

Utiliza-se um sistema de controle em malha aberta (conforme a Figura 2), onde, com o controlador em manual, aplica-se um sinal em degrau de referência MV.

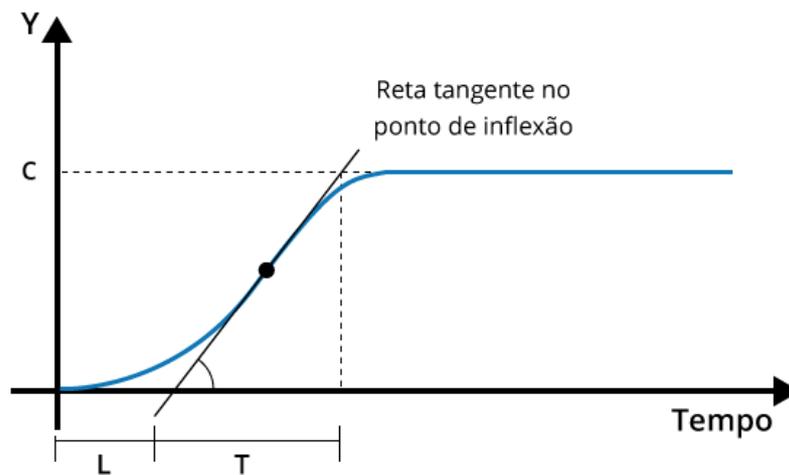
**Figura 02** - Diagrama de blocos para o teste em malha aberta.



**Fonte:** Autoria própria (2016).

O método da curva de reação é empregado em sistemas que se aproximam de um sistema de primeira ordem com atraso para uma resposta a um degrau. Observa-se a resposta  $Y$  ( $PV$ ) da planta (processo) e mede-se a inclinação máxima da curva e a defasagem (atraso)  $L$ . Pelos parâmetros da resposta a essa perturbação na entrada, calculam-se os parâmetros do controlador PID. O método de sintonização de Ziegler-Nichols em malha aberta só pode ser aplicado a plantas em que a curva da resposta ao degrau assemelha-se a uma curva em forma de  $S$ , tal como é apresentada na figura 3. Caso a curva não tenha essa forma, então esse método de sintonização não pode ser aplicado.

**Figura 03** - Resposta do Processo em malha aberta a uma perturbação em degrau.



**Fonte:** Adaptado de Araújo (2007).

**Nota:** Na Figura 3, foi aplicado um degrau na entrada do processo de amplitude X (referência), e a saída do processo PV (resposta) foi para um valor de amplitude C (sistema é estável em malha aberta). Há a necessidade de um controlador para que a PV siga a referência ou para garantir o seu valor no ponto desejado.

A curva da Figura 3 pode ser caracterizada pelas seguintes constantes: tempo de retardo (L), constante de tempo (T) e a taxa de reação/variação (R), dada pela seguinte equação:

$$R = \frac{C}{T}$$

Essas constantes são determinadas traçando-se uma reta tangente ao ponto de inflexão (ponto onde a curva muda de sentido) da curva de resposta, e encontrando-se os pontos de interseção dessa reta tangente com o eixo do tempo e com uma reta dada por  $y(t) = C$  (valor onde a resposta estabiliza). De posse desses valores, calculam-se os parâmetros do controlador desejado a partir da Tabela 1.

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{1}{RL}$	$\infty$	0
PI	$\frac{0.9}{RL}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$\frac{1.2}{RL}$	$2 * L$	$0.5 * L$

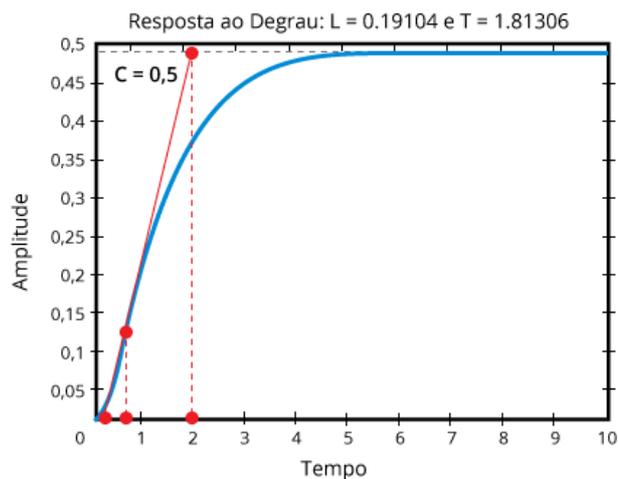
**Tabela 1** - Tabela de parâmetros para o 1º método de Ziegler-Nichols.

# Atividade 01

---

1. Considere que foi aplicada a uma planta um degrau e a resposta obtida é mostrada na Figura 4.

**Figura 04** - Resposta ao Degrau de uma planta.



**Fonte:** Adaptado de Araújo (2007).

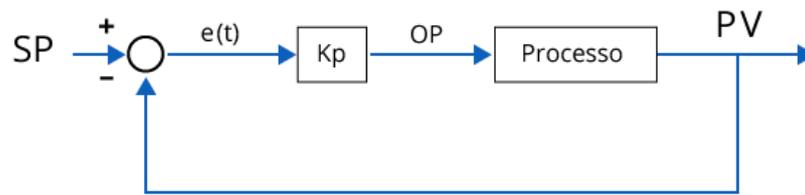
Obtenha a sintonia de um controlador PI e um PID, considerando o 1o método de Ziegler-Nichols, a partir da resposta obtida

## Segundo Método - Método da Oscilação ou Método da Sensibilidade

---

O método originalmente proposto por Ziegler e Nichols se baseia na observação de que muitos sistemas podem ser levados à instabilidade através do aumento do ganho proporcional em malha de realimentação com controlador proporcional. Utiliza-se um sistema de controle em malha fechada (conforme a Figura 5 para um determinado processo) com um controlador proporcional (P) e aplica-se um sinal de referência em degrau SP.

**Figura 05** - Diagrama de blocos *simplificado* de um sistema em malha fechada e realimentação com controlador proporcional.



**Fonte:** Autoria própria (2016).

Aumenta-se o ganho  $K_p$  até que o sistema atinja o limite de estabilidade (oscilações de amplitude fixa). Nesta situação, o valor de  $K_p$  é denominado ganho crítico ou ganho de última sensibilidade ( $K_u$ ), isto é, o ganho que levou o sistema ao limite de estabilidade e o período das oscilações é  $P_u$ .

Com base no ganho crítico e no período crítico é feita a sintonia (ajuste) do controlador desejado. Os passos da metodologia para se determinar o ganho crítico ( $K_u$ ) e o período crítico ( $P_u$ ), são:

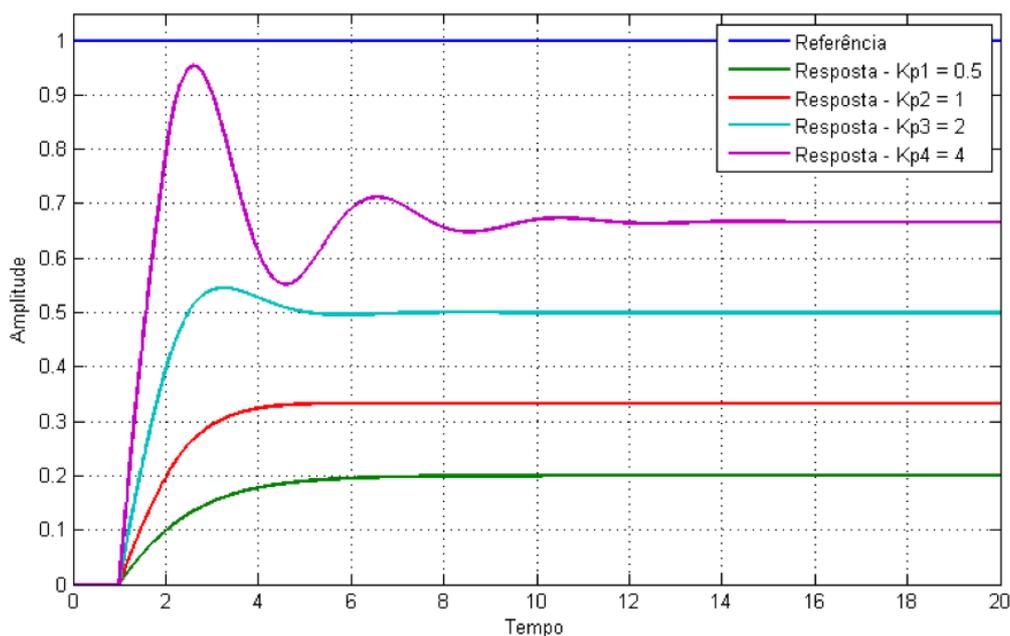
- Tira-se a ação integral ( $T_i = \infty$ ) e a ação derivativa ( $T_d = 0$ ) do controlador, deixando apenas a ação proporcional;
- Mantém-se o controlador em modo automático em malha fechada;
- Ajusta-se o ganho do controlador em um nível baixo a fim de se evitar oscilações no sistema;
- Aumenta-se o ganho, passo a passo, até que a oscilação fique constante em amplitude e período. Nesse instante do método, registra-se qual foi o valor do ganho proporcional que manteve o sistema oscilando da forma mencionada ( $K_u$ ). Deve-se registrar também o período que o sistema oscila com esse ganho ( $P_u$ ).

**Exemplo da metodologia:** Considere o esquema de diagrama de blocos da Figura 5. A ação integral e a ação derivativa estão desabilitadas. Isso é possível fazendo com que o ganho  $T_i$  seja um valor muito grande, pois no PID paralelo clássico esse parâmetro influencia dividindo a ação integrativa, esta torna-se desprezível e o ganho  $T_d$  igual a zero, pois influencia multiplicando a ação derivativa.

Em controladores industriais, geralmente existe um limite máximo e mínimo para os valores dos ganhos do PID, desta forma, para esse procedimento faz-se o ganho  $T_i$  ser o máximo e o  $T_d$  o mínimo.

De acordo com o procedimento e com as ações I e D desabilitadas, ajusta-se primeiro o ganho  $K_p$  em um valor baixo e o aumenta gradativamente. Os resultados desses ensaios para quatro valores de  $K_p$  a uma entrada do tipo degrau unitário, imposta na entrada da planta, podem ser vistos na Figura 6.

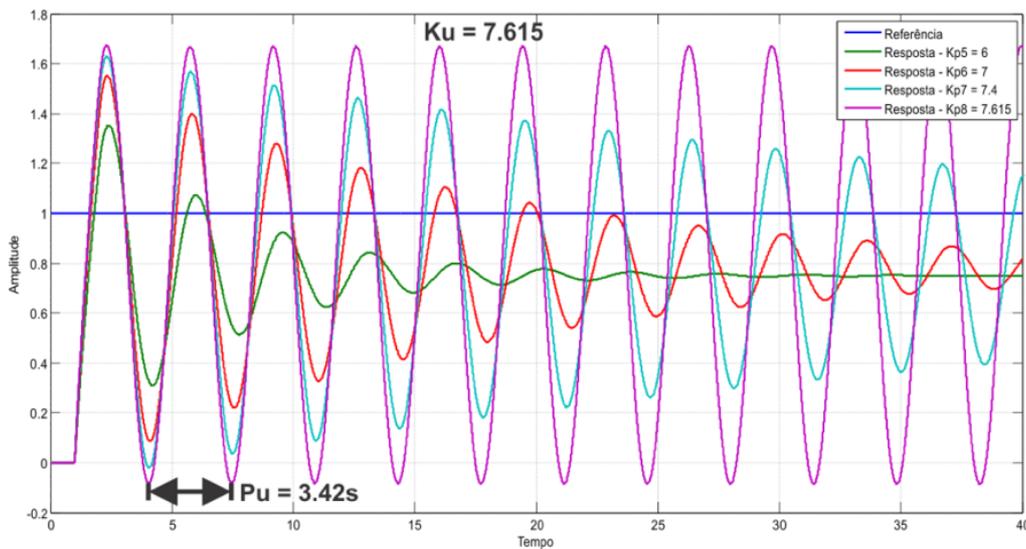
**Figura 06** - Respostas da malha de controle apenas com o controlador proporcional para valores de  $K_p$  aumentados gradativamente.



**Fonte:** Autoria própria (2016).

Em vista da Figura 6 e com as teorias já estudadas sobre os controladores PID, apenas com a ação proporcional não é possível corrigir o erro entre a referência e a resposta, no entanto, quanto mais se aumenta o ganho  $K_p$ , mais rápida e mais próxima da referência se torna a resposta e mais oscilatória, tendendo à instabilidade. O objetivo é levar o sistema ao limite de estabilidade, com a pretensão de que a saída do processo apresente oscilações sustentadas, ou seja, oscilações constantes ou aproximadamente constantes. Vejamos na Figura 7 as respostas para valores mais elevados de  $K_p$ .

**Figura 07** - Respostas da malha de controle apenas com o controlador proporcional para valores de  $K_p$  aumentados gradativamente.



**Fonte:** Autoria própria (2016).

Pela Figura 7, foi possível levar o sistema ao limite de estabilidade, encontrando  $K_u = 7.615$  e  $P_u = 3.42s$ . É importante observar que com o  $K_p = 7$ , o sistema já apresenta oscilações amplas em torno da referência, porém com uma tendência de decaimento. Por isso, deve-se sempre tomar cuidado para não aumentar demasiadamente o ganho proporcional e levar o sistema para a instabilidade. Note que se fosse ajustado um  $K_p = 8$ , possivelmente o sistema entraria na instabilidade. Deste modo, os profissionais que irão sintonizar os controladores por este método devem sempre ter em mente, ou pelo menos uma noção, de quais os valores de  $K_p$  que levarão o sistema para a instabilidade, somente pela análise da resposta do sistema para alguns ganhos proporcionais já utilizados nos testes.

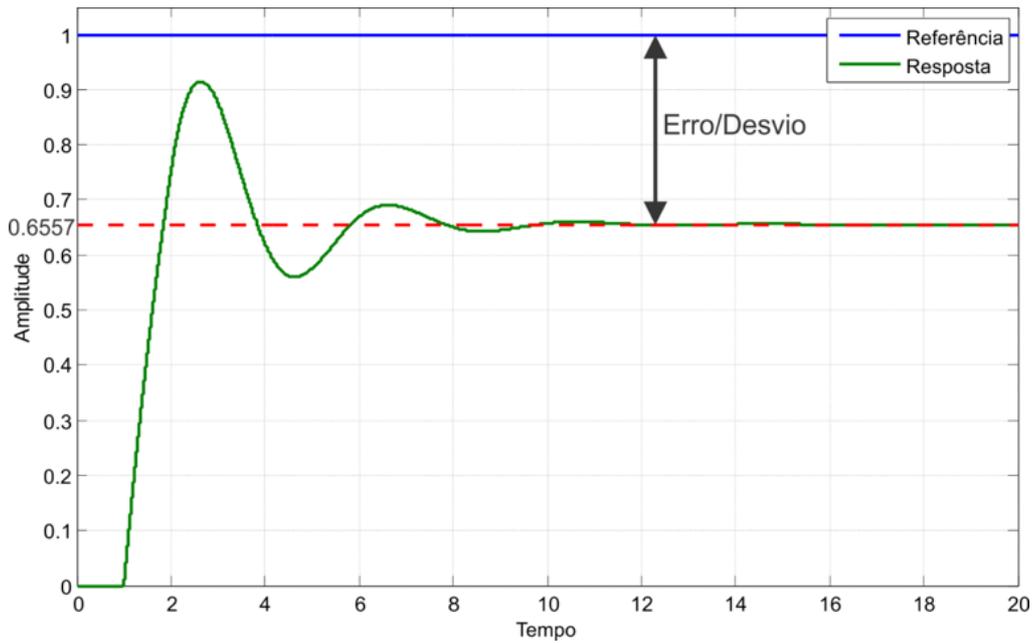
Ziegler e Nichols observaram que em um controlador proporcional o ganho ideal é a metade do ganho crítico, isto é,  $K_p = \frac{K_u}{2}$  e, com esse ganho obtemos *aproximadamente* uma razão de decaimento de  $\frac{1}{4}$ .

Tomando posse desse resultado de Ziegler e Nichols, ajusta-se o ganho proporcional (malha de controle apenas com o controlador P) como segue:

$$K_p = \frac{K_u}{2} = \frac{7.615}{2} = 3.8075$$

A Figura 8 apresenta o resultado da resposta da malha de controle com o controlador P.

**Figura 08** - Resposta da malha de controle com o controlador P. Sintonia pelo segundo método de Ziegler-Nichols.



**Fonte:** Autoria própria (2016).

Naturalmente a ação proporcional não eliminará o erro (desvio), necessitando de uma ação conjunta com o modo integral. Através de testes, Ziegler e Nichols descobriram que para esse método as equações mostradas na Tabela 2 fornecem bons valores de ajustes para controladores PID.

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5 * K_u$	$\infty$	0
PI	$0.45 * K_u$	$\frac{P_u}{1.2}$	0
PID	$0.6 * K_u$	$\frac{P_u}{2}$	$\frac{P_u}{8}$

**Tabela 2** - Tabela de parâmetros para o 2º método de Ziegler-Nichols.



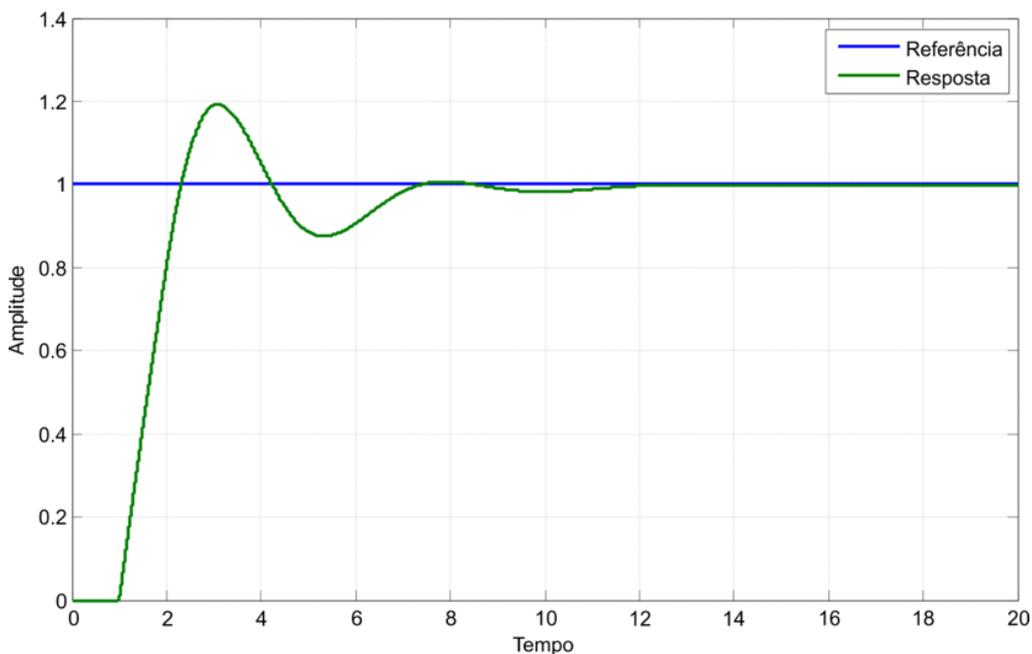
### Vídeo 03 - Método de Z-N

A Figura 9 apresenta o resultado da resposta do processo com o controlador PI ajustado (sintonizado) pela Tabela 2.

$$K_p = 0.45 * K_u = 0.45 * 7.615 = 3.42675$$

$$T_i = \frac{P_u}{1.2} = \frac{3.42}{1.2} = 2.85$$

**Figura 09** - Resposta da malha de controle com o controlador PI. Sintonia pelo segundo método de Ziegler-Nichols.



**Fonte:** Autoria própria (2016).

Como era esperado, o controlador PI eliminou o erro de regime apresentado com o uso do controlador P com um overshoot menor do que 20%.

**Nota:** Em sistemas que não entram no limite de estabilidade para nenhum ganho, não é possível aplicar esse método. Nem todos os sistemas podem entrar em oscilação, ou **não** é desejável.

Os métodos de sintonia de Ziegler-Nichols, tanto para controladores PI como para PID, apresentam respostas satisfatórias quando a constante de tempo T do processo é dominante. A piora de desempenho acontece em processos com tempo morto dominante.

A razão entre o tempo morto e a constante de tempo do processo ( $L/T$ ) é conhecida como fator de *incontrolabilidade* do processo. Quanto maior essa razão, mais difícil de controlar o processo e menor deve ser o ganho do controlador. Para valores do fator ( $L/T$ ) maiores que 4, as regras de sintonia de Ziegler e Nichols geram sistemas instáveis de controle (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010).

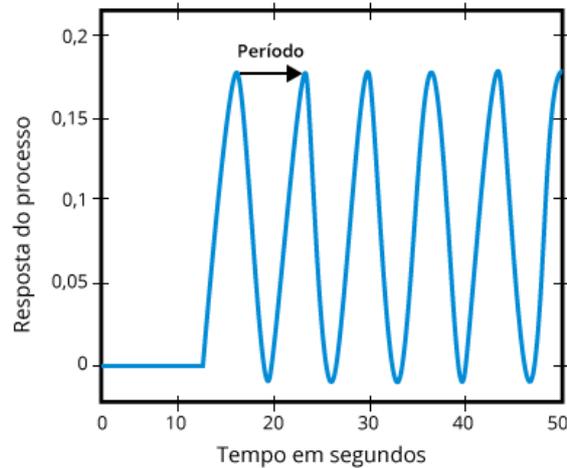
O método de Ziegler-Nichols teve grande aceitação por se basear em um experimento bastante simples. Entretanto, o método é difícil de ser automatizado ou aplicado de maneira que a amplitude da oscilação seja mantida sob controle. Operar o processo próximo da instabilidade é perigoso e necessita de autorização da gerência da planta industrial (ALVES, 2010). Assim, esse teste não é o mais empregado na indústria.

## Atividade 02

---

1. Um sistema dinâmico está em malha fechada apenas com controlador proporcional. O ganho do controlador em questão foi aumentado até o valor de 9.25. A resposta do sistema é a mostrada na Figura 10. Sabendo que o Período de oscilação é de 7.1 segundos, calcule os parâmetros de um controlador PI e um PID considerando o 2o método de Ziegler-Nichols.

**Figura 10** - Resposta dinâmica oscilatória de uma malha de controle.



**Fonte:** Adaptado de Campos e Teixeira (2010).

## Método CRH

---

O método CHR é baseado no trabalho de CHIEN; HRONES; RESWICK (1952). O método CHR é baseado em dois critérios: a resposta mais rápida sem sobressinal; e a resposta mais rápida possível com 20% de sobressinal. O método em questão considera tanto a sintonia para o problema regulador como para o problema servo. Em todos os casos, considera-se o sistema se comportando como um sistema de primeira ordem com atraso, com ganho estático  $K$ , constante de tempo  $t$  e tempo morto  $q$  (esses parâmetros já foram estudados na aula 02, se você achar necessário, volte lá e revise o conteúdo!). A determinação desses parâmetros é feita analisando a resposta do processo por meio de um experimento em malha aberta a uma entrada em degrau.

Para o critério de desempenho “resposta sem sobressinal”, as Tabelas 3 e 4 mostram a sintonia para o problema servo e para o problema regulatório, respectivamente.

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{0.3*t}{K*q}$	$\infty$	0
PI	$\frac{0.35 * t}{K * q}$	$1.16 * t$	0
PID	$\frac{0.6*t}{K*q}$	t	$q/2$

**Tabela 3** - Tabela de parâmetros para o método CHR (Critério: sem sobressinal considerando problema servo).

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{0.7*t}{K*q}$	$\infty$	0
PI	$\frac{0.6*t}{K*q}$	t	0
PID	$\frac{0.95 * t}{K * q}$	$1.357 * t$	$0.473 * q$

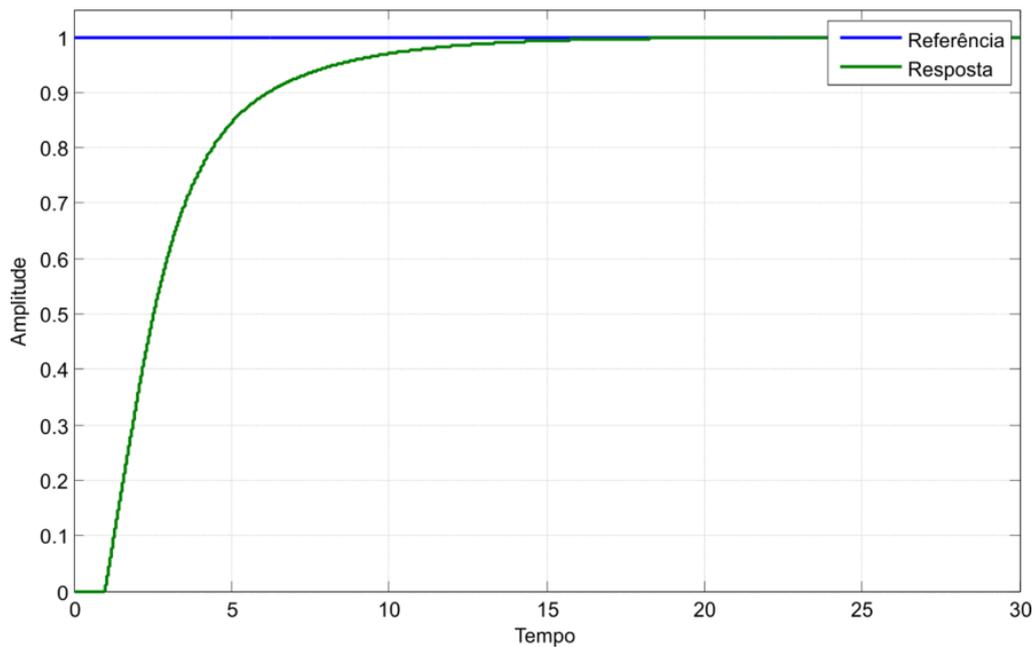
**Tabela 4** - Tabela de parâmetros para o método CHR (Critério: sem sobressinal considerando problema regulador).

Considerando o mesmo processo do *exemplo da metodologia* da seção anterior, podemos fazer um comparativo entre as respostas da malha com o controlador sintonizado pelos métodos de Ziegler-Nichols e CHR. A Figura 11 apresenta o resultado da saída do processo considerando o método de sintonia CHR para o problema servo com controlador PI. Os parâmetros do controlador foram obtidos através da Tabela 3 para o critério sem sobressinal. O processo em questão tem os seguintes parâmetros:  $K = 0.5$ ,  $t = 2$  e  $q = 1$ .

$$K_p = \frac{0.35 * t}{K * q} = \frac{0.35 * 2}{0.5 * 1} = 1.4$$

$$T_i = 1.16 * t = 1.16 * 2 = 2.32$$

**Figura 11** - Resposta da malha de controle com o controlador PI sintonizado pelo método CHR. Critério sem sobressinal considerando problema servo.



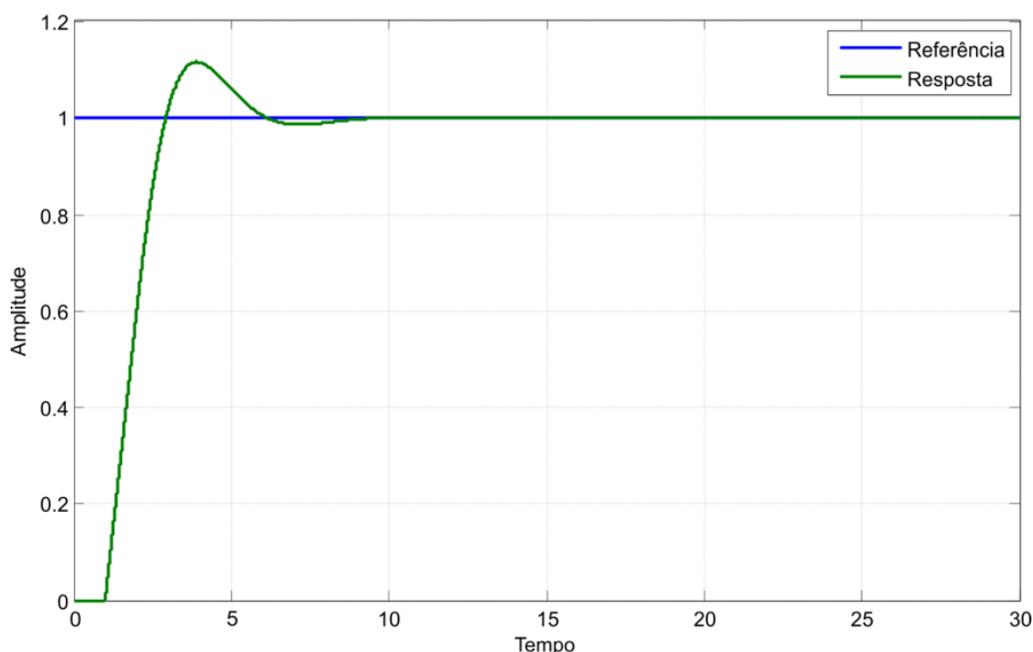
**Fonte:** Autoria própria (2016).

A Figura 12 apresenta o resultado da saída do processo considerando o método de sintonia CHR para o problema servo com controlador PI. Os parâmetros do controlador foram obtidos através da Tabela 5 para o critério com até 20% de sobressinal.

$$K_p = \frac{0.6 * t}{K * q} = \frac{0.6 * 2}{0.5 * 1} = 2.4$$

$$T_i = t = 2$$

**Figura 12** - Resposta da malha de controle com o controlador PI sintonizado pelo método CHR. Critério com até 20% de sobressinal considerando problema servo.



**Fonte:** Autoria própria (2016).

Uma análise da Figura 11 mostra que com a sintonia pelo método CHR foi possível obter uma resposta sem *overshoot*. No entanto, a rapidez da resposta não foi tão boa quanto ao do método de Ziegler-Nichols (com *overshoot*). Então, isso mostra que geralmente há um comprometimento ou relação entre os desempenhos para uma malha de controle. Por exemplo, ao melhorar um determinado desempenho, possa ser que degrade o outro, e isso deve ser levado em conta na hora do projeto, determinando sempre quais critérios de desempenho são mais desejáveis.

A curva da Figura 12 (CHR) apresenta uma resposta que se compara em rapidez com a resposta da Figura 9 (Ziegler-Nichols). Além disso, apresenta menor *overshoot* e menor tempo de estabilização.

Para esse caso, o método CHR foi mais satisfatório. No entanto, note que para a utilização do método CHR é preciso um modelo do processo (identificar o tempo morto, constante de tempo e ganho). Embora o segundo método de Ziegler-Nichols necessite de menos parâmetros ( $K_u$  e  $P_u$ ) para sintonizar os controladores, o sistema deve ser levado a uma situação perigosa, o que nem sempre é desejável.

**Nota:** A rapidez da resposta de uma planta está limitada às características físicas da mesma. Por exemplo, não é de senso comum projetar um controlador para um braço robótico girar  $30^\circ$  em 2 segundos, se para fazer essa mesma ação sem danificar o equipamento sejam necessários pelo menos 5 segundos.

Ao clicar iremos ver uma abordagem do método CHR ressaltando os mais relevantes aspectos teóricos para sua compreensão.



**Vídeo 04** - Método CHR

**Nota:** Durante o tempo morto o controlador não responde aos distúrbios do processo, porque ainda não tomou conhecimento desses distúrbios. O tempo morto pode ser tomado como o parâmetro de referência para o estudo do grau de dificuldade de controle do processo. Quanto maior o tempo morto do processo, maior é a dificuldade de seu controle.

## Atividade 03

---

1. Considere um sistema de 1ª ordem com atraso, com ganho estático 1, constante de tempo 30 segundos e tempo morto 1 segundo. Encontre a sintonia de um controle PI e um PID para o problema regulador considerando o método CHR com critério sem sobressinal.

# Comentários Gerais sobre os Métodos Estudados

---

Caso os ganhos do controlador sejam aumentados, a partir de certos valores de ganhos o sistema poderá entrar em uma zona de oscilações sem que haja decaimento, atingindo uma área de instabilidade. Através do teste da resposta ao degrau, no qual se acompanha o valor da variável de processo ao longo do tempo, apenas quando o sistema oscila sabe-se quando os valores dos ganhos do controlador se tornaram altos demais, o que pode ser um inconveniente (ALVES, 2010).

Cada tipo de controlador é aplicável a processos que têm determinadas combinações de características básicas. Ao se escolher um tipo de controlador, deve-se escolher um que atenda às necessidades de uma forma mais simples, sendo assim, mais econômicas, por exemplo, a utilização de um controlador PID onde poderia muito bem ser utilizado um controle Proporcional (P).

Os métodos de sintonia aqui apresentados são úteis como referência inicial (fornecem uma estimativa inicial para os parâmetros do controlador). Na prática, caso a resposta do sistema controlado não seja satisfatória com os parâmetros fornecidos pelos métodos, é desejável que se “refine” a sintonia obtida. Obter os parâmetros do processo nem sempre é uma tarefa trivial visto que plantas industriais estão sujeitas a muitas perturbações e ruídos, o que dificulta sua obtenção.

**Nota:** Todas as fórmulas de sintonia de controladores PID vistas devem ser utilizadas com cuidado para não levar o sistema à instabilidade.

Na próxima aula selecionamos mais dois métodos de sintonia de controladores PID: o Método de Cohen e Coon e o Método do Modelo Interno. Até lá!

# Resumo

---

Nesta aula, estudamos dois métodos heurísticos: Ziegler-Nichols e CHR. Aprendemos que os métodos se baseiam em dados resultantes de ensaios feitos no processo. Embora nem sempre seja simples obter os parâmetros do processo, os métodos apresentados (principalmente os que aplicam apenas um degrau em malha aberta) são bem-aceitos no meio industrial por sua simplicidade de cálculo.

## Autoavaliação

---

1. Discorra com suas palavras sobre os métodos de Ziegler-Nichols e como é a metodologia para se obter os parâmetros do processo.
2. Discorra com suas palavras sobre o método CHR e como é a metodologia para se obter os parâmetros do processo.
3. Considere um sistema de 1ª ordem com atraso com ganho estático 5, constante de tempo 15 segundos e tempo morto 3 segundos. Encontre a sintonia de um controlador PI e um PID para o problema regulador considerando o método CHR com critério sem sobressinal.

## Referências

---

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

ARAÚJO, F. M. U de. **Sistemas de controle**. Natal: UFRN, 2007. Disponível em: <<http://www.dca.ufrn.br/~meneghet/FTP/Controle/scv20071.pdf>>. Acesso em: 8 ago. 2013.

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

CHIEN, K. L.; HRONES, J. A.; RESWICK, J. B. On the Automatic Control of Generalized Passive Systems. **Transactions ASME**, v. 74, p. 175-185, 1952.

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