

AUTOMATIZAÇÃO E CONTROLE DE UMA PLANTA DIDÁTICA

AUTOMATIZATION AND CONTROL OF A DIDACTIC PLANT

Edinaldo Buschini¹

Rogério Máximo Rapanello²

RESUMO

O presente artigo aborda conceitos de sistemas de controle e automação, que possuem um papel importante na realização de processos industriais, resultando em uma diminuição na incidência de erro humano, aumento da produtividade, redução de desperdícios e, por isso, aceleram o desenvolvimento econômico. A todo instante a sociedade está constantemente interligada com sistemas automáticos, os quais foram desenvolvidos para facilitar as nossas vidas. As redes industriais possuem um papel importante neste processo e atualmente apresentam uma forte atuação em plantas industriais, com o intuito de conectar diversos equipamentos da automação com os dispositivos de campo, como sensores, atuadores, módulos I/O e PLC. Em sistemas de controle o algoritmo mais usado para controle de processos, é, sem dúvida, o controle PID que tem por finalidade como controlar variáveis de processo de forma automática. Para ter uma visão mais ampla do que acontece no processo, existem sistemas de supervisão que são softwares que possibilitam a alteração no processo através da tela de um computador ou IHM (Interação Homem Máquina), ou seja, é um software e não um sistema de controle. Neste estudo será realizada a automação de uma planta didática, com a utilização de diversos equipamentos industriais, como PLC Siemens, Inversor de Frequência WEG e transmissores de nível, possibilitando assim a verificação do comportamento de uma malha de

¹ Graduação em Engenharia Elétrica no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: edinaldobuschini@hotmail.com.

² Docente do Curso de Engenharia Elétrica no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: rogerio_rapanello@yahoo.com.br

controle através da coleta de informações online pelo sistema Supervisório Indusoft, e analisando com isto as respostas dinâmicas do processo após realização de distúrbios.

Palavras-chave: Controle PID. Malha de controle. Automação Industrial

ABSTRACT

The present article deals with the concepts of control and automation systems, that have an important role in the realization of industrial processes, resulting in a reduction in the incidence of human error, increase of productivity, reduction of waste and, therefore, accelerate economic development. At all times, the society is constantly intertwined with automatic systems, which have been developed to make our lives easier. The industrial networks have an important role in this process and currently present a strong performance in industrial plants, in order to connect various automation equipments with the field devices, such as sensors, actuators, I / O modules and PLC. In control systems the algorithm most used for process control is undoubtedly the PID control, which has as purpose controlling process variables automatically. To get a broader view of what happens in the process, there are supervisory systems that are software witch allow the change in the process through the screen computer or IHM (Interface Human-Machine), in other words, it is a software and not a system of control. In this study will be carried out the automation of a didactic plant, with the use of several industrial equipment such as Siemens PLC, WEG Frequency Inverter and level transmitters, thus enabling the verification of the behavior of a control mesh through the collected information online by the Supervisor System Indusoft, and thereby analyzing the dynamic responses of the process after performing disturbances.

Keywords: PID control. Mesh control. Industrial Automation.

1 INTRODUÇÃO

A mudança sucessiva do trabalho humano para as máquinas automatizadas pode ser dividida em três períodos históricos. O primeiro momento é denominado revolução industrial, que ocorre de forma intensa em meados do século XVII e pode ser caracterizado pela invenção das máquinas movidas por agentes naturais, como

o vapor. A revolução seguinte é marcada pela utilização do petróleo e da eletricidade como fontes de energia. A terceira revolução apresentou avanços relacionados à robótica e à cibernética, empregados nos mais diversos processos industriais e que levaram ao advento da quarta revolução industrial (SANTOS, 2005).

De acordo com Cassiolato (2011), a automação possibilita um custo menor de energia e evita desperdício de matérias-primas, também promove a elevação da eficiência do processo de produção industrial, além de proporcionar maior segurança operacional. Neste contexto a competitividade das empresas está relacionada à qualidade dos produtos ou serviços disponibilizados no mercado e necessitam constantemente avaliar suas estratégias de ação em termos de qualidade do produto (MARINO, 2006).

Assim, os sistemas de controle e automação desempenham um papel importante na realização de processos industriais, resultando em uma diminuição na incidência de erro humano, aumento da produtividade, redução de desperdícios e, por isso, aceleram o desenvolvimento econômico (PIRES, 2014). O que torna o mercado competitivo, proporcionando uma melhoria contínua na produtividade das plantas industriais (CAMPOS; TEIXEIRA, 2012).

Diferentemente dos controladores eletromecânicos empregados no passado, os sistemas de controle digital empregados na atualidade são implementados a partir da programação de dispositivos, por isso não podem ser visualizados no mundo concreto. Todavia, as ações promovidas pela malha de controle causam impactos significativos no controle das operações realizadas em processos industriais (CHENG, 2016). A pesquisa realizada por Astron e Hagglund (1995) revela que cerca de 11 mil malhas de controle nas mais diversas plantas industriais observaram que 97% eram controladas com o sistema de controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo).

A invenção de um regulador centrífugo desenvolvido por James Watt por volta de 1788 introduziu o conceito de realimentação negativa que regulava o vapor de um pistão para girar a roda (LAURENTZ, 2011). Esta realização na área de controle contribuiu para que James Clerk Maxwell desenvolvesse equações diferenciais onde

demonstrou a importância dos modelos matemáticos para o controle de processos e sua teoria (ARAGÃO, 2006). Com isso, o controlador PID, surgiu em meados da década de 1950 em artigos de autoria de Kalman (ABREU, 1992).

A aplicação deste algoritmo abrange diversos segmentos industriais, apresentando aplicação no controle de processos, drivers para motores, setor automobilísticas, controladores de voo, instrumentação (transmissores), entre outros (ASTROM; HAGGLUND, 2001). Um exemplo específico disto são os CLPs (controlador lógico programável), que é constituído por uma CPU (Unidade Central de Processamento) robusta onde é possível a utilização do algoritmo PID para controle de processos como, nível, vazão, temperatura, entre outros. Existe também aqueles que apresentam o auto-ajuste das constantes do PID, reduzindo a necessidade de um profissional qualificado para ajustar (GUERRA, 2009).

O conceito atual de automação permite envolver a aplicação de técnicas computadorizadas, que permitem o aumento de produtividade com menor gasto de energia, ou seja, a utilização de uma mão-de-obra em atividades de baixa geração de valor, desperdício, tempo, entre outras (CAMPANA; OPLUSTIL, 2011).

Além disso, a estrutura de redes se expandiu das salas de escritórios para o ambiente industrial, permitindo conectar os equipamentos de campo com os de TI (Tecnologia da Informação) nos seus mais diversos setores, sendo indispensáveis no que se diz a automação na atualidade (LUGLI; SANTOS, 2014).

Tomando como base a importância que a automação apresenta no cenário industrial, o objetivo deste estudo é o de automatizar uma planta didática empregando um protocolo de comunicação adequado com o propósito de avaliar a resposta dinâmica do processo com o controlador PID no controle da variável de processo nível.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Automação industrial

A todo instante a sociedade está constantemente interligada com sistemas automáticos, os quais foram desenvolvidos para facilitar a vida. As mudanças que ocorrem devido ao advento da automação industrial podem não estar presentes para muitos que não tem a convivência no ambiente industrial, todavia o desenvolvimento da automatização das fábricas também se faz presente nos bancos, no comércio, otimizando o atendimento (VILELA; VIDAL, 2003).

2.1.1 Nível das máquinas, dos dispositivos e dos componentes da planta

Segundo Lugli (2011), as tecnologias computadorizadas têm o objetivo de elevar a qualidade do produto e reduzir custos com manutenção, o computador empregado em tais operações é denominado CLP.

Segundo Petruzella (2014), os CLPs empregados na automação de processos industriais referem-se a um computador industrial moderno capaz de realizar várias tarefas ao menos tempo de forma cíclica. Projetado para suportar os desafios da indústria em termos de imunidade de ruído elétrico, vibração, temperatura, basicamente é um computador digital com a função de controlar as máquinas, sendo capaz de realizar aplicações como, cálculos, contagem, temporização, comparação e processamento de sinais analógicos.

É possível encontrar diferentes marcas e modelos de CLPs disponíveis no mercado. Para uniformizar os procedimentos de fabricação dos CLPs a comunidade industrial internacional estabeleceu uma norma internacional, a IEC-61131 (FRANCHI; CAMARGO, 2014). A sigla IEC refere-se à Comissão Eletrotécnica Internacional, com sede na Suíça.

Segundo a norma IEC-61131 parte 3, instituída para avaliar o projeto completo dos controladores programáveis apresenta cinco linguagens definidas para programação de CLP, dadas por: Texto Estruturado (ST), Lista de Instrução (IL),

Diagrama de Ladder (LD), Diagrama de Blocos Funcionais (FBD) e Funções Gráficas de Sequenciamento (SFC) (MARCOS et al., 2008).

2.1.2 Redes de comunicação Industrial

As redes de campo ou barramento de campo em plantas industriais surgiram com o intuito de conectar diversos equipamentos da automação com os dispositivos de campo, como sensores, atuadores, módulos I/O (input, output), controles lógicos programáveis entre outros (MARTINS, 2015). Antigamente, a comunicação de alguns equipamentos se davam através de porta serial (porta de comunicação de um microcomputador), atualmente esta comunicação passou a ser por redes e cada elemento apresenta processadores que implementam a comunicação física e lógica (ALVES, 2013).

O objetivo era desenvolver um ambiente onde fosse possível ser compartilhado, agregando agilidade; que realizasse o processamento das informações que antes era centralizado. Atualmente as redes de campo passaram a ocorrer de maneira distribuída em CLPs e dispositivos da planta permitindo monitoramento em tempo real (MARTINS, 2015). De acordo com Lugli (2011), as redes industriais são de forma técnica redes determinísticas, pois apresentam um tempo exato para a transferência de dados o que torna os sistemas de redes industriais muito atraentes.

2.2 Controle automático dos processos

Os requisitos básicos de aplicações no controle de processos industriais variam devido à diversidade de aplicações como, processos químicos, bebidas, alimentos e, o PID apresenta uma flexibilidade incrível para o controle industrial (MCMILLAN; TORRES 2012).

Conhecer o comportamento dinâmico de um processo é muito importante para selecionar o tipo de controlador e os ajustes mais adequados para aquele processo; e normalmente traduzido como modelo matemático do processo que é o

primeiro item na análise de sistemas de controle e, uma vez obtido este sistema, existem vários métodos para a análise do desempenho do sistema (GARCIA, 2017).

2.2.1 Controle a malha aberta e fechada

Em um sistema de malha aberta, a entrada do sistema depende diretamente do referencial adotado (entrada de referência), sendo um controle que não realiza correção na perturbação do sistema (DORF, 2013; NISE, 2013).

Em um sistema de malha fechada, a entrada depende tanto do referencial adotado (entrada de referência) quanto do sinal de saída da variável de processo, gerando assim um sinal de erro. Esse sinal de erro é usado para ajustar a entrada do sistema compensando o efeito de perturbação do processo (NISE, 2013).

2.3 Controlador PID por meio dos CLPs

O algoritmo mais usado para controle de processos, é, sem dúvida, o controle PID, matematicamente, ele gera um sinal atuante sobre o processo (U), somando o sinal de três operações (Multiplicação por um ganho fixo (K), a integração e a derivação no tempo) sobre o sinal de erro onde compara com o valor desejado com a medição na saída do sistema e atua no processo, enviando um sinal de correção, que por sua vez, é o elemento final de controle (MORAES; CASTRUCCI, 2015).

A característica da ação proporcional (P), Figura 1, consiste na aplicação de um ganho K_c ao sistema onde diminui o erro em regime estacionário do sistema. A rapidez na resposta é diretamente proporcional ao valor de K_c , no entanto, um valor muito alto pode levar o sistema à instabilidade (BRAUNL, 2006). Entretanto, em muitos controladores PID industriais, ao invés de determinar primeiramente o ganho, especifica-se o valor da banda proporcional, onde, quanto maior o ganho K_c menor será a banda proporcional e isto é expresso pela Equação 1 (BAZANELLA; SILVA, 2000).

$$K_c = \frac{100\%}{BP} \quad (1)$$

A saída do controlador é determinada e influenciada pelo sinal de erro e a equação

$$\dot{m} = m_0 + k_c * e$$

onde: m = saída do controlador; mA ou psi

m_0 = saída em modo manual do controlador

k_c = ganho proporcional

e = sinal de erro do controlador

A segunda ação do controlador é a integral, onde, a característica desta ação é a de eliminar o erro da ação proporcional até que não exista mais desvio. Entretanto, não é viável aplicar a ação integral de forma isolada, pois tende a piorar a estabilidade relativa do sistema, assim, ao adicionar a ação integral, o indesejável off-set pode ser eliminado ao decorrer do tempo cujo sinal de controle é dado pela Equação 2 e aplicando a transformada de Laplace obtém-se a seguinte função de transferência apresentada na Equação 3 (BAZANELLA; SILVA, 2000).

$$m(t) = m_0 * e + \frac{k_c}{T_i} \int_0^t e dt \quad (2)$$

onde:

T_i = tempo integral, geralmente dado em minutos/repetição, ou seja, o tempo necessário para a saída repetir o termo $k_c * e$.

Com o controlador derivativo, o objetivo é utilizá-lo para uma rápida correção na variável de processo, buscando um melhor tempo de resposta do regime transitório (FONSECA, 2014).

Este controle não é utilizado sozinho, com a adição do P, o controlador PD tem a função de antecipar a resposta do sistema e, somente atua se ocorrer uma oscilação e sua ação de correção é proporcional à velocidade do desvio (BAZANELLA; SILVA, 2000).

Na prática, parte dos sistemas de controle utiliza o derivativo (T_d) reduzido devido à sensibilidade da derivada ao ruído e, se o sinal de feedback do sensor for ruidoso, a derivada de resposta pode levar o sistema a instabilidade (INSTRUMENTS, 2011).

O controle PID, Figura 2, calcula inicialmente o erro entre a variável controlada e a variável de processo, a função do erro gera um sinal de controle

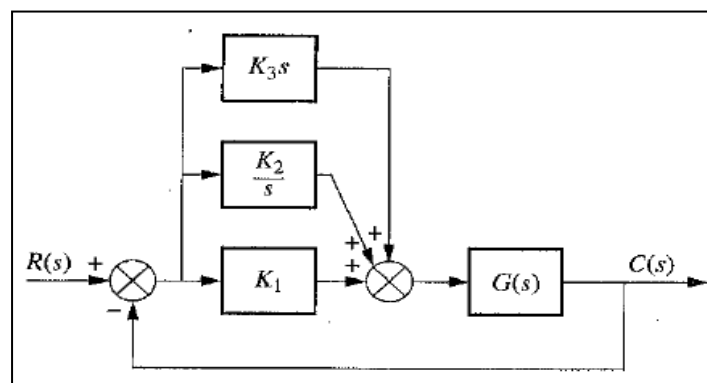
empregado para eliminar o desvio. O algoritmo PID que realiza o controle utiliza o erro em três módulos distintos para produzir a saída (variável manipulada), sendo, (P), (I) e (D) (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006). Observe a equação do controlador PID:

$$m(t) = m_0 * e + \frac{k_c}{T_i} \int_0^t e dt + k_c t d \frac{d_e}{dt} \quad (3)$$

onde:

td = tempo derivativo, usualmente dado em minutos

Figura 1 - Controlador PID



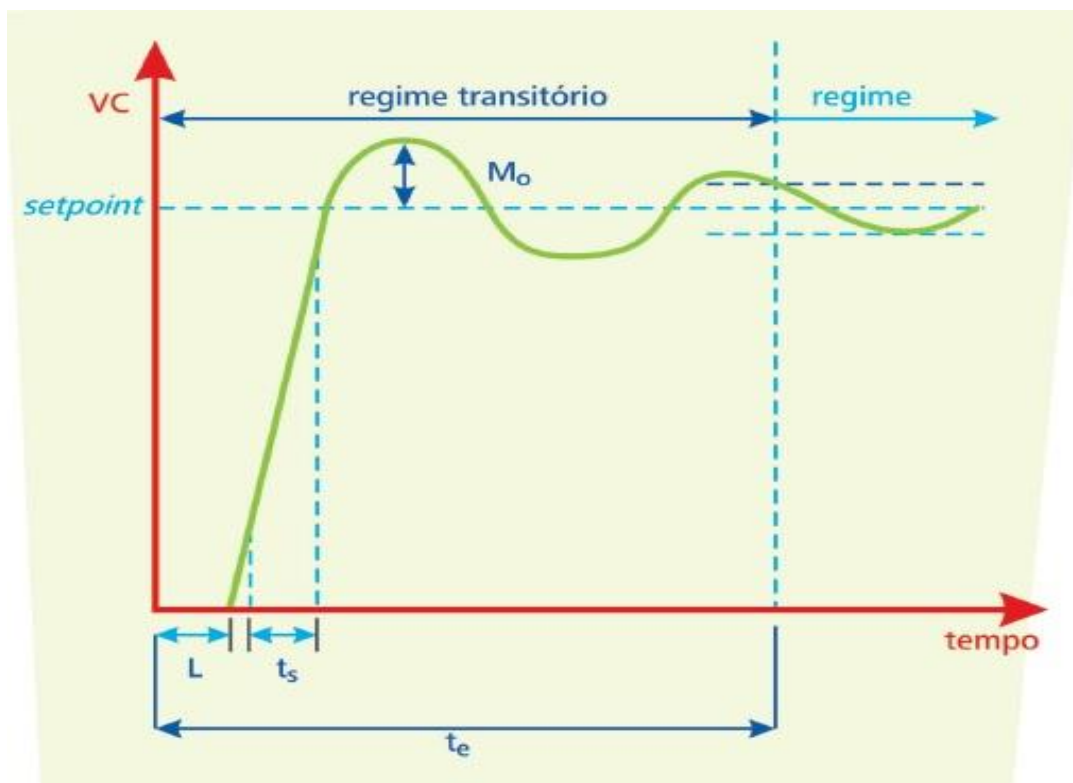
Fonte: Nise (2009)

2.4 Regime transitório, permanente e suas características

Uma resposta característica a uma mudança da variável de processo está subdividida em duas partes: O regime transitório é o momento no qual a partir da variação inicial, a variável controlada recebe uma alteração na carga e suas características podem ser, tempo de subida; amplitude máxima da oscilação e tempo de acomodação. O regime permanente é o momento no qual a variável controlada converge para um comportamento constante. Nesta etapa o objetivo é aliviar o erro (BAYER; ARAÚJO, 2012).

Abaixo está ilustrada uma resposta a este comportamento:

Figura 2 – Resposta a uma alteração de carga: regime transitório e permanente



Fonte: UFSM (2011)

Neste gráfico verifica-se as seguintes características:

Mo = pico da resposta ou overshoot: É o valor que a variável controlada ultrapassa o valor definido (Setpoint), em relação a primeira oscilação. Geralmente é expresso em termos percentuais em relação ao Setpoint.

Te = tempo de estabilização: Tempo que a variável controlada demora para alcançar 95% de seu valor em regime permanente (Setpoint). Quando o sistema apresenta uma resposta oscilatória, o tempo de estabilização corresponde ao tempo para a variável controlada se manter em $\pm 5\%$ do Setpoint.

$T_s = t_{95\%RP}$

Ts = tempo de subida: Tempo em que a variável controlada caminha de 10% até 90% do valor de Setpoint.

$$T_s = t_{90\%RP} - t_{10\%RP}$$

L = Tempo morto ou atraso: O tempo decorrido após a ocorrência de um distúrbio para começar a responder a uma variação na variável manipulada.

Para que existam oscilações no processo é necessário que exista tempo morto, pois as oscilações serão tanto maiores quanto for o ganho do controlador. Entre as causas do tempo morto, podemos nos referir a: atraso na medida da variável de processo, ou seja, o tempo em que o sensor leva para verificar que houve uma alteração, atraso na operação do atuador e até mesmo do próprio controlador (BAYER; ARAÚJO, 2012).

2.5 Supervisão do processo

O sistema supervisório são softwares que possibilitam a alteração no processo através da tela de um computador ou IHM (Interação Homem Máquina), ou seja, é um software e não um sistema de controle. Como tal, é um software que está instalado em um hardware ao qual faz a interligação com o CLP ou outros módulos de hardware. O sistema SCADA, surgiu para um melhor desempenho em termos de funcionalidade, escalabilidade, no controle dos sistemas industriais (DANEELS, 1999).

As informações da planta são geradas através de equipamentos como o CLP e centralizadas em um banco de dados do microcomputador em tempo real, isto, em uma grande variedade de plantas, e, esses dados são disponibilizados ao usuário final, que, permite animações gráficas na tela, relatórios, alarmes, nas mais diversas infraestruturas como: sistema de transporte, refinarias, manufatura, entre outros. (ABBAS; SHAHEEN; AMIN, 2015).

2.6 Instrumentos de medição

A medição de nível é muito importante nas indústrias no cenário atual, para solucionar problemas de medição em líquidos, gases, sólidos e vapores existem vários métodos que foram desenvolvidos para diferentes ambientes. Uma tecnologia

inovadora e eficiente é a medição de nível por Ultrassom, onde existe um sensor que emite uma onda sonora na direção do nível e calcula o tempo percorrido até o sinal retornar ao receptor. Com isso, para encontrar o valor do nível deve-se dividir por 2 e, sendo o nível a diferença do recipiente a vazio dado pela Equação 5, onde (v) é a velocidade do som e (t) o tempo de trânsito da onda (FRANCHI, 2015).

$$d = (v * t) / 2 \quad (5)$$

A medição de vazão se faz presente na indústria com a intenção de medir a velocidade de escoamento de um fluido, que está relacionada com a distância das paredes da tubulação por unidade de tempo onde, a movimentação das partículas envolve trabalho para aumentar ou reduzir a massa (ARAÚJO et al., 2015).

A vazão pode ser dada em volumétrica e mássica, sendo a vazão volumétrica um determinado volume de líquido que passa por um ponto em um determinado tempo e a vazão mássica é uma quantidade de massa que percorre uma seção transversal de uma tubulação por unidade de tempo. Assim, vazão volumétrica é dada pela Equação 6, na qual V é o volume de fluido e t o tempo. A Equação 7 apresenta a vazão mássica, na qual m corresponde a massa do fluido e t o tempo (FRANCHI, 2015).

$$Q = v / t \quad (6)$$

$$Q_m = m / t \quad (7)$$

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local

Para a realização da automatização da planta didática, foi verificada a disponibilidade de equipamentos no laboratório do Centro Universitário UNIFAFIBE. Dessa forma, após uma definição dos equipamentos a automatização da planta didática está sendo realizada no laboratório de controle e automação e no laboratório de hidráulica.

3.2 Descrição dos equipamentos e a comunicação entre os dispositivos

Para o projeto a alimentação do sistema é monofásica, com tensão de 220V / 60Hz. Na planta didática uma motobomba periférica 1/2cv bivolt modelo N50-AB USK será controlada através de um inversor de frequência trifásico modelo CFW500 WEG.

O processamento das informações e o controle do sistema são realizados através de um sistema de controle, o CLP S7-1200, onde, o meio físico é uma rede Ethernet e serial RS485. As informações são processadas pelo CLP e mostradas ao usuário em uma tela gráfica através de um computador, utilizando supervisório Wonderware InduSoft Web Studio Educational 8.0.

A programação do CLP foi realizada através do Software TIA Portal, o CLP apresenta um modulo de expansão e o protocolo de comunicação é o Profibus DP serial RS485. O módulo de expansão PROFIBUS DP, tem por finalidade fazer a comunicação com a remota universal, está remota apresenta entradas de tensão de 5V, o que possibilita realizar a comunicação com o Arduino uno R3 (microcontrolador), onde faz a leitura de vazão através do sensor, modelo FS-400A-G1 Flow Range: 1 ~ 60 L/min e a leitura do nível através sensor ultrassônico HC-SR04.

Com isso o microcontrolador, baseado na linguagem de programação c/c++, fica responsável por fazer a leitura dessas variáveis, onde o mesmo envia as informações para uma remota universal. A remota XM-210 DP apresenta um protocolo de comunicação, neste caso, Profibus DP, onde apresenta 16 I/Os, e sua configuração pode-se ser realizada no próprio software da Siemens Tia Portal para se comunicar do CLP.

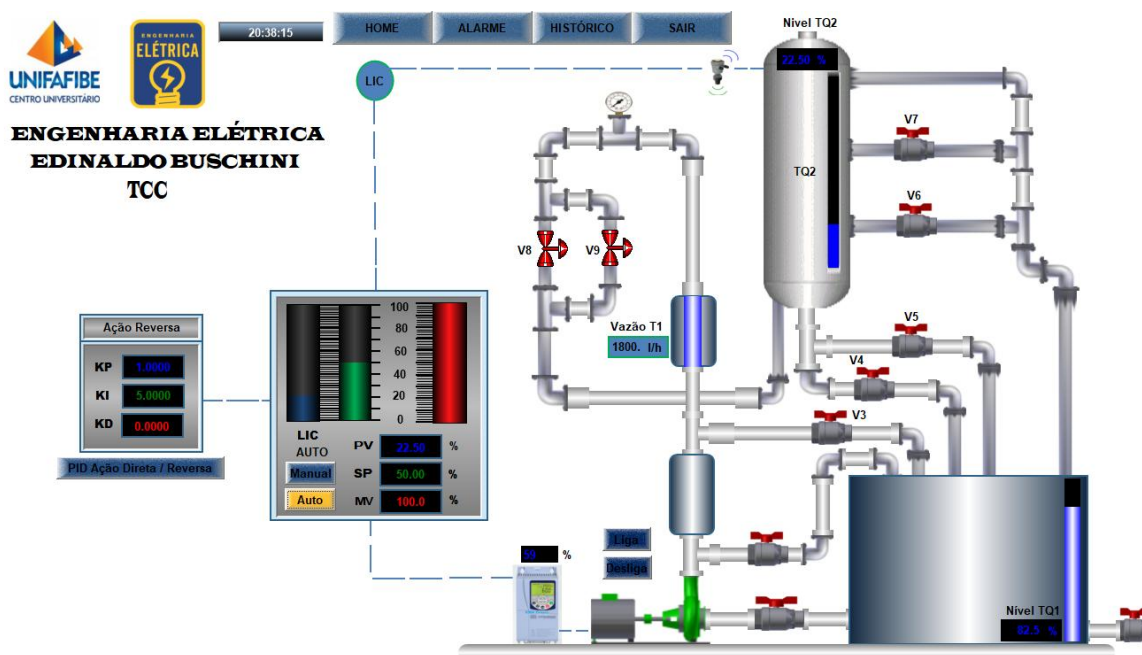
Figura 3 – Planta didática

Fonte: UNIFAFIBE

Figura 4 – Kit didático Siemens

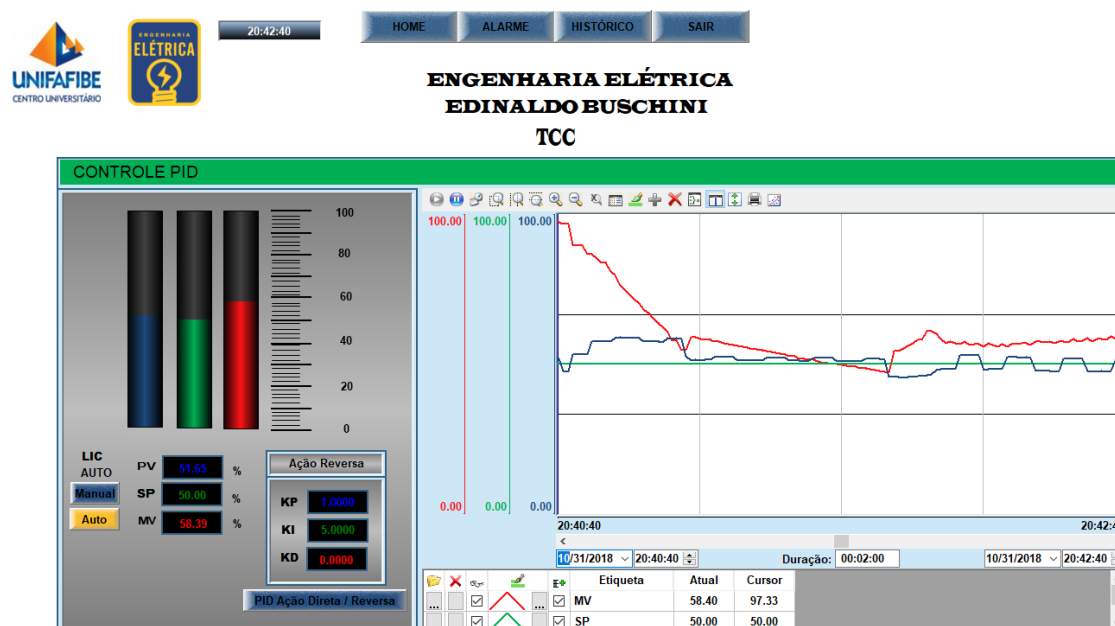
Fonte: UNIFAFIBE

Figura 5 – Supervisório Planta didática



Fonte: Elaboração própria

Figura 6 – Supervisório Planta didática controle PID



Fonte: Elaboração própria

3.3 PROCEDIMENTOS

Nesta etapa do projeto, iniciam-se os procedimentos que serão utilizados para a comunicação entre os instrumentos de campo e o supervisor para realizar o controle.

3.3.1 Configuração do software e monitoramento

A configuração do software foi feita acessando o TIA Portal da Siemens, no mesmo, foi realizada toda a programação para a leitura das variáveis, controle PID e partida do motor, bem como o monitoramento da planta didática com o apoio do Sistema Supervisor Indusoft.

3.3.2 Controle PID

O controle PID utilizado foi o PID_compact, neste bloco foi realizado as configurações para o controle da variável de processo bem como a operação do PLC, tanto em manual como também em automático e isso tudo sendo monitorado e operado na tela gráfica do software Indusoft.

3.3.3 Conversão de escalas

Para que seja possível realizar a leitura das variáveis e ser exibidas na tela gráfica do indusoft, foi utilizada uma conversão de escalas, em que os limites máximo e mínimo são definidos através do bloco lógico NORM_X (Normalização) e calculados para conversão no bloco lógico SCALE_X (Escala), uma vez que, os valores lidos pelo CLP são do tipo inteiro (INT) eles devem ser convertidos para real através do bloco lógico NORM_X.

3.3.4 Calibração dos sensores

Para a calibração do sensor de nível presente na planta será feito a comparação das indicações de um sistema de medição padrão com as indicações

de um sistema de medição a calibrar, ou seja, os sensores mecânicos existentes da planta.

3.5 ANALÍSE DE DADOS

Neste estudo será verificado o comportamento de uma malha de controle e para isto serão coletadas várias amostras do processo e serão analisadas as respostas dinâmicas do processo após uma mudança de carga.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para dar início a parte de controle da planta didática, a planta didática possui uma vazão de 1800 l/h. A calibração foi consistente e seu monitoramento foi realizado em três pontos, sendo, no software TIA Portal, no software do Arduino e na régua presente na planta. Conclui-se que os valores se coincidiram havendo poucas diferenças entre os mesmos, no entanto, leva-se em consideração que estamos trabalhando com um sensor que apresenta um comportamento diferente daquele que é utilizado na indústria, e por vezes o transmissor de baixo custo não apresenta uma boa repetibilidade. Com isso, deu-se início aos experimentos.

4.1 Análise do comportamento da malha de controle

Várias análises foram retiradas para verificar se a malha de controle está correspondendo ao processo. A seguir será analisado o comportamento da malha de controle em vários casos.

4.2 Análise manual

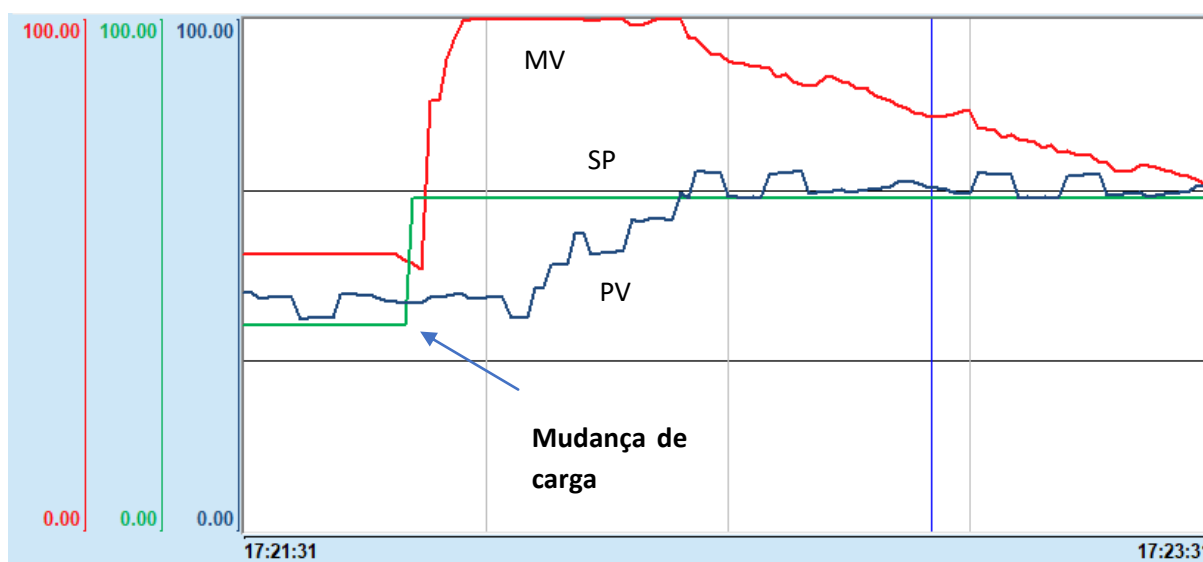
Para o ajuste dos parâmetros do PID de início, foi analisado o comportamento da malha de controle em modo manual, e de acordo com o nível definido manualmente pelo usuário, foi analisada a resposta do sistema no gráfico onde o sistema correspondeu de forma desejada para um valor definido de SP, apenas

apresentando pouco atrasos de leitura correspondente ao sensor ultrassônico por não apresentar uma linearidade eficiente.

4.3 Análises do comportamento do sistema

O sistema foi iniciado em modo manual, com uma referência de Setpoint em 40% da variável de processo, e a variável manipulada estava operando em 54% de frequência, com uma vazão de aproximadamente 980 l/h. Nesta situação a malha de controle está operando de maneira que o controle PID não atua sobre a PV, ao passar para o modo automático nessas condições, o controle PID demonstrou o seguinte comportamento com uma mudança de carga para 65% de nível.

Figura 7 – Distúrbio de Setpoint



Fonte: Elaboração própria (2018)

Legenda:

MV: variável manipulada

SP: Setpoint

PV: variável de processo

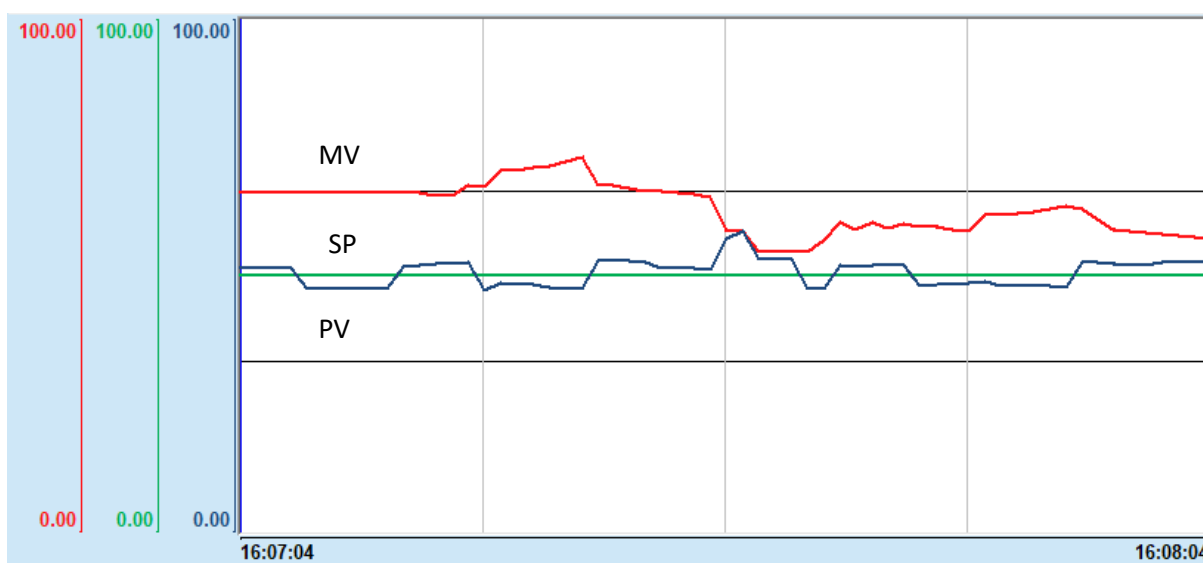
Nota-se que, a variável manipulada imediatamente apresentou um comportamento no aumento de velocidade para que a PV chegasse ao valor

desejado, e após 40 segundos a mudança de carga, a variável de processo se manteve estabilizada.

Para um Setpoint definido em 50%, com uma vazão em manual apresentando o mesmo valor, o controle PID não apresentou muitas dificuldades para continuar mantendo a PV no valor definido. Pode perceber que, como o Arduino não apresenta uma linearidade muito eficiente, em certos momentos a leitura apresentou poucas oscilações, o que acarreta no controle PID.

A seguir uma imagem ilustrativa do processo:

Figura 8 – Perda de carga MV para manter PV no nível desejado



Fonte: Elaboração própria (2018)

Legenda:

MV: variável manipulada

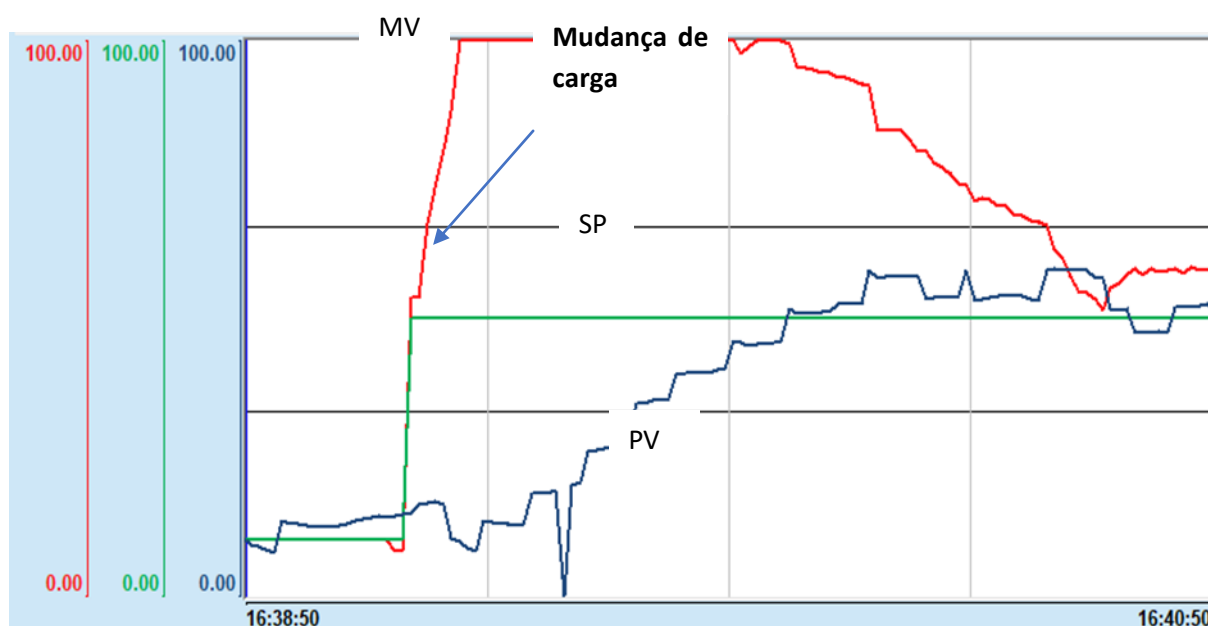
SP: Setpoint

PV: variável de processo

Nesta análise, a variável manipulada trabalhou em uma faixa entre 60% a 75% de frequência para manter o nível em 50%. Nota-se que, em modo manual a variável manipulada apresenta uma frequência acima e, ao notar uma alteração para automático, o controle atua sobre o processo diminuindo a referência MV, para estabilizar a variável de processo.

Outra análise foi realizada, com a variável de processo em 10% do nível, a variável manipulada em 10% da frequência, o controle PID foi acionado para automático com um Setpoint em 60%. Após a mudança de carga, o controlador rapidamente percebeu que o nível do tanque estava muito abaixo do Setpoint, com isso, a variável manipulada rapidamente acelerou o motor para que então pudesse chegar ao nível desejado e, de acordo com o experimento, ao a variável de processo chegar ao valor desejado, o controle PID, após 45 segundos manteve-se o processo em 60%. Segue-se a imagem:

Figura 9 – MV operando no limite para alcançar a PV



Fonte: Elaboração própria (2018)

Legenda:

MV: variável manipulada

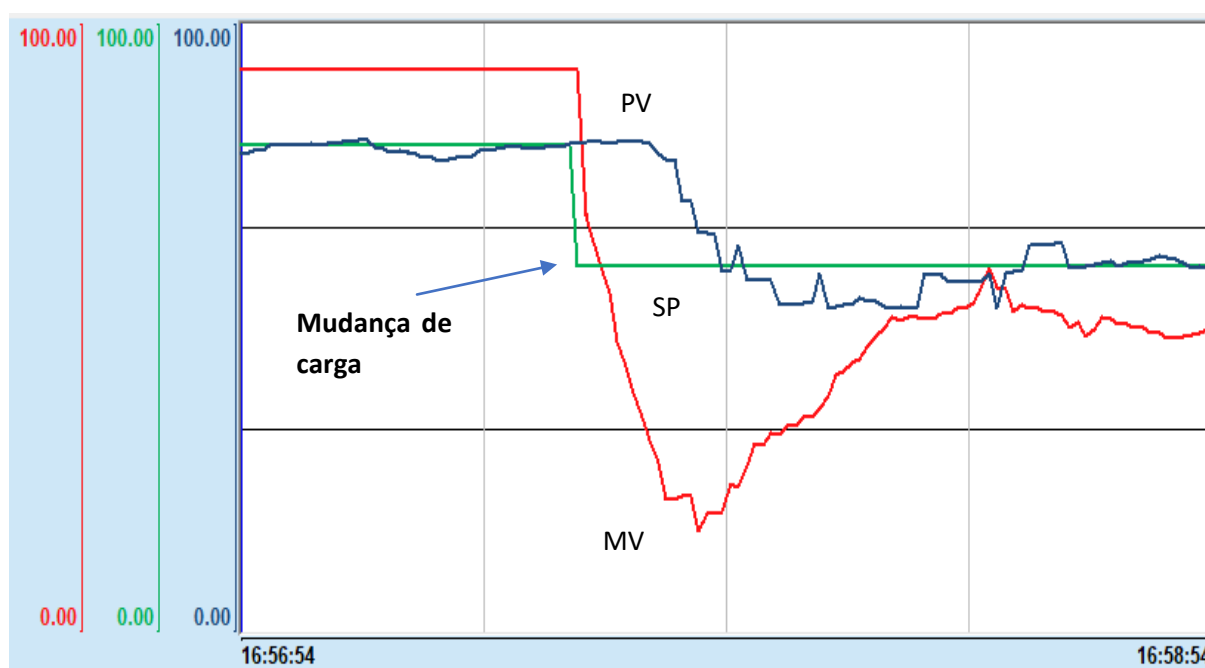
SP: Setpoint

PV: variável de processo

Outro experimento foi realizado, agora em modo manual com um nível em 80%, a variável manipulada operando em 92% de frequência e um Setpoint de 60%. Neste instante, o controle PID é passado de manual para automático, nisto, o

controle observa que o Setpoint está abaixo do nível, ou seja, uma informação é enviada a variável manipulada para uma correção na variável manipulada. Como a planta não apresenta válvulas de controle, a variável manipulada apresenta poucos segundos em que praticamente está operando em baixa frequência, após o controle perceber que a variável de processo está ficando abaixo do Setpoint o mesmo busca mantê-lo no valor desejado. Segue-se a imagem:

Figura 10 – Redução da MV para manter PV no valor do SP



Fonte: Elaboração própria (2018)

Legenda:

MV: variável manipulada

SP: Setpoint

PV: variável de processo

5 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que foi possível a automatização da planta didática utilizando equipamentos industriais como PLC Siemens S7-1200, Inversor de Frequência, Sistemas de Supervisão Indusoft e protocolo de rede industrial Profibus,

associando com equipamentos de baixo custo como o sensor de ultrassom para medição do nível. Com a implementação foi possível demonstrar o funcionamento do sistema, integrando PLC e Sistema de Supervisão e interfaceando elementos de campo, permitindo assim a análise do funcionamento de um controle PID. No entanto, vale ressaltar que o transmissor de ultrassom não possuiu uma repetibilidade adequada, e por vezes realiza medições indevidas. Ainda assim foi possível constatar o correto funcionamento do PID. Sugere-se para futuras pesquisas na planta didática, a substituição do transmissor de ultrassom, por algum equipamento industrial, assim como a instalação de um transmissor de pressão diferencial para medição de vazão, e com estas melhorias, é possível avançar com a análise dedicada às malhas de controle e ajustes adequados do PID a partir do levantamento da função de transferência da planta didática. Conclui-se o uso de plantas didáticas neste processo educacional permitem alto índice de aprendizagem, porque permite ao futuro engenheiro realizar testes e analisar diversas possibilidades, antes de aplicar em um ambiente industrial.

REFERÊNCIAS

ABBAS, Hosny; SHAHEEN, Samir; AMIN, Mohammed. Simple, Flexible, and Interoperable SCADA System Based on Agent Technology. **Intelligent Control And Automation**, Egito, v. 6, n. 03, p.184-199, ago. 2015.

ABREU, Annibal Hoeschl. **Implementação de um controlador PID auto-ajustável baseado em reconhecimento de formas de onda**. 1992. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1992.

ALVES, Jose Luiz Loureiro. **INSTRUMENTAÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013.

ARAGÃO, Marcelo Escobar. **Abordagem flexível, robusta e estruturada para o projeto de controladores PID multivariáveis**. 2006. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

ARAÚJO, Alessandro Felipe et al. **MEDIÇÃO DE VAZÃO: CONCEITOS E MÉTODOS DE MEDIDAS**. 2015. Disponível em: <<http://jomar.pro.br/wp/wp->

content/uploads/2015/09/Artigo-sobre-Medidores-de-Vazão.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2018.

ÅSTRÖM, K.J. AND T. HÄGGLUND. **The future of PID control**. Control Engineering Practice, 2001.

BAYER, Fernando Mariano; 2011, Olinto César Bassi de Araújo. **Controle Automático de Processos**. 2011. Disponível em: <http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos_automac/a/ouquinta_etapa/control_automat_2012.pdf>. Acesso em: 15 set. 2018.

BAZANELLA, Alexandre Sanfelice; SILVA, João Manoel Gomes da. **Ajuste de Controladores PID**. 2000. Disponível em: <<http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/apostila.html>>. Acesso em: 23 mar. 20018.

BRAUNL, Thomas. **EMBEDDED ROBOTICS: Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems**. 2006.

CAMPANA, Gustavo Aguiar; OPLUSTIL, Carmen Paz. Conceitos de automação na medicina laboratorial: revisão de literatura. **Jornal Brasileiro de Patologia e Medicina Laboratorial**, v. 47, n. 2, p. 119-127, 2011

CAMPOS, Mario Cesar M. Massa de; TEIXEIRA, Herbert C. G.. **Controles Típicos de equipamentos e processos industriais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2012.

CASSIOLATO, Cesar. **Redes Industriais**. 2011. Disponível em: <<http://www.smar.com/brasil/artigo-tecnico/redes-industriais>>. Acesso em: 10 fev. 201

CHENG, Hongtai et al. Establishing the Connection between Control Theory Education and Application: An Arduino Based Rapid Control Prototyping Approach. **The Journal of Learning and Teaching**, v. 2, n. 1, p. 67-72, 2016.

DANEELS, Axel; SALTER, Wayne. **WHAT IS SCADA?** 1999. Disponível em: <<http://cds.cern.ch/record/532624/files/mc1i01.pdf>>. Acesso em: 02 mar. 2018.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. **SISTEMA DE CONTROLE MODERNO**. 12. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2015.

FONSECA, Ronei Delfino da. **Kit Eletrônico de Apoio Didático para a Disciplina de Sistemas de Controle**. 2014. 109 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Eletrônica, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

FRANCHI, Clailton Moro; CAMARGO, Valter Luís Arlindo de. **Controladores Lógicos Programáveis: Sistemas Discretos**. 2. ed. Tatuapé: Érica, 2014. 352 p.

FRANCHI, Claiton Moro. **Instrumentação de processos industriais: Princípios e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2015. 335 p.

GARCIA, Claudio. **Controle de Processos Industriais: Estratégias Convencionais**. São Paulo: Blucher, 2017. 600 p.

GUERRA, Wladimir de Andrade. **Implementação de Controle Proporcional, Integral e Derivativo Digital em Controladores Lógico Programáveis**. 2009. 40 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Instrumentação) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

INSTRUMENTS, National. **Explicando a Teoria PID**. 2011. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3782/pt/>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

LAURENTIZ, Silvia. Sistemas autônomos, processos de interação e ações criativas. **Ars**, São Paulo, v. 9, n. 17, p.101-115, 28 mar. 2018.

LUGLI, Alexandre Baratella; SANTOS, Max Mauro Dias. **Redes Industriais: Características, Padrões e Aplicações**. São Paulo: Saraiva, 2014. 126 p.

MARCOS, M. et al. Towards the conformance Analysis of IEC 61131-3 PLC Programming Tools. **IFAC Proceedings Volumes**, Seoul, v. 41, n. 2, p.8467-8472, jul. 2008.

MARINO, Lúcia Helena Fazzane de Castro. Gestão da qualidade e gestão do conhecimento: fatores-chave para produtividade e competitividade empresarial. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 13., 2006, Bauru: Unesp, 2006. p. 1 - 9.

MARTINS, Marcos Roberto Alves. **Análise de convergência para arquiteturas para automação industrial: Abordagem de integração TA e TI**. 2015. Disponível em: <http://www.mylims.com.br/arquivos/artigos/CT-053_09.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2018.

MCMILLAN, Greg; TORRES, Hector. **EFFECTIVE USE OF KEY PID FEATURES**. 2012. Distributed with permission of author(s) by ISA 2012. Disponível em: <<https://automation.isa.org/wp-content/uploads/2012/06/ISA-AW-2012-Effective-Use-of-Key-PID-Features-Final-Paper.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2018

MORAES, Cícero Couto de; CASTRUCCI, Plínio de Lauro. **Engenharia de automação industrial: Hardware e Software, Redes de Petri, Gestão da Automação**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos, 2012. 347 p.

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013. Tradução e revisão técnica: Jackson Paul Matsuura.

OGATA, Katsuhiko. **ENGENHARIA DE CONTROLE MODERNO**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prenticehall, 2010.

PETRUZELLA, Frank D. **Controladores Lógicos Programáveis**. 4. ed. Porto Alegre: Amgh, 2014. 398 p.

PIRES, Vinícius Pereira. SINTONIA DE UM CONTROLADOR PID EM UM SISTEMA DE CONTROLE DE VAZÃO. **Revista da Graduação**, Porto Alegre, v. 7, n. 2, p.2-23, 2014.

SANTOS, Marcus Tullius Leite Fernandes dos. Automatização da produção humana e desemprego estrutural. **Prim@ Facie**: Revista da Pós-Graduação em Ciências Jurídicas, João Pessoa, v. 4, n. 7, p.135-150, 2005.

VILELA, Paulo Sérgio da Câmara; VIDAL, Francisco José Targino. **AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL**. 2003. Disponível em: <https://www.dca.ufrn.br/~a_ffonso/F_TP/DC_A_447/trabalho1/trabalho1_19.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2018.

Recebido em 3/12/2018

Aprovado em 19/12/2018