ANÁLISE COMPARATIVA DO SEGUNDO MÉTODO DE SÍNTONIA DE ZIEGLER-NICHOLS EM RELAÇÃO À PLICAÇÃO DO PREDITOR DE SMITH

João Marcelino de Sousa Filho[1], Marcus Vinícius Silvério Costa[2], Francisco Luis de Carvalho Costa[2] e Walber Medeiros Lima[2]

[1]Universidade federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, Rio Grande do Norte, Brasil. Endereço eletrônico: joao.filho42474@alunos.ufersa.edu.br
[2]Universidade federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, Brasil.

Resumo: este artigo tem como proposta comparar a aplicação do segundo método de Ziegler-Nichols com e sem Preditor de Smith. Para tanto, escolheu-se duas plantas de segunda ordem, para que com o auxílio dos *softwares* Matlab e Simulink fosse possível desenvolver um algoritmo capaz de cumprir a proposta em questão. O resultado do controle utilizando o segundo método de Ziegler-Nichols se mostrou bastante satisfatório, mas em relação a aplicação do Preditor de Smith não é possível dizer o mesmo, pois não obteve resultados superiores ao controle sem a sua aplicação.

Palavras-chave: Identificação de sistemas; Controlador PID; Ziegler-Nichols; Preditor de Smith.

INTRODUÇÃO

O controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID) é utilizado de forma abrangente em projetos de controle. Entretanto, é válido citar que ainda se encontra casos de controladores com má sintonia, em razão da malha ser controlada manualmente, ou apesar de funcionar no modo automático, são sintonizados de forma indevida, o que causa perda de qualidade da ação do dispositivo (Aguirre, 2007).

Por causa desse segundo motivo, estuda-se e aplica-se métodos de sintonia. Entre esses, destaca-se o de Ziegler e Nichols (ZN), que é frequentemente aplicado na indústria. A exemplo de Filho (2014), que projetou um controlador de pH utilizado em plantas industriais químicas e Dadalto (2018), que utilizou ZN para sintonizar os controladores de temperatura de entrada de uma unidade experimental de secagem.

Apesar do método de ZN ser de fato funcional, há algumas limitações. Para exemplificar, o atraso de transporte é um dos problemas que impede o método de funcionar perfeitamente. Guenther (2013), através de simulações computacionais, discutiu a dificuldade para ajustar controladores PID aplicados a plantas que apresentam atraso no sistema.

Para resolver essa situação, Smith (1957), projetou o compensador de tempo morto, denominado Preditor de Smith (Normey-Rico e Camacho, 2007). Em trabalho acadêmico, Henz (2013) aplicou o Preditor de Smith para projetar um controlador capaz de controlar a temperatura na saída do processo de forma rápida e robusta.

Além das áreas de sintonia e predição, a identificação de sistemas apresenta um papel de relevância na teoria de controle. Conforme Hofreiter (2017), a identificação tem como objetivo obter um modelo a partir da relação de resposta dinâmica entre variáveis manipuladas e variáveis controladas de um sistema, sem afastar-se demasiadamente do ponto de ajuste.

Nesse contexto, tomando como base as publicações de Ziegler e Nichols (1942), Astrom e Hagglund (1984), Normey-Rico e Camacho (2007) e Smith (1957), este trabalho tem como proposta comparar o segundo método de sintonia ZN com e sem a aplicação do Preditor de Smith, em uma planta identificada a partir do método do relé.

MATERIAL E MÉTODOS

A princípio, aplica-se o método do relé no Simulink para que o algoritmo desenvolvido no Matlab consiga obter os parâmetros τ e θ do modelo do sistema de segunda ordem com atraso de transporte.

Em seguida, o algoritmo calcula os parâmetros do controlador PID aplicando os parâmetros τ e θ nas equações da tabela do segundo método de Ziegler-Nichols.

A penúltima etapa consiste em utilizar o modelo estimado de segunda ordem para aplicar o Preditor de Smith na malha utilizando o Simulink.

Por fim, realiza-se a análise do comportamento da saída do processo da planta com e sem Preditor de Smith, baseando-se nos índices de desempenho não intrusivos, nos parâmetros de resposta do sistema e nos gráficos gerados pelo Matlab.

TEORIA ENVOLVIDA

Método do Relé Simétrico com e sem Histerese

O método do relé, foi apresentado por Astrom e Hagglund (1984) para identificar sistemas. O método baseia-se em determinar o ganho critico (K_u) e a frequência crítica (ω_u), através do ensaio realizado em malha fechada.

Para tanto, a chave é selecionada no ensaio do relé para obter os parâmetros necessários na identificação do modelo do sistema, assim como realizar a sintonia do controlador PID através da tabela do método de Ziegler e Nichols. Logo após, a chave alterna para o controlador PID que foi previamente sintonizado (Cardoso, 2002). Esse processo está ilustrado no diagrama da figura 1.

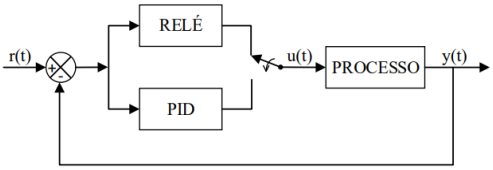

Figura 1. Relé de Astrom realimentado.

A comutação do relé provoca uma oscilação na saída do processo, conforme ilustrado a figura 2. Como pode ser observado, o relé produz o sinal de controle *u(t)* do tipo onda quadrada, enquanto que a saída do sistema *y(t)* é senoidal (Coelho e Coelho, 2004).

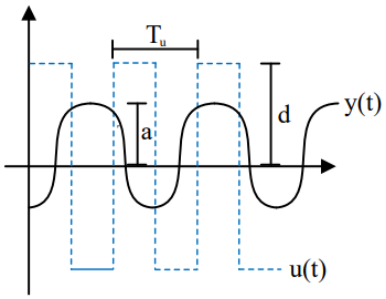

Figura 2. Gráfico do ensaio do relé.

Após obter a amplitude do relé *a* e e o período crítico T_u através do gráfico, utiliza-se as equações (1) e (2) para obter, respectivamente, o ganho crítico e o período crítico.

$$K_u = \frac{4d}{\pi a} \qquad (1)$$

$$\omega_u = \frac{2\pi}{T_u} \qquad (2)$$

Além do método do relé sem histerese, também há o relé com histerese. Nesse caso, também pode ser utilizado a equação (2) para determinar o período crítico, já para o ganho crítico não ocorre o mesmo, pois é necessário calculá-lo com a equação (3).

$$K_u = \frac{4d}{\pi\sqrt{a^2 + \varepsilon^2}} \qquad (3)$$

em que ε é o valor da histerese.

Controlador PID

O Controlador PID tornou-se bastante presente em processos industriais (Aguirre, 2007). Segundo Tan et al. (2000) e Tan et al. (2001), no domínio do tempo o sinal *u(t)* gerado pelo controlador PID ideal e a sua função de transferência no domínio de Laplace, são representados, respectivamente, por:

$$u(t) = K_p\left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau + T_d\frac{de(t)}{dt}\right) \qquad (4)$$

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \qquad (5)$$

onde: *e(t)* é o erro, definido por *y(t)* - *r(t)*; K_p é o ganho proporcional (ação proporcional); T_i é o tempo integral (ação integral); e T_d é o tempo derivativo (ação derivativa).

Em malha fechada, o controlador *C(s)* é disposto conforme figura 3 para realizar cálculos a partir do sinal de erro *E(s)* e produzir um sinal de controle *U(s)* capaz de estabelecer o desempenho desejado na malha de controle.

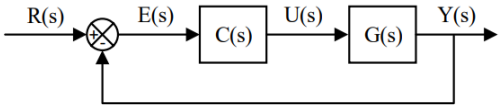

Figura 3. Diagrama do controle por realimentação.

Segundo Método de Ziegler-Nichols

Esse método tem como base o conhecimento do ponto na curva de Nyquist da função de transferência do processo, onde a curva de Nyquist cruza o negativo eixo real. Denomina-se essa intersecção como ponto crítico, formada pelo ganho crítico (K_u) e o período crítico (T_u) (Astrom e Hagglund, 1995).

Na prática, o ponto crítico é encontrado posicionando a componente proporcional (K_p) em série com a planta em malha fechada, assim como está sendo apresentado na figura 4 e em seguida eleva-se o valor de K_p, até que o processo apresente oscilações periódicas (Ogata, 2010).

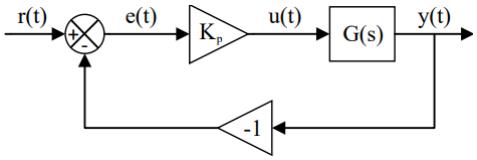

Figura 4. Diagrama do Segundo Método de Zigler e Nichols.

Dessa forma, é obtido o ponto crítico, ou seja, o ganho crítico, que é o valor do ganho proporcional e o período crítico, que é o período do sinal do processo oscilante. Com o valor de K_u e T_u em mãos, utiliza-se a tabela 1 para encontrar os parâmetros do controlador PID (Aastrom e Hagglund, 1995; Ogata, 2010).

Tabela 1. Tabela do Segundo Método de Zoegler-Nichols.

Controlador	K_c	T_i	T_d
P	$0.5K_u$	-	-
PI	$0.45K_u$	$T_u/1.2$	-
PID	$0.6K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$

Atraso de Transporte

O atraso de transporte, ou tempo morto, ocorre quando se aplica uma entrada na malha, mas o sistema não reage. Assim, durante o tempo morto a saída permanece nula por um intervalo de tempo θ. Em outras palavras, o sinal de saída é igual ao sinal de entrada, mas apresentando atraso (Levy, 2009).

O tempo morto pode ocorrer devido (Normey-Rico e Camacho, 2007):

• o tempo necessário para transportar massa, energia ou informação;

• o acumulo de atrasos no tempo em um grande número de sistemas de baixa ordem conectados em série; ou

• o tempo de processamento necessário para sensores, como analisadores e controladores que precisam de algum tempo para implementar um processo ou algoritmo de controle complicado.

Preditor de Smith

Esse compensador de atraso tem como princípio a inclusão do modelo do processo com atraso na malha de controle, para que dessa forma o controlador atue sobre o processo sem apresentar atraso (Normey-Rico e Camacho, 2007).

O preditor de Smith é dividido em duas partes. A primeira parte onde a perturbação $Q(s)$ atua é composta pelo controlador primário $C(s)$ e o processo $P(s)$, enquanto que a segunda parte é formada pelo preditor de Smith, no qual separa-se o modelo da planta $G_n(s)$ e o modelo de tempo morto $e^{-\theta ns}$, sendo $P_n(s) = G_n(s)e^{-Lns}$ o modelo completo do processo (Normey-Rico e Camacho, 2007).

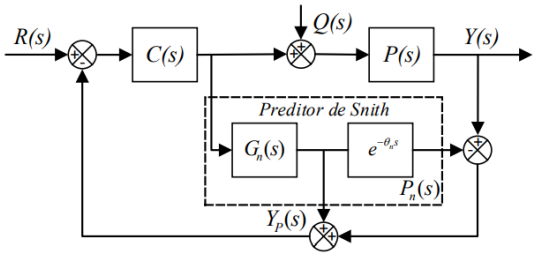

Figura 5. Diagrama de malha fechada com Preditor de Smith.

Caso a modelagem esteja correta ou não exista perturbações no modelo do processo, o sinal da saída predita $Y_p(t)$ será a saída da planta sem tempo morto, em razão do erro entre a saída do processo atual e a saída do modelo ter sido anulado. Idealmente, quando não há erros de modelagem, isto é, $P(s) = P_n(s)$, o controlador $C(s)$ pode ser ajustado de forma a desconsiderar o atraso de transporte (Normey-Rico e Camacho, 2007).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para realizar as simulações, foi considerado dois sistemas de 2ª ordem, representados pelas equações (6) e (7), ambos os casos com atraso de transporte.

$$G_1(s) = \frac{2e^{-s}}{(s+2)(s+1)} \qquad (6)$$

$$G_2(s) = \frac{1}{(0.1s+1)(s+2)} \qquad (7)$$

Em relação à planta da equação (7), após a realização de alguns testes, foi observado que o sistema oscilava com os seguintes valores no teste do relé: *setpoint* = 0.5 e d = 1. Nessa etapa, obteve-se os resultados para o ensaio do relé com e sem histerese apresentados, graficamente, nas figuras 7 e 8 e numericamente na tabela 2.

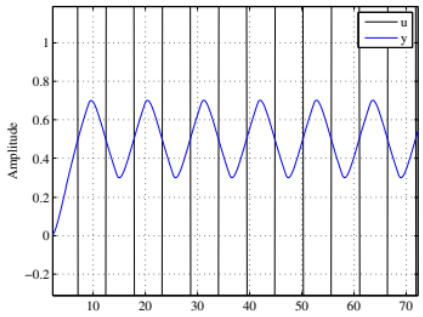

Figura 6. Saída do processo e saída do relé sem histerese utilizando G_2.

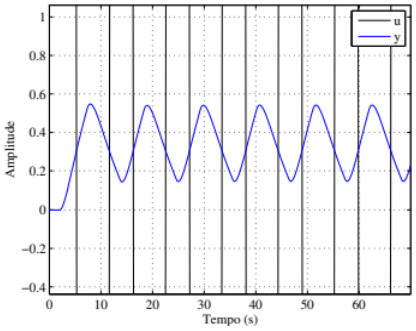

Figura 7. Saída do processo e saída do relé com histerese utilizando G_2.

Tabela 2. Resultado do ensaio do relé com e sem histerese para G_1.

Índice	a	K_u	ω_u	$\lvert N(a)\rvert$
0	0.4027	3.1618	0.5818	0.5127
0.2	0.3963	3.7221	0.5764	0.5045

Como pode ser observado na tabela 2, a diferença entre os dois resultados é aproximadamente zero. Mesmo com essa diferença mínima, foi optado por utilizar o relé com histerese, em razão de fornecer melhor precisão contra chaveamento indevidos, para assim, determinar o modelo estimado, que está sendo apresentado na equação (8).

$$G_{p1}(s) = \frac{e^{-2.1022s}}{(28.2225s+1)^2} \qquad (8)$$

No que se refere a resposta ao degrau em malha aberta, é perceptível graficamente com base na figura 8, que o modelo estimado apresentou um atraso de transporte muito próximo ao modelo real. Isso pode ser comprovado numericamente através do valor θ de G_1 e Gp_1. Em contrapartida, no período transitório, G_{p1} comportou-se mais lentamente, por esse motivo, alcançou a referencia tardiamente em relação a G_1.

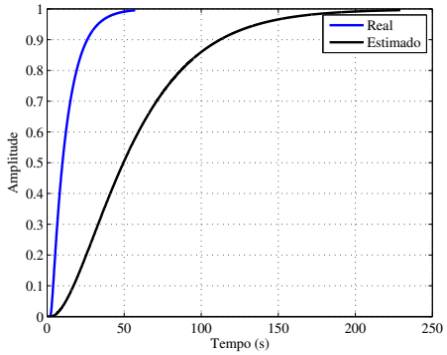

Figura 8. Resultado da Estimação para a Planta G_2.

Com o valor do ganho crítico (K_u = 3.7221) e do período crítico (T_u = 10.9) provenientes do ensaio do relé com histerese, obteve-se os parâmetros do controlador PID, substituindo na tabela do segundo método de Ziegler-Nichols, o resultado obtido foi: K_p = 2,2333, T_d = 1,3625 e T_i = 5,4500.

Logo após, foi aplicado o Preditor de Smith na malha em questão. O sinal da saída do processo e de controle são apresentados, respectivamente, nas figuras 7 e 8, enquanto que a tabela 3 e a tabela 4 apresentam os índices de desempenho para ambos os casos.

Nota-se que os resultados são próximos, entretanto, ocorreu algo inesperado, uma vez que a malha sem Preditor de Smith obteve resultados melhores, como indica os índices e critérios de desempenho.

Assim, destaca-se o fato da malha com Preditor de Smith ter se comportado mais lentamente no regime transitório e como consequência, obteve um tempo de subida maior.

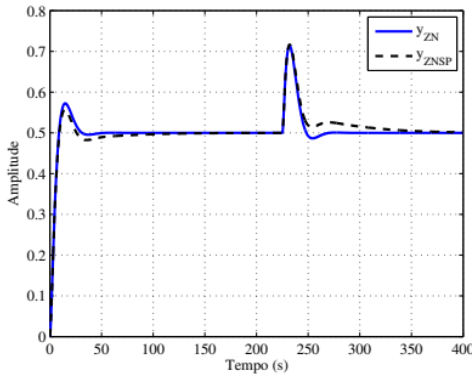

Figura 9. Saída do processo em malha fechada para G_2.

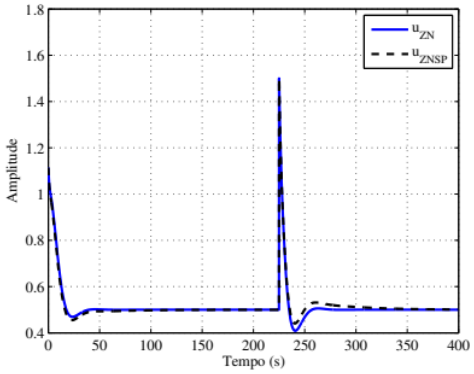

Figura 10. Saída do controlador em malha fechada para G_2.

Tabela 3. Índices de desempenho não intrusivos referentes à G_1.

Índice	ZN	ZN+SP
IAE	5.7141	7.8731
ISE	1.1513	1.2029
ITAE	673.2649	1.2195×10^3
ITSE	98.8361	114.6245

Tabela 4. Parâmetros de resposta do sistema referentes à G_1.

Índice	ZN	ZN+SP
Tempo de Subida	62.5270s	64,6642s
Tempo de Acomodação	2.5896 $\times 10^3$s	3.1484s
Overshoot	42.8178%	42.9354%
Pico	0.7141	0.7166
Tempo de Pico	2321s	2322s

Quanto à G_2, não foi possível aplicar o método do relé sem histerese, pois após realizar vários testes, o relé não foi capaz de chavear, prejudicando assim, a oscilação do sistema. Em razão disso, realizou-se somente o teste do relé com histerese. Nesse caso, foi obtido os seguintes resultados com *setpoint* = d = 1 e ε = 0,1 foram: a = 0,1078, T_u = 0,2000, K_u = 31,6322 e $|N(a)|$ = 0,1373.

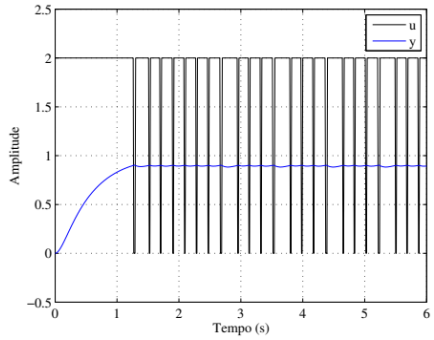

Figura 11. Saída do processo e saída do relé utilizando G_2.

Tanto quanto a resposta ao degrau em malha aberta do modelo de G_2, quanto a equação (9), mostram que o atraso de transporte é próximo do valor do modelo real. É perceptível também na figura 12 que a estimação gerou uma resposta mais lenta no regime transitório, que prejudicou o alcance imediato do valor de referência.

$$G_{p2}(s) = \frac{e^{-0.0166s}}{(1.2060s+1)^2} \qquad (9)$$

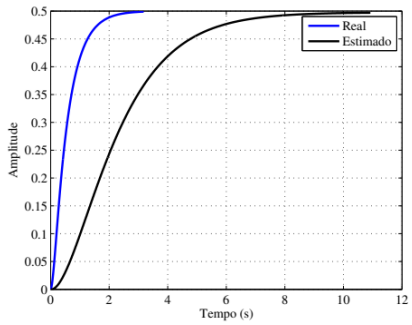

Figura 12. Resultado da Estimação para a Planta G_2.

Ao comparar os critérios de desempenho do controle da planta G_2 com e sem Preditor de Smith aplicado a malha, verifica-se que os resultados são próximos, ao realizar uma análise numérica (tabelas 5 e 6) e gráfica (figuras 13 e 14).

Além do mais, é válido afirmar que ambos os resultados apresentam resposta oscilatória no regime transitório, com pico máximo de aproximadamente 64% do valor da referência. A rejeição a perturbação mostrou-se eficaz, apresentando poucas oscilações e com valores de picos baixos.

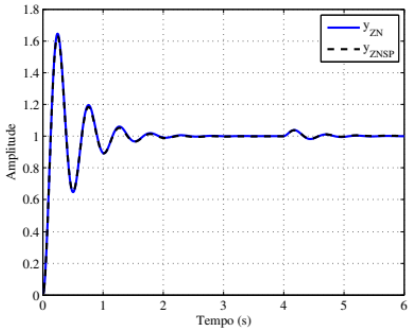

Figura 13. Saída do processo em malha fechada para G_2.

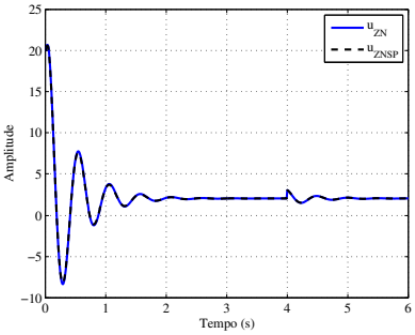

Figura 14. Saída do controlador em malha fechada para G_2.

Tabela 5. Índices de desempenho não intrusivos referentes à G_2.

Índice	ZN	ZN+SP
IAE	0.3269	0.3224
ISE	0.1381	0.1343
ITAE	0.1970	0.2018
ITSE	0.0310	0.0295

Tabela 6. Parâmetros de resposta do sistema referentes à G_2.

Índice	ZN	ZN+SP
Tempo de Subida	8.6965s	8.6940a
Tempo de Acomodação	428.0970s	428.0971
Overshoot	64.7566%	64.7401%
Pico	1.6467	1.6466
Tempo de Pico	26s	26s

CONCLUSÃO

De forma geral, a estimação do modelo de segunda ordem das plantas foi bem-sucedida, pois de fato foi possível obter os parâmetros do modelo. Contudo, os resultados apresentaram pontos positivos (G_{p1} e G_{p2} apresentaram um valor θ próximo ao real) e negativos (G_{p1} e G_{p2} se comportaram de forma lenta para alcançar a referência).

No que se refere a sintonia do controlador PID, a planta G_1 apresentou bons resultados no regime transitório, mas apresentou uma grande dificuldade para rejeitar a perturbação no regime permanente e G_2 comportou-se de forma oscilatória no transitório, mas foi verificado uma grande eficácia para rejeitar a perturbação no permanente.

Quanto ao Preditor de Smith, os resultados como um todo não foram satisfatórios. Entre as duas plantas estudadas, G_3 apresentou o melhor desempenho em relação ao Preditor de Smith comparado ao método de Ziegler-Nichols, mas não causa grandes melhorias ao sistema, pois é aproximadamente na ordem de 10^{-3} de diferença em alguns índices.

Logo, após a aplicação da metodologia em questão e a análise dos resultados, percebe-se que o segundo método de Ziegler-Nichols se mostrou eficaz na sintonia do controlador PID, mas o mesmo não pode ser dito em relação ao controlador PID com o Preditor de Smith, uma vez que não foi possível obter resultados superiores com a sua aplicação.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) e ao Grupo de Estudos em Automação e Controle (GEAC) pelo suporte na produção desse trabalho.

REFERÊNCIAS

CARDOSO, P. M. Estudo, Proposta e Aavaliação de Novas Metodologias De Sintonia Automática De Controladores PID Baseadas No Ensaio Do Relé Realimentado. 2002. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2002.

COELHO, A. A. R.; COELHO, L. dos S. Identificação de sistemas dinâmicos lineares. [S.l.]: Editora UFSC, 2004.

DADALTO, F. O. Projeto e Sintonização de Controladores Digitais Tipo PID: Controle Automático de Temperatura em uma Unidade de Secagem. 2018. 38 p. Monografia (Graduação em Engenharia Química) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia–MG, 2018.

FILHO, M. D. Síntese de Controlador PID Para Ccontrole de PH em um Reator com Otimização Via Algoritmos Gnéticos. 2014. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes-RJ, 2014.

GUENTHER, L. S. Sintonia Automática de Controladores com Compensação de Atraso. 2013. 64 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis–SC, 2013.

HENZ, M. A. Controle de Temperatura com Compensação de Tempo Morto em Aquecedores de Água Baseados em Chama Modulante. 2013. 45 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre–RS, 2013.

HOFREITER, M. Biased-relay feedback identification for time delay systems. In: Preprints of the 20th World Congress, 2017.

LEVY, D. Análise e controle de sistemas de fase não-mínima e de sistemas com tempo morto 2009. 159 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Eletrônica e de Computação) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

NORMEY-RICO, J. E.; CAMACHO, E. F. Control of dead-time processes. [S.l.]: Springer, 2007.

OGATA, K. Engenharia de controle moderno. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2010. 822 p. ISBN 978-85-4301-375-6.

SMITH, O. J. M. A Controller to Overcome Dead Time, ISA J., 6, 28/33, 1959.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimum Settings for Automatice Controllers, Transactins of the A.S.M.E, 1942. 759-768.