

APLICAÇÃO E ANÁLISE DE ALGORITMO DE AUTO-SINTONIA EMBARCADO EM CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL NO CONTROLE ANGULAR DE POSIÇÃO

Brehme de Mesquita (IFMA) mesquita.brehme@gmail.com
Agesandro Caetano Corrêa (IFPA) agesandro.correa@ifpa.edu.br

Resumo: O controlador lógico programável (CLP) tornou-se um dispositivo essencial em aplicações de controle automático em ambientes industriais. Após apresentar-se como um dispositivo relativamente caro, o CLP sofreu diversas modificações em *hardware* e a adição de novas ferramentas de *software* para a execução de várias funções específicas dedicadas ao ambiente industrial e otimizadas para a tarefa de controle. Consequentemente, buscou-se embarcar algoritmos de auto-sintonia de controladores nesse equipamento com o objetivo de indicar ao usuário os ajustes iniciais de parâmetros do controlador PID por meio da resposta da dinâmica da planta a uma entrada conhecida. Este artigo apresenta uma aplicação e análise de algoritmo de auto sintonia de controladores PID embarcado em controlador lógico programável no controle de uma planta de posicionamento angular desenvolvida em laboratório. A metodologia de auto-sintonia embarcada no CLP baseia-se no método do relé desenvolvido por Aström e Hägglund que tornou-se uma das primeiras metodologias inseridas em equipamentos industriais por sua simplicidade e robustez. Além disso, apresentam-se no artigo as equações matemáticas discretas utilizadas pela unidade central de processamento do CLP para a resolução das ações proporcional, integral e derivativo. As respostas da planta com controladores autoajustados não foram ótimas por apresentarem sobressinais, uma característica que pode ser indesejável a aplicação de controle angular de posição. Portanto, a auto-sintonia mostrou-se satisfatória para a parametrização inicial de controladores, contudo, ainda há a necessidade do operador realizar ajustes finos dos parâmetros com base nas respostas obtidas pelos controladores autoajustados e também com o conhecimento da dinâmica da planta.

Palavras-chave: Auto-sintonia, controlador lógico programável, controlador PID, controle angular de posição.

APPLICATION AND SELF-TUNING ALGORITHM ANALYSIS EMBEDDED IN PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER IN THE ANGULAR POSITION CONTROL

Abstract: The programmable logic controller (PLC) has become an essential device for automatic control applications in industrial environments. After present as a relatively expensive device, the PLC has undergone various modifications in hardware and the addition of new software features for the execution of several specific functions dedicated to the industrial environment and optimized for system control. Consequently, there has been the search for self-tuning algorithms with the aim to insert them on the PLC becoming an initial tool to indicate to the user on initial about adjustments to PID controller parameters through process response dynamics at a known input. This paper presents an application and analysis of PID controllers self-tuning algorithm embedded in PLC in control of an angular positioning process developed in the laboratory. The self-tuning methodology embedded in the PLC is based on the relay method, developed by Aström and Hägglund which became one of the first methodologies inserted in industrial equipment for its simplicity and robustness. In addition, are presented the discrete mathematical equations used by the PLC's central processing unit to the resolution of actions proportional, integral and derivative. Responses of the process with self-adjusting controllers are not optimal for presenting overshoot, a characteristic which may be undesirable in angular position control applications. Therefore, self-tuning was satisfactory for the initial setting controllers, however, there is still the necessity of operator to perform fine adjustments of the parameters based on the responses obtained by the auto-tuned controllers and also with the knowledge of the process dynamic.

Keywords: Self-tuning, programmable logical controller, PID controller, angular position control.

1. INTRODUÇÃO

A automação é um termo que designa a substituição do trabalho manual por equipamentos eletrônicos e/ou mecânicos que controlam seu próprio funcionamento, quase ou sem a intervenção do homem. Essa designação tornou-se bastante aplicada na indústria devido os

processos que antes eram manuais, tornaram-se automáticos a partir da Revolução Industrial, com a utilização de dispositivos mecânicos.

A partir dos anos 1920, estes dispositivos mecânicos foram substituídos por relés e contadores, integrando componentes elétricos para a realização da função de controlar processos. Essa substituição viabilizou, por meio da lógica de relé, o desenvolvimento de funções de controle mais complexas e sofisticadas. Essa tecnologia perdurou-se no ramo industrial até o surgimento da tecnologia de circuitos integrados, estes que eram dispositivos menores do que os relés, vida útil maior e com processamento mais rápido. Isso possibilitou uma nova geração de sistemas de controle automático (Franchi e Camargo, 2009).

No início da década de 1970, iniciou-se o surgimento dos primeiros computadores comerciais que logo começaram a ser utilizados como controladores em sistemas de controle de grande porte. A vantagem nessa integralização do computador ao ambiente industrial estaria no fato da flexibilidade de mudança na programação em relação à lógica por interligação elétrica, utilizada em sistemas com relés e circuitos integrados. Todavia, os primeiros computadores eram dispositivos grandes, caros, difíceis de programar e muito sensíveis em ambientes hostis onde se encontravam muitas plantas industriais (Franchi e Camargo, 2009).

O Controlador Lógico Programável (CLP), ou do inglês *Programmable Logic Controller*, foi desenvolvido com base na demanda existente na indústria automobilística estadunidense, devida a grande dificuldade de mudança na lógica de controle em painéis de comando a cada mudança na linha de montagem. O CLP é basicamente um computador dedicado ao ambiente industrial que utiliza uma memória programável para o armazenamento de instruções e a execução de várias funções específicas, otimizado para a realização de tarefas de controle (Morales e Castrucci, 2007; Bryan e Breyan, 1997; Bolton, 2006).

No início, igualmente ao computador comercial, o CLP era um equipamento grande e relativamente caro, considerado competitivo a sua utilização apenas em aplicações que contivessem centenas de relés (Franchi e Camargo, 2009). Mas em anos seguintes, este equipamento sofreu diversas mudanças e melhoria de projeto, principalmente em tecnologia de comunicação entre dispositivos, aumento do número de módulos de expansão, aplicação de técnicas de auto-sintonia embutidas no próprio equipamento para sistema de controle, e diversas outras funções que tornaram-o um equipamento essencial em diversas aplicações de controle automático.

A arquitetura do CLP pode ser dividida em duas partes, conforme ilustrado na Figura 1: uma Unidade Central de Processamento (UCP) e sistemas de interfaces de Entradas/Saídas (ES).

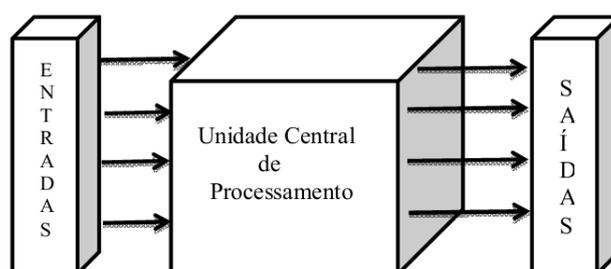


Figura 1: Diagrama de blocos de um controlador lógico programável. Ilustração adaptada de Franchi e Camargo (2009).

O desempenho de um CLP, principalmente em sua velocidade e capacidade de processamento de dados, depende, em grande parte, de seu processador utilizado que pode ser um microprocessador ou controlador convencional e até um processador dedicado (Prudente, 2010). Ele é o responsável pelo gerenciamento total do sistema ao controlador os barramentos de endereços, de dados e de controle, e o sistema de memória (Georgini, 2007).

Em operação, a UCP realiza continuamente ciclos de leitura, chamados de *scan*, de forma reduzida, constituindo assim em três processos, conforme ilustrado na Figura 2: realiza da leitura das entradas, executa o programa e atualiza as saídas do CLP (Bryan e Bryan, 1997).

A programação de CLP apresenta uma evolução nas técnicas e nas linguagens utilizadas nos últimos anos. Diversas linguagens poderosas foram criadas, visando a atender os mais diversos setores de uso desses equipamentos. Todavia, a grande dificuldade era a inexistência de normas em relação às linguagens de programação, o que fazia com que cada equipamento possuísse uma linguagem pré-determinada pelo fabricante do equipamento. Com isso, a comunidade industrial internacional reconheceu a necessidade de uma padronização com vista à uniformização de procedimentos dos diversos fabricantes (Franchi e Camargo, 2009).

Em 1992, a *International Electrotechnical Commission* (IEC) publicou o padrão IEC 61131, que teve origem na revisão da IEC 1131, o qual é constituído pelas seguintes partes (Georgini, 2007):

- IEC 61131-1: Informações gerais (introdução);
- IEC 61131-2: Especificações de equipamentos e testes (*hardware*);
- IEC 61131-3: Modelo de programação e de *software* (linguagens de programação);
- IEC 61131-4: Orientações ao usuário;
- IEC 61131-5: Comunicação (MMS – *Manufacturing Message Specifications*);
- IEC 61131-6: Comunicação por *Fieldbus*;
- IEC 61131-7: Programação para controle *fuzzy*;
- IEC 61131-8: Orientações para aplicação e implementação das linguagens de programação.

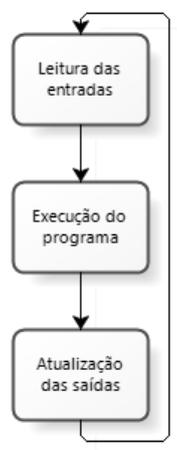


Figura 2: Ciclo resumido de execução do CLP. Ilustração adaptada de Franchi e Camargo (2009).

A IEC 61131-3 define cinco linguagens de programação (com sintaxe e semântica de duas linguagens textuais e duas linguagens gráficas, e estruturação por SFC), podendo-se realizar uma macro distinção em duas categorias, como mostrado na Figura 3: linguagem e linguagem textual.

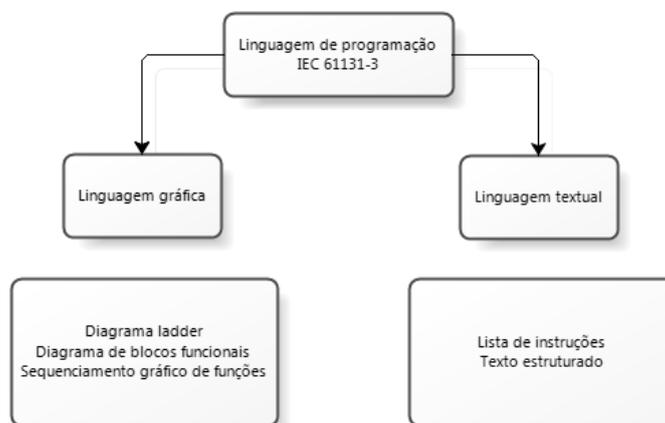


Figura 3: Categorias de classificação das linguagens de programação do CLP, conforme a IEC 61131-3.

A linguagem de programação textual provém do setor eletrônico ou então informático e, portanto, constitui a verdadeira linguagem de programação com enorme possibilidade de desenvolver as necessidades de projeto. Dentro dessa categoria encontram-se a programação por lista e por texto estruturado. Já a linguagem de programação gráfica apresenta-se ao programador como um verdadeiro esquema elétrico ou esquema de blocos. Nessa categoria, encontram-se o diagrama ladder, o diagrama de blocos funcionais e o sequenciamento gráfico de funções (Prudente, 2010).

Este artigo tem o objetivo de aplicar e analisar os resultados obtidos no controle de um sistema de posicionamento angular construído em laboratório ao utilizar-se o algoritmo de auto-sintonia embutido em um CLP comercial para a determinação dos ganhos de um controlador PID ou de suas outras possíveis configurações. As próximas sessões farão uma breve discussão sobre o controlador PID e a apresentação do método do relé, algoritmo esse que é embutido por fabricantes de CLP para a utilização na auto-sintonia de controladores, a descrição da planta construída em laboratório para teste de controle de posicionamento angular, os resultados e as respectivas discussões desses e a conclusão da pesquisa.

2. CONTROLE PID E A AUTO-SINTONIA NO CLP

O uso de controladores tornou-se indispensável na aplicabilidade de muitos sistemas controláveis, ocasionando melhorias na resposta pela sua capacidade de controlar tanto o regime transitório quanto o regime permanente, ou ambos simultaneamente. O controlador proporcional-integral derivativo (PID), ou também conhecido como controlador de três modos, surgiu a partir do desenvolvimento teórico aplicado a manobrabilidade automática de navios (Minorsky, 1922). Esse desenvolvimento na área de controle automático deve-se a Nicolas Minorsky, o qual desenvolveu boa parte da teoria geral utilizada atualmente para aumentar o desempenho dos sistemas de controle automático (Bennet, 1984).

O controlador PID é gerado por meio da combinação das ações proporcional, integral e derivativo, para formar um só sinal de controle capaz de eliminar erros de regime permanente, pela ação do controle integral, a um sinal de entrada constante, bem como antecipar o comportamento do processo graças à ação do controle derivativo. Já a ação proporcional faz com que o sistema reaja ao erro presente ao conferir uma reação imediata, isto é, uma ação

rápida contra perturbações ou variações de entrada de magnitude significativas. Por essas características, as três ações presentes no controlador PID permitem emular, matematicamente, o comportamento da mente do operador ao controlar um processo manualmente (Bazanella e Silva Jr., 2005). A Tabela 1 mostra os efeitos independentes na resposta para a sintonia dos parâmetros proporcional, integral e derivativo (Ang *et al*, 2005).

Tabela 1 – Efeitos independentes da sintonia dos parâmetros proporcional, integral e derivativo na resposta.

Resposta em malha fechada	Tempo de subida	Sobressinal	Tempo de acomodação	Erro de estado estacionário	Estabilidade
Aumentar a ação proporcional	Diminui	Aumenta	Pequeno aumento	Diminui	Degrada
Aumentar a ação integral	Pequena diminuição	Aumenta	Aumenta	Grande diminuição	Degrada
Aumentar a ação derivativa	Pequena diminuição	Diminui	Diminui	Pequena alteração	Melhora

O sinal de controle gerado pelo controlador PID pode ser genericamente expresso, matematicamente em função do tempo, por:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_{t_0}^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{d(t)} \right], \quad (1)$$

onde K_p é o ganho proporcional, T_i é o tempo do integrador e T_d é o tempo do derivador.

Apesar de sua estrutura ser relativamente simples, os controladores PID têm-se revelado suficientemente adequado para o controle de diversos processos, tornando-se, ainda hoje, o mais utilizado na indústria, apesar da existência de inúmeras outras técnicas de controle mais sofisticadas (Aström e Hägglund, 1995).

Para obter-se um ótimo ajuste de um controlador PID para um determinado processo, necessita-se a determinação dos três parâmetros que compõe a Equação 1. Assim, diversas metodologias foram criadas para a sintonia do controlador PID, como a método de Ziegler e Nichols (1942) que tornou-se uma das metodologias mais utilizadas para sintonizar diversas malhas de controle, entretanto, o resultado mostra-se razoavelmente bom somente para algumas situações (Michel, 2010). Além disso, o método clássico de Ziegler e Nichols coloca o processo próximo à região de instabilidade, desta forma é necessário interromper os fluxos normais de operação de uma planta industrial, o que nem sempre é possível (Coelho e Coelho, 2004).

Aström e Hägglund (1984) desenvolveram uma metodologia para auto-sintonia de controladores baseado nas ideias de Ziegler e Nichols via resposta em frequência do sistema. O diferencial dessa metodologia está na possibilidade de detecção do ponto crítico por intermédio de um ensaio realizado em malha fechada sem a necessidade de atingir os limites de estabilidade da planta (Cologni, 2008). A Figura 4 mostra a estrutura fundamental do método de sintonia automática de Aström e Hägglund utilizando relé alimentado (Cardoso, 2002).

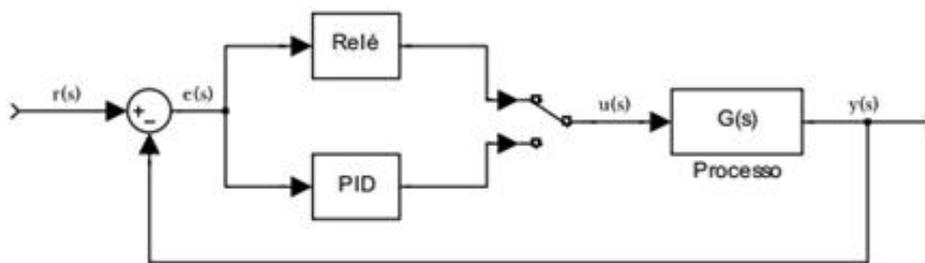


Figura 4 – Estrutura fundamental do relé de Aström e Hägglund realimentado. Ilustração adaptada de Cardoso (2002).

Durante a sintonia, o controlador PID é desabilitado da malha e a entrada do processo é conectada a saída do relé. A comutação do relé ocorre da seguinte forma: se a diferença entre a entrada $r(s)$ e a saída $y(s)$ é maior do que zero, o sinal $u(s)$ advindo do relé será a amplitude positiva do relé $(+h)$; se essa diferença for menor do que zero, o sinal $u(s)$ será a amplitude negativa do relé $(-h)$.

A Figura 5 ilustra o efeito do relé sobre a saída do processo (Neves, 2009). Observa-se uma oscilação sustentada de amplitude a , denominada de ciclo limite, o período P_u e a amplitude do relé designada por h .

A partir dos valores da amplitude do relé h e do ciclo limite a , pode-se calcular o valor do ganho crítico pela seguinte equação:

$$K_u = \frac{4h}{\pi a}, \tag{2}$$

Ao determinar os valores do ganho crítico K_u e do período crítico P_u , podem-se utilizar as regras estabelecidas pelo método de Ziegler e Nichols para encontrar os parâmetros do controlador PID. O relé padrão de Aström e Hägglund foi uma das primeiras metodologias embarcadas em equipamentos industriais para a auto-sintonia de controladores e seu sucesso deve-se à simplicidade e robustez (Cardoso, 2002).

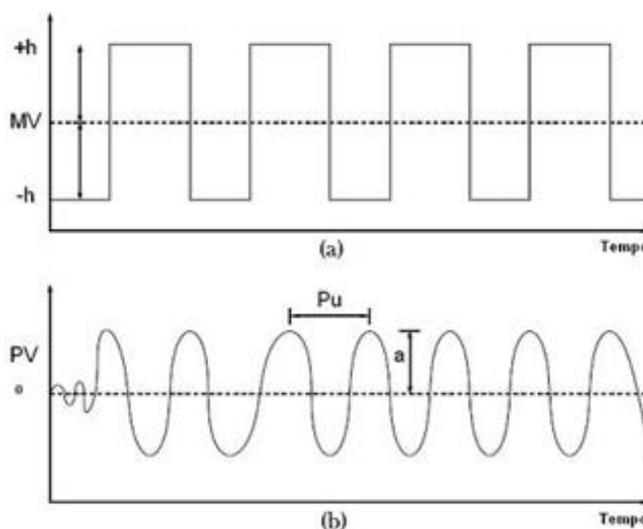


Figura 5 – Resposta do sistema sob o efeito do relé: (a) entrada e (b) saída. Ilustração adaptada de Neves (2009).

Em funcionamento, um controlador PID regular o valor da saída de modo a conduzi-la a erro zero. Mensura-se o erro por meio da diferença entre o valor da referência (o valor desejado) e a variável do processo (saída do processo). O princípio do controlador PID baseia-se matematicamente pela Equação 1, mas para implementá-lo em CLP necessita-se quantificar as amostras periódicas do valor do erro com posterior cálculo da saída. Assim, a equação resulta-se em:

$$U(n) = K_c e_n + K_i \sum_1^n e + U_i + K_d (e_n - e_{n-1}), \quad (3)$$

em que $U(n)$ é o valor calculado para a saída do controlador na amostra n , K_c é o ganho da malha, e_n é o valor do erro do ciclo na amostra n , e_{n-1} é o valor anterior do erro do ciclo, K_i é a constante proporcional do termo integral, U_i é o valor inicial da saída do controlador e K_d é a constante proporcional do termo diferencial.

A Equação 3 mostra que o termo integral é uma função de todos os termos de erro, da primeira amostra até a amostra n . A expressão diferencial é uma função da diferença entre o erro atual e o erro anterior. Não é prático na aplicação digital o armazenamento de todas as amostras do termo do erro, sendo necessário apenas armazenar o valor anterior do erro e o valor anterior do termo integral. Assim, pode-se simplificar a Equação 3 em:

$$U(n) = K_c e_n + K_i e_n + U_x + K_d (e_n - e_{n-1}), \quad (4)$$

no qual U_x é o valor anterior do termo integral, da amostra $n-1$. A CPU utiliza uma forma modificada da Equação 4 para calcular a saída do controlador, como:

$$U(n) = U_p(n) + U_i(n) + U_d(n), \quad (5)$$

nos quais $U_p(n)$ é o valor do termo proporcional da saída da malha na amostra n , $U_i(n)$ é o valor do termo integral da saída da malha na amostra n e $U_d(n)$ é o valor do termo diferencial da saída da malha na amostra n .

O termo $U_p(n)$ é proporcional ao produto dos ganhos K_c que controla a sensibilidade do cálculo da saída e o erro e . A equação para o termo proporcional resolvido pela CPU é:

$$U_p(n) = K_c (S_p(n) - P_v(n)), \quad (6)$$

em que $S_p(n)$ é o valor de referência na amostra n e $P_v(n)$ é o valor da variável do processo na amostra n .

O termo $U_i(n)$ é proporcional à soma dos erros ao longo do tempo. A equação para o termo integral, resolvida pela CPU, é:

$$U_i(n) = K_c \frac{T_s}{T_i} (S_p(n) - P_v(n)) + U_x, \quad (7)$$

onde T_s é o tempo de amostragem e T_i é o tempo de integração.

O termo $U_d(n)$ é proporcional à alteração do erro. A equação para a expressão diferencial é:

$$U_d(n) = K_c \frac{T_d}{T_s} [(S_p(n) - P_v(n)) - (S_p(n-1) - P_v(n-1))], \quad (8)$$

no qual T_d é o tempo de derivação e utiliza-se também os valores $n-1$ das amostras do valor de referência e da variável do processo. Para evitar mudanças graduais na saída, devido à ação derivativa em mudanças no valor de referência S_p , a Equação 8 pode ser modificada ao supor que o valor da referência é uma constante, ou seja, $S_p(n)$ é igual a $S_p(n-1)$. Isso resulta no cálculo da alteração da variável do processo, em vez da variação do erro, assim:

$$U_d(n) = K_c \frac{T_d}{T_s} (S_p(n) - P_v(n) - S_p(n) + P_v(n-1)). \quad (9)$$

Ao ajustar a Equação 9, tem-se:

$$U_d(n) = K_c \frac{T_d}{T_s} (P_v(n-1) - P_v(n)), \quad (10)$$

Dessa maneira, no momento da primeira amostra, o valor de $P_v(n-1)$ é inicializado para ser igual ao valor de $P_v(n)$ e a saída do controlador PID no CLP será a soma das ações descritas matematicamente pelas Equação 6, 7 e 10.

3. PLANTA DE POSICIONAMENTO ANGULAR

A Figura 6 mostra a planta de posicionamento angular que foi desenvolvida em laboratório. O sistema apresenta uma ponte H a qual é comandada por um sinal analógico de tensão que ativa um motor de corrente contínua (potenciômetro motorizado). Esse potenciômetro motorizado está acoplado a outro potenciômetro em que são realizadas as leituras de ângulo. A Figura 7 mostra o esquema do circuito eletrônico da ponte H conectada ao potenciômetro motorizado.

De acordo com o esquema, a ponte H é alimentada com tensão de 0 V e 10 V e há uma entrada de tensão que trabalha entre essas faixas. Em aproximadamente 5 V, a ponte H está em equilíbrio e a tensão do motor é zero, ou seja; o motor pára. Entre 0 e 5 V, o motor gira em um sentido e quanto mais a tensão de entrada esteja próxima de 0 V, mais rápido será o giro. Já entre 5 e 10 V, o motor gira em sentido contrário e quanto mais próximo a tensão de entrada estiver de 10 V, mais rápido se torna o giro.

A Figura 8 mostra o esquema completo da planta com o controlador. O sistema é composto pelo circuito da ponte H conectado ao potenciômetro motorizado, por outro potenciômetro com engrenagem de redução e embreagem deslizante e por um amplificador de ganho unitário (*buffer*). A utilização de um *buffer* foi para isolar um estágio de alta impedância de saída a uma carga de baixa impedância de entrada, assim a leitura de tensão realizada no segundo potenciômetro, no qual será a variável do processo, não sofre distorção.

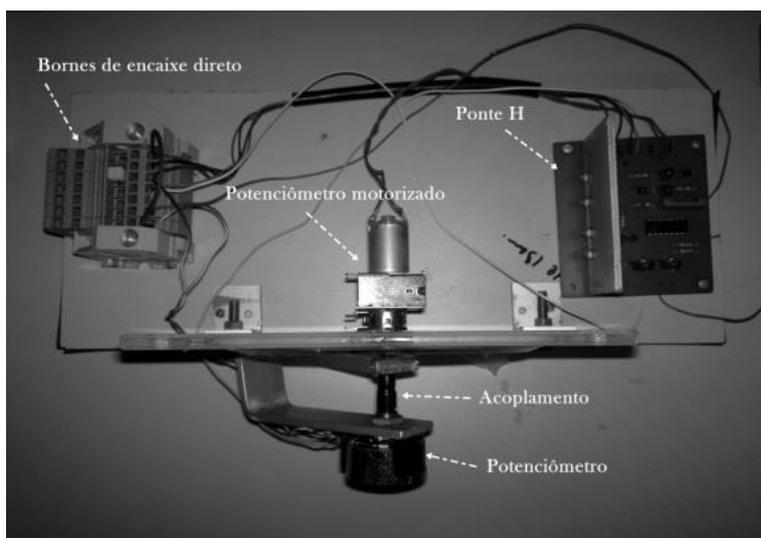


Figura 6 – Componentes da planta de posicionamento angular desenvolvida no Laboratório de Automação do Instituto Federal do Pará.

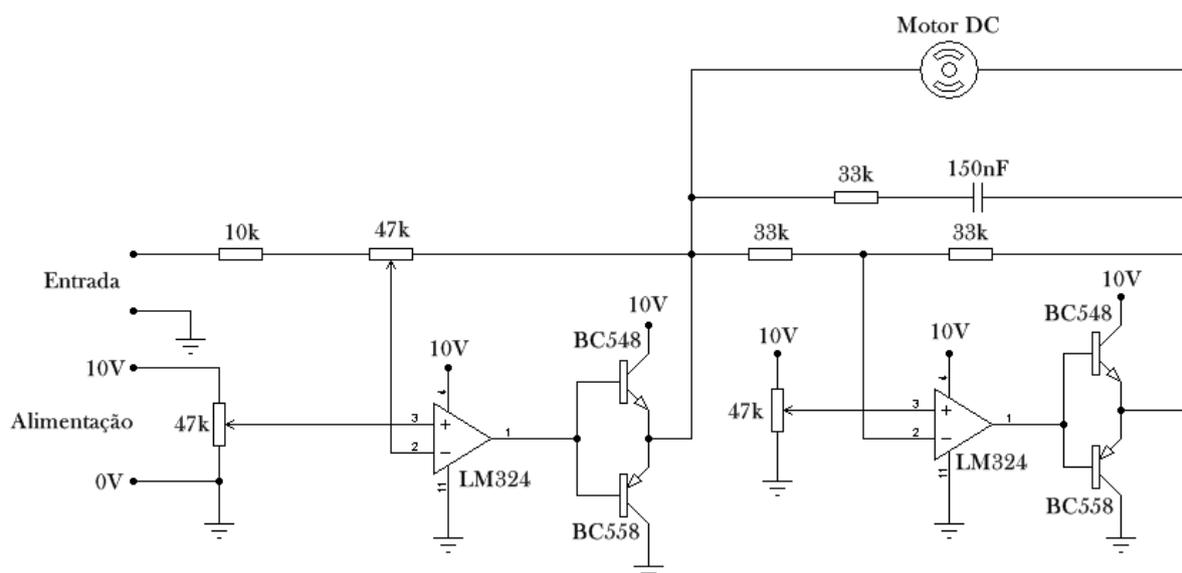


Figura 7 – Esquema do circuito eletrônico a ponte H conectado ao potenciômetro motorizado.

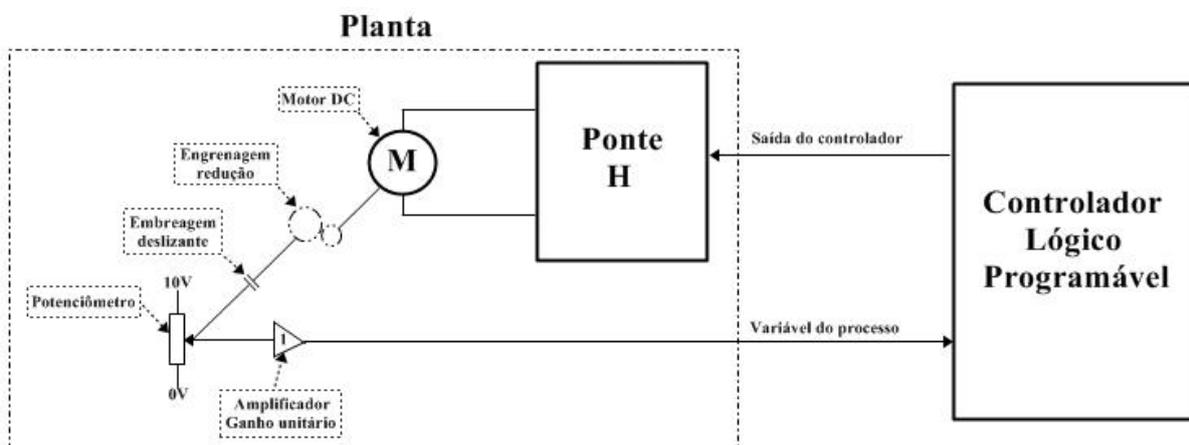


Figura 8 – Esquema da planta conectada ao controlador lógico programável.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a realização dos testes, utilizou-se o CLP S7-200 da fabricante Siemens, ver Figura 9, e os dados foram adquiridos por um *data logger*.

Primeiramente, buscaram-se as respostas da saída da planta sem o uso de controle. Em malha aberta, utilizou-se uma entrada pulsada a fim de avaliar a trajetória da resposta. Conforme pode ser visualizado na Figura 10, o sistema em malha aberta apresenta-se dinamicamente instável. Além disso, a planta tendeu a girar para um dos lados. Ao fechar a malha, a resposta da planta torna-se estável, conforme mostrado na Figura 11.

Os CLPs da série S7-200 são programados por meio um programa específico do fabricante, o *Step 7 Micro/Win*. Esse programa disponibiliza uma interface amigável ao usuário para a realização de sintonia de controladores PID, ver Figura 12. O *PID Tuning Control Painel* permite que o usuário inicie uma sequência de auto-sintonia ou pode-se cancelar a sequência iniciada anteriormente. O usuário ainda pode escolher utilizar-se dos valores de ajustes do controlador PID sugeridos pelo algoritmo de auto-sintonia ou então ajustar os parâmetros conforme a sua necessidade ou obtidos por outro método de ajuste *offline*. Para o uso do painel de controle, o S7-200 necessita-se estar conectado ao computador e que haja um programa com pelo menos um laço de controle PID.

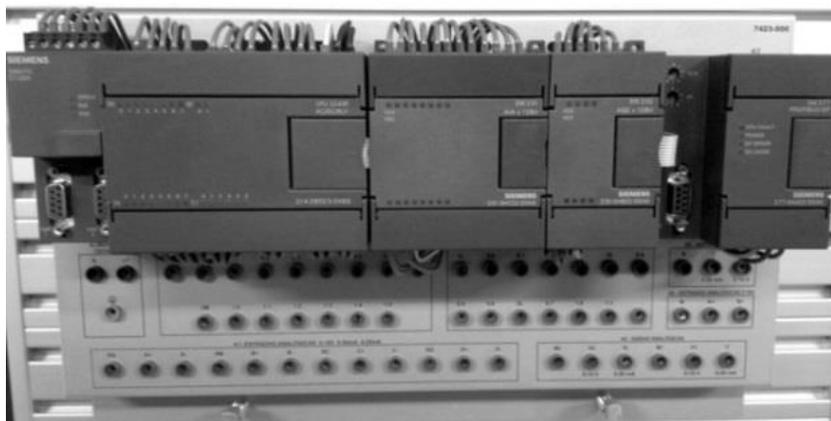


Figura 9 – CLP S7-200 com CPU 224XP mais módulos de expansão EM 231 (entradas analógicas), EM 232 (saídas analógicas) e EM 277 (rede Profibus DP).

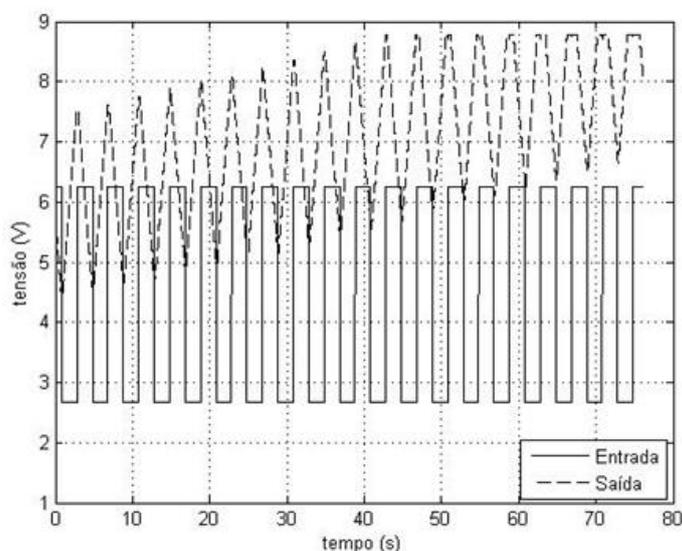


Figura 10 – Sinal de saída da planta em malha aberta.

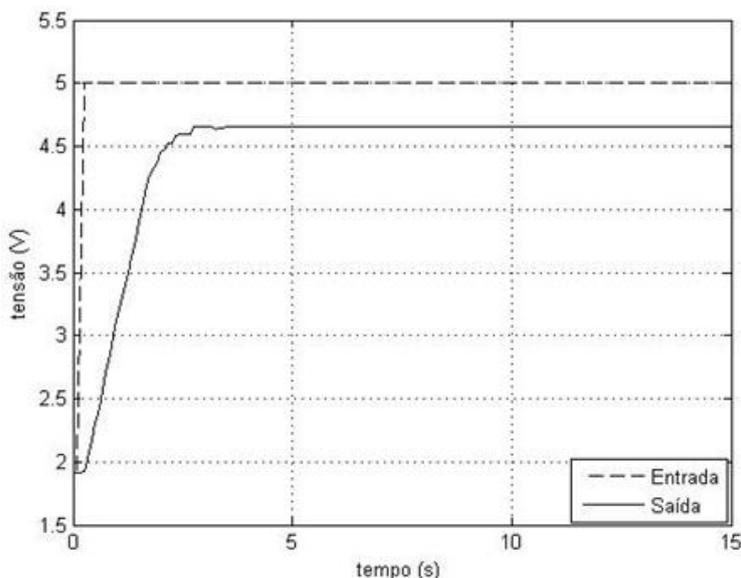


Figura 11 – Sinal de saída da planta em malha fechada.

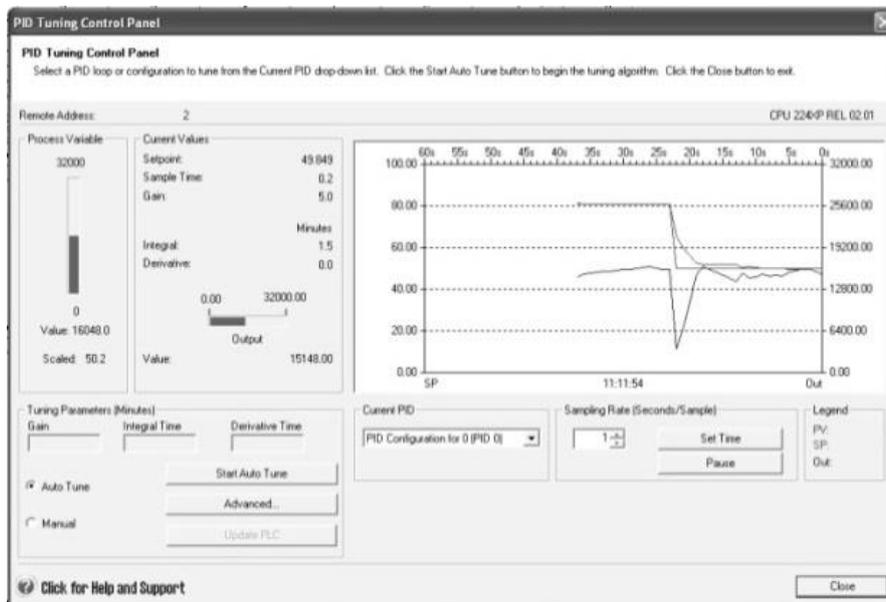


Figura 12 – Tela do PID Tuning Control Panel.

Ao utilizar a ferramenta de auto-sintonia do CLP, os parâmetros definidos ao controlador foram: $K_p = 3,993502$, $T_i = 0,7572173$ min e $T_d = 0,1893043$ min. Observa-se que os tempos integral e derivativo são dados em minutos. Conforme visualizado na Figura 13, a resposta do sistema com o controle autoajustado pelo CLP foi estável, com tempo de pico de 3,635 s, tempo de subida de 1,2717 s e tempo de assentamento, para o parâmetro de $\pm 2\%$ (Nise, 2009), de 7,651 s, porém obteve-se um sobressinal significativo de 42,53 %.

Como a interface do Painel de Controle dá a liberdade ao usuário de parametrizar o controlador e com base na resposta obtida da Figura 13 e no conhecimento do operador, realizaram-se ajustes empíricos no controlador para alcançar uma resposta com sobressinal amenizado. A Figura 14 mostra o resultado obtido com os parâmetros $K_p = 4,5$, $T_i = 0,95$ min e $T_d = 0,00001$ min. Os parâmetros do sinal foram: sobressinal de 6,86%, tempo de pico de 2,23 s, tempo de subida de 1,2101 s e tempo de assentamento de 2,5679 s. A saída do sistema tornou-se mais rápida e com menor sobressinal.

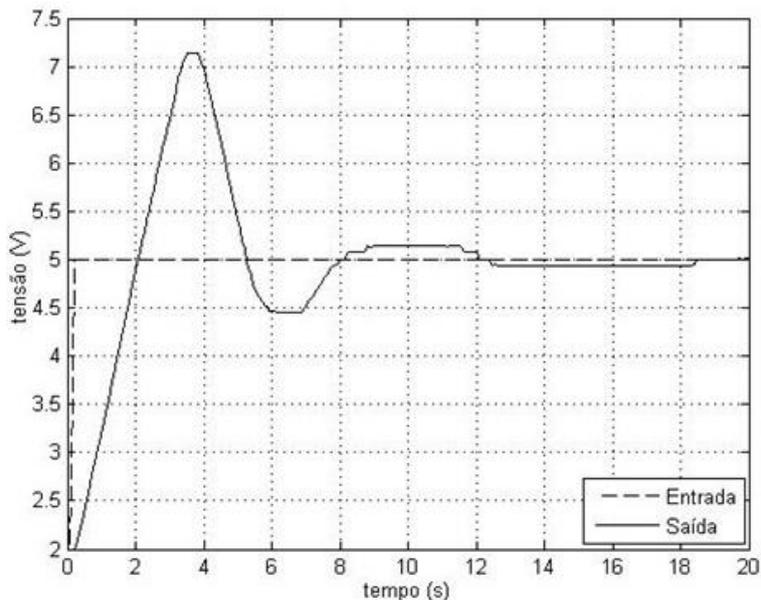


Figura 13 – Sinal de saída da planta com controlador PID auto-sintonizado pelo CLP S7-200.

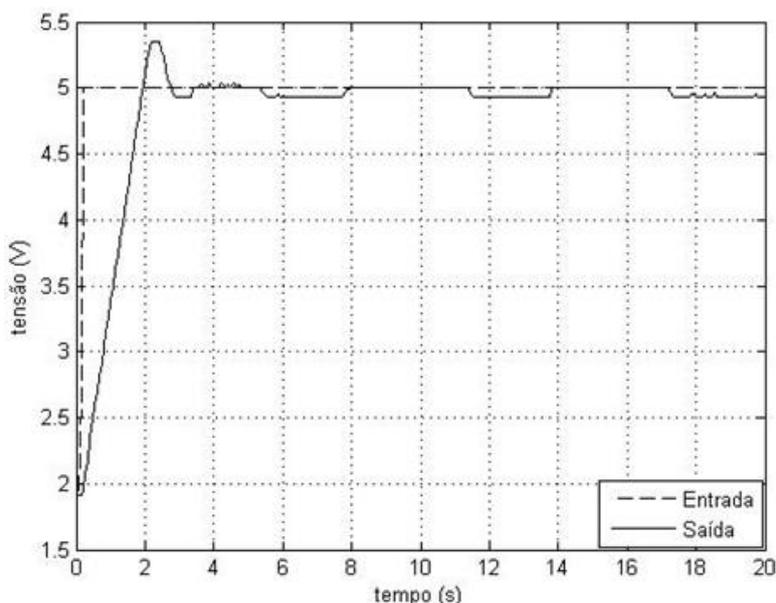


Figura 14 – Sinal de saída da planta com controlador PID após parametrização empírica.

A amenização do sobressinal deu-se pela diminuição no tempo derivativo do controlador. Desse modo, buscou-se um controlador PI para que amenizasse mais o sobressinal da saída, isto porque em aplicações de posicionamento angular, os sobressinais podem se configurar com características indesejadas. O ajuste por auto-sintonia estabeleceu os parâmetros $K_p = 5,74529$ e $T_i = 0,9129914$ min. Consoante à Figura 15, o controle autoajustado obteve uma saída estável, mas visivelmente semelhante à resposta da Figura 13. O sobressinal foi de 42,53%, tempo de pico de 3,43 s, tempo de subida de 1,2251 s e tempo de assentamento de 11,0716 s. O controlador PI fez com que o sistema tivesse uma resposta mais rápida com um valor de sobressinal igual ao do controlador PID, no entanto, o sistema tornou-se mais lento para assentar-se porque o sinal possuiu oscilações que fizeram com que o sinal saísse dos limites de $\pm 2\%$. Em um limite de $\pm 5\%$ do valor final, ambas as respostas teriam tempos de assentamento próximos.

Ao realizarem-se ajustes empíricos nos parâmetros do controlador PI com base na resposta obtida pela auto-sintonia, estabeleceu-se a seguinte parametrização: $K_p = 5$ e $T_i = 1,5$ min. A resposta obtida pode ser visualizada na Figura 16.

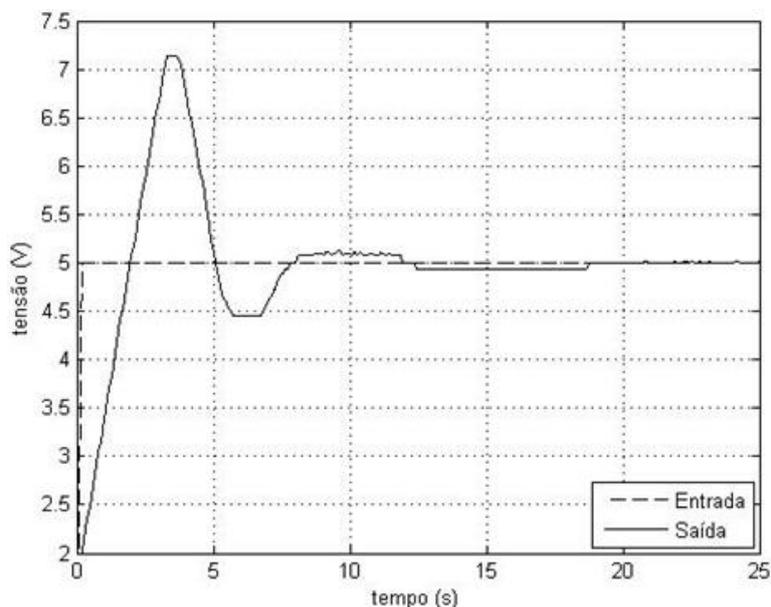


Figura 15 – Sinal de saída da planta com controlador PI auto-sintonizado pelo CLP S7-200.

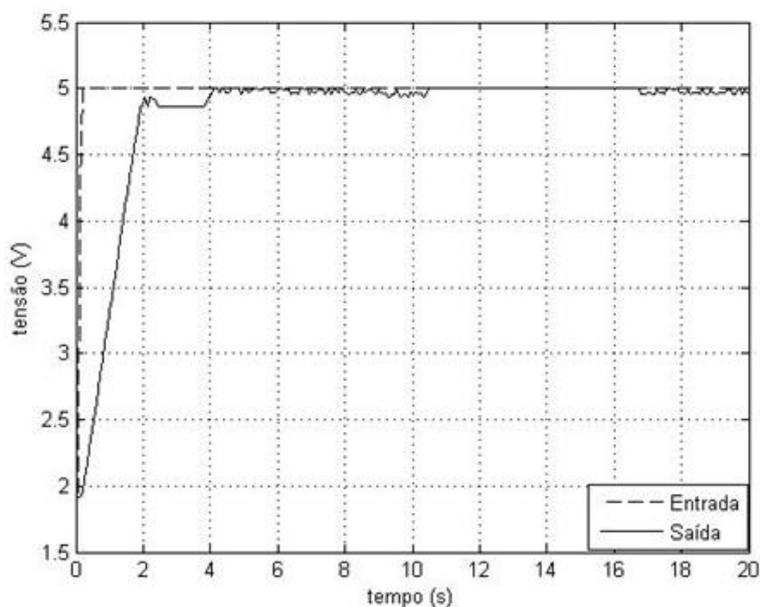


Figura 16 – Sinal de saída da planta com controlador PI após parametrização empírica.

Com esses parâmetros, o controlador PI, após os ajustes empíricos, apresentou-se como ideal na aplicação de posicionamento angular, pois nesse caso, não se obtivera sobressinal e o erro de regimento permanente, ocasionado possivelmente por uma pequena zona morta do potenciômetro motorizado, foi amenizado. O tempo de subida foi de 1,2267 s e o tempo de assentamento de 3,8234 s.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho analisou-se a aplicação das ações proporcional, integral e derivativo de controladores auto-sintonizáveis em uma planta de posicionamento angular. Descreveu-se o método de auto-sintonia de controladores, o qual baseia-se no método do relé desenvolvido por Aström e Hägglund, e apresentou-se os modelos matemáticos do controlador PID ambos incorporados ao CLP S7-200 da empresa Siemens.

Conforme os resultados apresentados, o método de auto-sintonia do CLP mostrou-se uma técnica eficiente no quesito de parametrização inicial de controladores, pois obtiveram-se saídas estáveis em malha fechada. Nota-se que, geralmente, técnicas de sintonia de controladores PID são métodos iniciais para o ajuste dos parâmetros do controlador, o que em sua grande maioria, necessitará, posteriormente, que o programador faça modificações finas nos parâmetros para buscar-se uma otimização na resposta.

Para a planta de posicionamento angular, os controladores PID não apresentaram resultados ótimos à aplicação por possuírem sobressinais na saída da planta, fato ocasionado possivelmente pela ação derivativa. Assim, aplicou-se controladores PI para amenizar os sobressinais e, conseqüentemente, obter respostas mais adequadas.

REFERÊNCIAS

ANG, K. H.; CHONG, G. C. Y.; LI, Y. *PID Control System Analysis, Design, and Technology. IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 14, n. 4, p. 559-576, 2005.

ASTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 1st ed. Instrument Society of America*, 1995.

ASTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. *Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins. Automatica*, v. 20, p. 645-651, 1984.

BAZANELLA, A. S.; SILVA JR., J. M. G. *Sistemas de Controle: Princípios e Métodos de Projeto. 1a ed. UFRGS Editora*, 2005.

BENNET, S. *Nicolas Minorsky and the Automation Steering of Ships. Control Systems Magazine*, v. 4, p. 10-15, 1984.

BOLTON, W. *Programmable Logic Controllers. 4th ed. Elsevier*, 2006.

BRYAN, L. A.; BRYAN, A. E. *Programmable Controllers: Theory and Implementation. 2nd ed. Industrial Text Company*, 1997.

CARDOSO, P. M. *Estudo, Proposta e Avaliação de Novas Metodologias de Sintonia Automática de Controladores PID Baseados no Ensaio do Relé Alimentado. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia*, 2002.

COELHO, A. A. R.; COELHO, L. S. *Identificação de Sistemas Lineares. 1a ed. Editora da UFSC*, 2004.

COLOGNI, M. A. *Estudo e Avaliação de Metodologias de Auto-Sintonia de Controladores PID Visando Uma Implementação em Controlador Industrial. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina*, 2008.

FRANCHI, C. M.; CAMARGO, V. L. A. *Controladores Lógicos Programáveis: Sistemas Discretos. 2ª ed. Érica, 2008.*

GEORGINI, M. *Automação Aplicada: Descrição e Implementação de Sistemas Sequenciais com PLCs. 9ª ed. Érica, 2007.*

MICHEL, H. C. C. *Implementação de uma Ferramenta para Auxílio à Sintonia de Controladores PID. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.*

MINORSKY, N. *Directional Stability of Automatically Steered Bodies. Journal of the American Society of Naval Engineers, v. 34, p. 280-309, 1922.*

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. *Engenharia de Automação Industrial. 2ª ed. Érica, 2007.*

NEVES, M. G. S. *Auto-Tuning de Controladores PID pelo Método do Relay. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa, 2009.*

NISE, N. *Engenharia de Sistemas de Controle. 5ª ed. LTC, 2009.*

PRUDENTE, T. *Automação Industrial – PLC: Programação e Instalação. 1ª ed. LTC, 2010.*

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. *Optimum Settings for Automatic Controllers. Transactions of the ASME, v. 64, p. 759-768, 1942.*