

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE TREINAMENTO PARA SINTONIA DE CONTROLADORES DE PROCESSOS INDUSTRIAIS CONTÍNUOS**DEVELOPMENT OF A TRAINING SYSTEM FOR TUNING CONTINUOUS CONTROL LOOPS IN INDUSTRIAL PROCESSES****Roberto Blanco Lorenzo¹****Sérgio Luiz da Conceição Matos²**

Data de Submissão: 15/06/2022

Data de aprovação: 28/03/2023

RESUMO

O trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de treinamento para sintonia de controladores de processos industriais contínuos, abordando a estratégia de realimentação ou *feedback* com algoritmo proporcional, integral e derivativo (PID) utilizado em indústrias petroquímicas, siderúrgicas, papel e celulose, açúcar e álcool dentre outras. O sistema de treinamento permite estudar o comportamento de processos autorregulados de primeira ordem e segunda ordem e processos integradores com a realização da sintonia do controlador. Nestes processos é possível modificar a constante de tempo da variável controlada e introduzir no sistema distúrbios, seja de alimentação ou demanda e assim estudar o desempenho do sistema de controle. Foi possível operar o sistema utilizando o conceito de gêmeo digital no qual o processo e controladores estão duplicados podendo assim realizar uma série de comparações simultâneas. A estrutura do sistema de treinamento foi baseada na arquitetura dos Sistemas Digitais de Controle Distribuído (SDCD) e utilizados os equipamentos que o compõe a saber: controlador digital, sistema de supervisão (SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*) e rede industrial de comunicação. Dessa forma o sistema permitiu estudos em disciplinas correlatas bem como livres implementações no desenvolvimento de novos recursos.

Palavras-chave: sintonia; PID; simulador; processos industriais.**ABSTRACT**

The paper presents the development of a training system for the alignment of continuous processes, addressing the feedback strategy with proportional, integral and derivative (PID) used in petrochemicals, steel industries, pulp and paper, sugar and alcohol, among others. The system allows to study the behavior of self-regulated processes of first order and second order of integrative processes by performing the tuning of the controller. In these processes it is possible to modify the time of the controlled variable and constant of power control or constant control system that cannot be changed and thus study the performance of the power control system. It was possible to operate a system using the digital twin concept in which the processor and controllers are duplicated or can perform a series of simultaneous comparisons. The structure of the training system was based on the architecture of Digital Distributed Control Systems (DCS) and the equipment that compose it,

¹ Docente da Faculdade SENAI de Tecnologia de Santos. E-mail: roberto.lorenzo@sp.senai.br

² Docente da Faculdade SENAI de Tecnologia de Santos. E-mail: sergio.lmatos@sp.senai.br

namely: digital controller, Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) and industrial communication network. In this way, the system allowed studies in related disciplines as well as free implementation in the development of new resources.

Keywords: tuning; PID; simulator; industrial processes.

1 INTRODUÇÃO

Nos processos industriais, determinadas variáveis físico/químicas devem ter valores pré-definidos controlados para a obtenção do produto acabado. É possível manter estas variáveis dentro de parâmetros seguros para preservar equipamentos, meio ambiente e principalmente vidas humanas. (CAMPOS e TEIXEIRA, 2010)

Segundo Astrom e Hagglund (1995) na pesquisa realizada em 11.000 malhas de controle o algoritmo de controle contínuo de variáveis de processos industriais mais relevante era o PID sendo encontrado em 97% dessa amostragem, muito em função da sua eficiência e a facilidade de ajuste durante o comissionamento da malha.

A pesquisa ainda indica que a estratégia de controle de realimentação ou *feedback* é usualmente utilizada para controle dos processos contínuos. Existem outras estratégias de controle chamadas de avançadas que da mesma forma utilizam o algoritmo PID como elemento central.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste estudo foi desenvolver um sistema de treinamento para sintonia de controladores de processos industriais contínuos com estratégia *feedback* e algoritmo PID.

O sistema de treinamento utilizou controladores digitais, sistemas de supervisão e redes industriais presentes nas automações encontradas nos modernos Sistemas Digitais de Controle Distribuído, fazendo assim que o discente tivesse contato com a automação encontrada no mercado.

O sistema simulou o comportamento típico das variáveis de um processo para que não fosse necessário a presença de uma planta didática nessa fase do treinamento. O intuito foi permitir que o discente ganhasse a experiência necessária para a sintonia em processos industriais reais.

1.2 Justificativa e relevância do tema

Para o estudo do controle de processos automático é fundamental a existência não somente dos instrumentos que compõe o sistema de automação tipicamente digitais, mas também de plantas de processo para prover os resultados das ações de controle propostas. Normalmente em laboratórios, são utilizadas plantas em escala reduzida também chamadas de plantas didáticas, mas que utilizam equipamentos e instrumentos reais à uma planta num ambiente fabril. A redução da escala é obtida no tamanho de tanques, vasos de pressão, diâmetro de tubulações fazendo com que os equipamentos também sofram reduções nas suas capacidades funcionais tais como bombas e aquecedores.

Em instituições de ensino tem-se o agravante dessa disciplina ter a necessidade de várias plantas para atender a demanda simultânea de alunos o que impactará num alto custo inicial de equipamentos, grande espaço físico e aumento dos custos de manutenção

no tocante a equipamentos, insumos e energia de operação.

Dessa forma o sistema de treinamento através da simulação de um processo industrial em um sistema de automação real permitirá uma quantidade considerável de alunos realizando vários estudos, ensaios e sintonias simultaneamente e não menos importante de forma segura. Uma menor quantidade de plantas didáticas pode então ser utilizada de forma otimizada reduzindo custos de projeto, manutenção e aumentando a eficiência energética do laboratório.

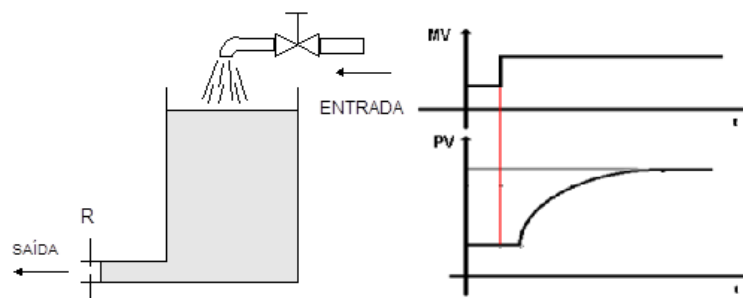
2 REVISÃO DE LITERATURA

Processos industriais podem apresentar dois comportamentos quando sofrem um distúrbio seja de entrada ou alimentação, seja de saída ou demanda: autorregulados ou integradores.

(LORENZO, 2018).

Conforme Bega (2011) processos autorregulados apresentam uma capacidade intrínseca de estabilização que a variável de processo assume após terem sofrido algum distúrbio. Pela figura 1 observa-se que após uma mudança na energia de entrada a mesma sofre uma alteração e se estabiliza em um novo valor, a menos que o distúrbio seja de uma magnitude que ultrapasse os limites do próprio processo. São ainda subclassificados em monocapacitivos ou de primeira ordem e multicapacitivos ou de enésima ordem.

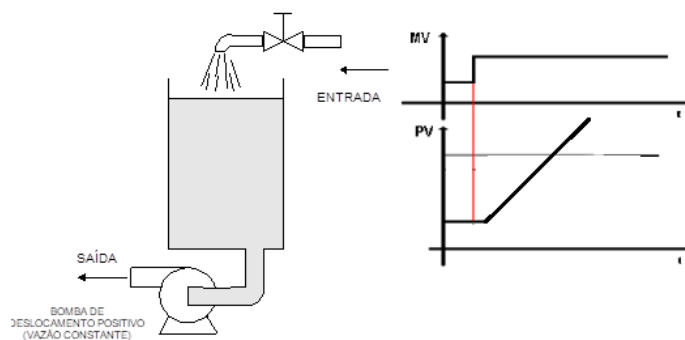
Figura 1- Curva de reação de processo autorregulado monocapacitivo



Fonte: SENAI-SP (2015)

Processos integradores são aqueles que um distúrbio leva a variável de processo para um estado de saturação como observado na figura 2. (CARRAPIÇO, 2004)

Figura 2- Curva de reação de processo integrador



Fonte: SENAI-SP (2015)

Essas curvas de resposta sofrem atrasos no tempo em função das características físicas dos equipamentos sendo tipicamente mensurados pelo tempo morto (θ) e a constante de tempo (τ). A amplitude da curva é função do ganho do processo (K). (FRANCHI, 2011)

O controle realimentado ou *feedback* é a técnica dominante usada no controle de processos. É composta por três elementos: sensor, controlador e elemento final de controle.

O sensor é responsável pela medição da variável de processo (PV) que se deseja manter dentro de limites operacionais ou de segurança.

O controlador compara a PV com um valor de referência ou *set point* (SP) e diferença desses dois valores gera o valor de erro que será a base do cálculo das três ações de correção que o controlador executará denominadas Ação Proporcional (KP), Integral (TI) e Derivativa (TD). Uma vez somadas formam o valor da saída do controlador denominado variável manipulada (MV) como descrito por Senai-SP (2016). O cálculo da resposta do controlador segundo Matos (2016) é apresentado na equação 1, sendo esse modelo de equação chamada de modelo paralelo.

$$u(t) = Kp \cdot e(t) + \frac{1}{Ti} \cdot \int e(t) dt + Td \cdot \frac{de}{dt(t)} + u0 \quad (1)$$

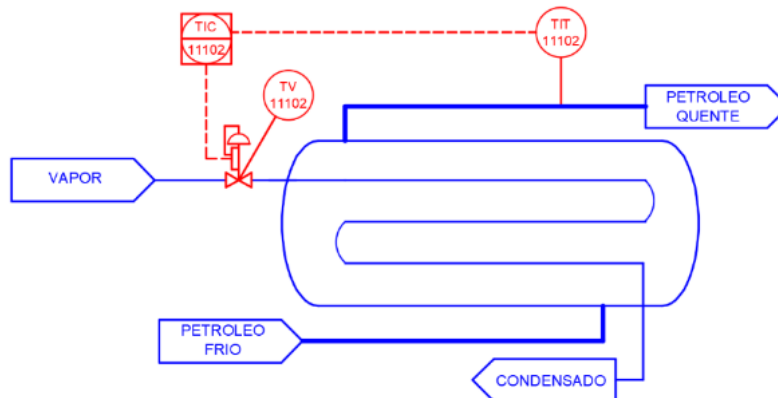
A equação 2 apresenta uma variante dessa equação chamada de modelo série ou ISA, onde a ação proporcional tem efeito nas ações integral e derivativa.

$$u(t) = Kp \cdot e(t) + \frac{Kp}{Ti} \cdot \int e(t) dt + Kp \cdot Td \cdot \frac{de}{dt(t)} + u0 \quad (2)$$

Os fabricantes normalmente adotam um modelo de equação no desenvolvimento dos controladores e alguns tem os dois modelos podendo o usuário fazer a escolha.

A figura 3 apresenta uma malha de controle do tipo *feedback* onde o produto final desse processo é o petróleo aquecido através da injeção de vapor no trocador de calor de acordo com Lorenzo (2018). Utiliza-se para representar os elementos, simbologia conforme norma da *International Society of America* (ISA) 5.1. (ISA, 2009)

Figura 3- Malha de controle *feedback* de temperatura



Fonte: Elaborada pelo autor

O controlador tem o propósito de manter uma variável no valor desejado, porém isso não se

consegue 100% do tempo pois quando existirem perturbações, elas refletiram no processo e alterarão o valor da variável controlada. O controlador então recalculará o valor do elemento final de controle para fazer que a variável retorne ao valor desejado. De acordo com Alves (2010) as ações de controle proporcional, integral e derivativa podem ser ajustadas para que a resposta do controlador seja a mais eficiente para a eliminação do erro. Nesse pensamento é mais correto afirmar que um controlador tem a função de rejeitar as perturbações do processo. (SMITH e CORRIPIO, 2008)

A sintonia de um controlador PID é justamente a determinação dos valores ótimos de correção do controlador em função desses parâmetros de tempo e ganho.

Segundo Campos e Teixeira (2010) um método bastante adotado em plantas industriais atualmente é o *Internal Model Control* (IMC) que adota equações específicas para cada tipo de processo obtendo-se ótimas respostas de controle.

Tomando como referência um processo autoregulado monocapacitivo, o IMC utiliza as equações 3, 4 e 5 para cálculo das constantes PID:

$$KP = \frac{\tau}{K(\lambda + \theta)} \quad (3)$$

$$TR = \min \{ \tau, 4(\lambda + \theta) \} \quad (4)$$

$$TD = 0 \quad (5)$$

Sendo:

KP: Ganho proporcional adimensional

TR: Tempo integral em segundos por repetição (spr)

TD: Tempo derivativo em s

K: Ganho do processo

τ : Constante de tempo em segundos

θ : Tempo morto em segundos

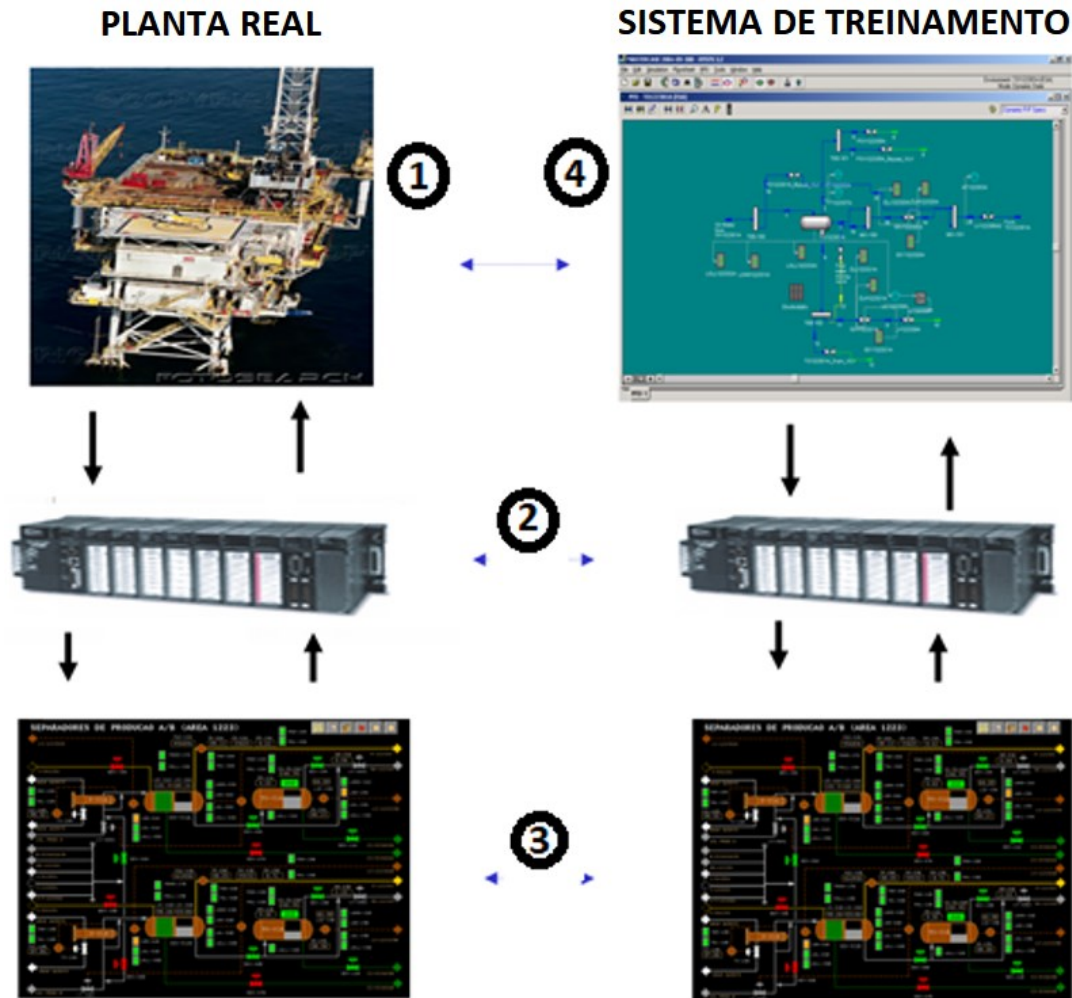
λ : Critério de desempenho deste método define o quão rápido se deseja que a variável de processo acompanhe o SP. Este parâmetro deve ser escolhido respeitando as restrições dinâmicas do processo.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento do sistema de treinamento foi elaborado a partir da topologia de um SDCD, suprimindo-se os sensores e elementos finais de controle conectados ao processo e substituídos por blocos de função que apresentam respostas semelhantes às encontradas em processos típicos. (SMAR, 2009)

A figura 4 compara as estruturas de um sistema real com o sistema de treinamento proposto.

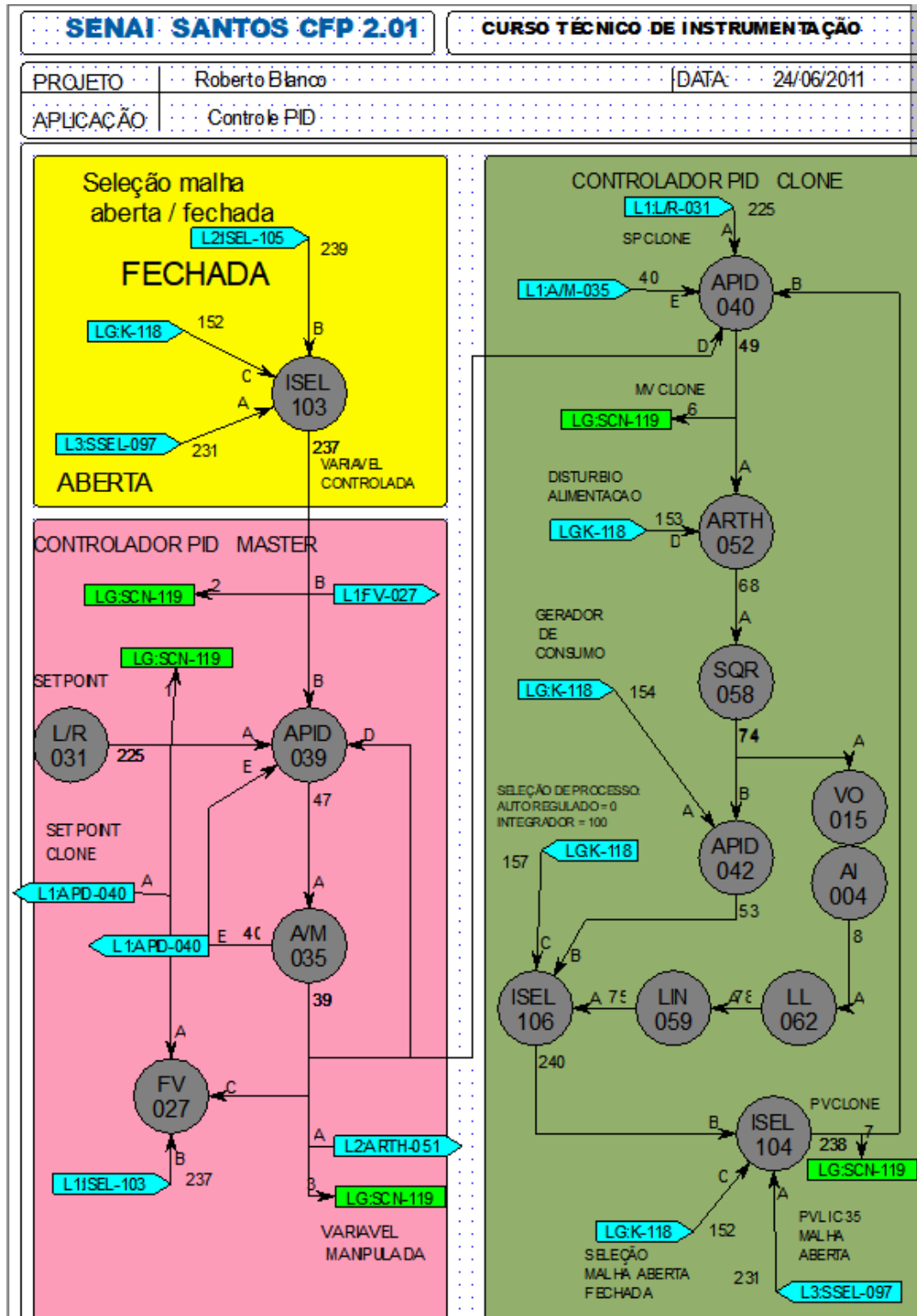
Figura 4- Estrutura de sistema real e de um simulador
 1 – Planta, 2 – Controlador, 3 – Sistema de supervisão, 4 – Simulador de processo



Fonte: Elaborada pelo autor

O controlador digital utilizado foi o CD600P do fabricante Smar em função do mesmo ter vários tipos de controladores PID em sua biblioteca e foi configurado utilizando-se linguagem de diagrama de blocos de função para realizar a estratégia de controle de realimentação e a simulação da resposta dinâmica do processo conforme apresentado na figura 5.

Figura 5- Configuração de controle feedback e simulação

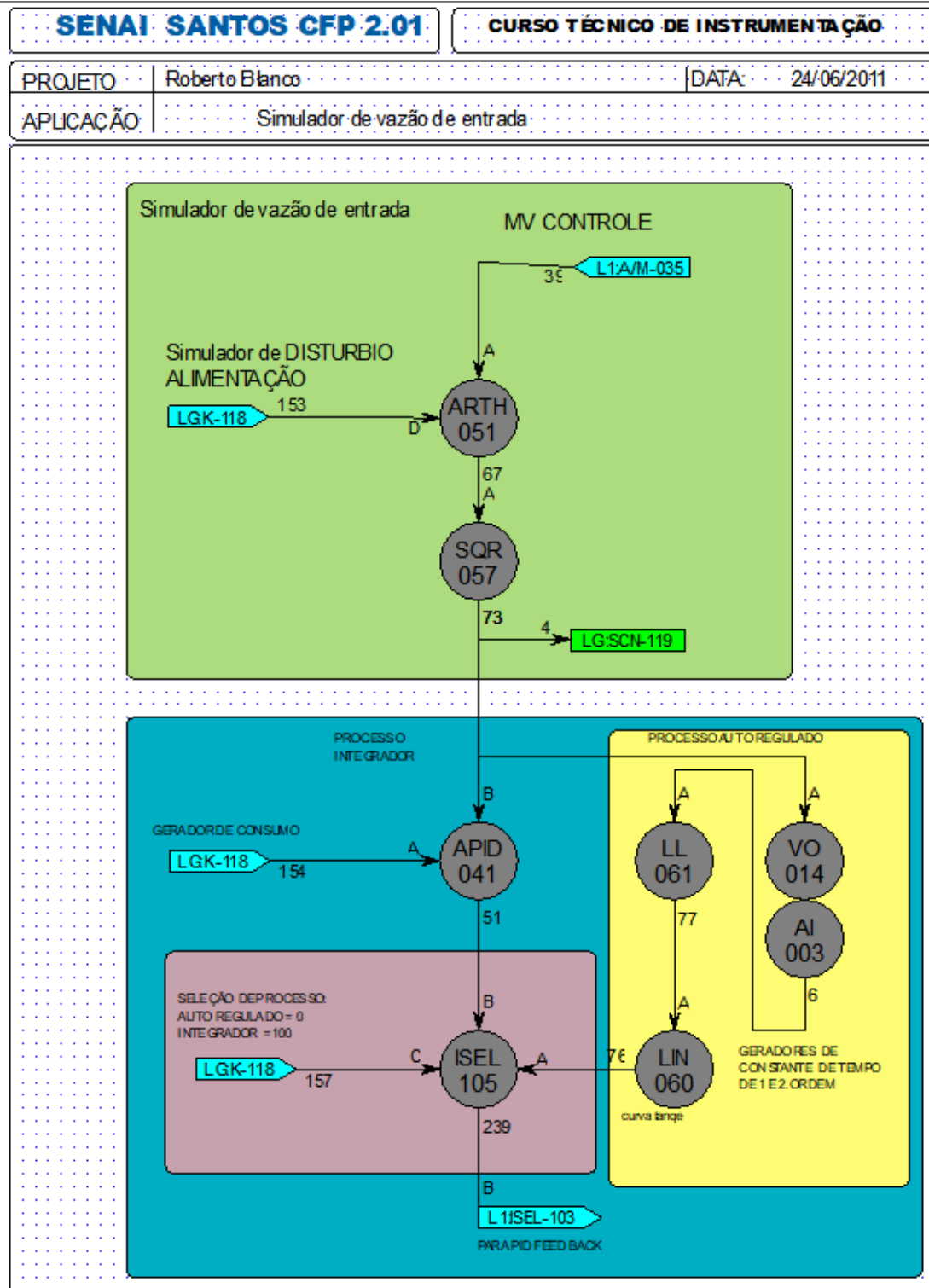


Fonte: Elaborada pelo autor

O simulador de processos foi construído no próprio controlador, devido a existência de blocos funcionais que podem ser adaptados para esse propósito. Em segundo plano essa

estratégia faz com que o sistema fique mais compacto e com custo menor. Para simular processos com resposta autorregulada de primeira ordem foram usados blocos como visto na figura 6.

Figura 6- Simulador de processo autorregulado de 1ª ordem e geradores de distúrbios de alimentação e demanda

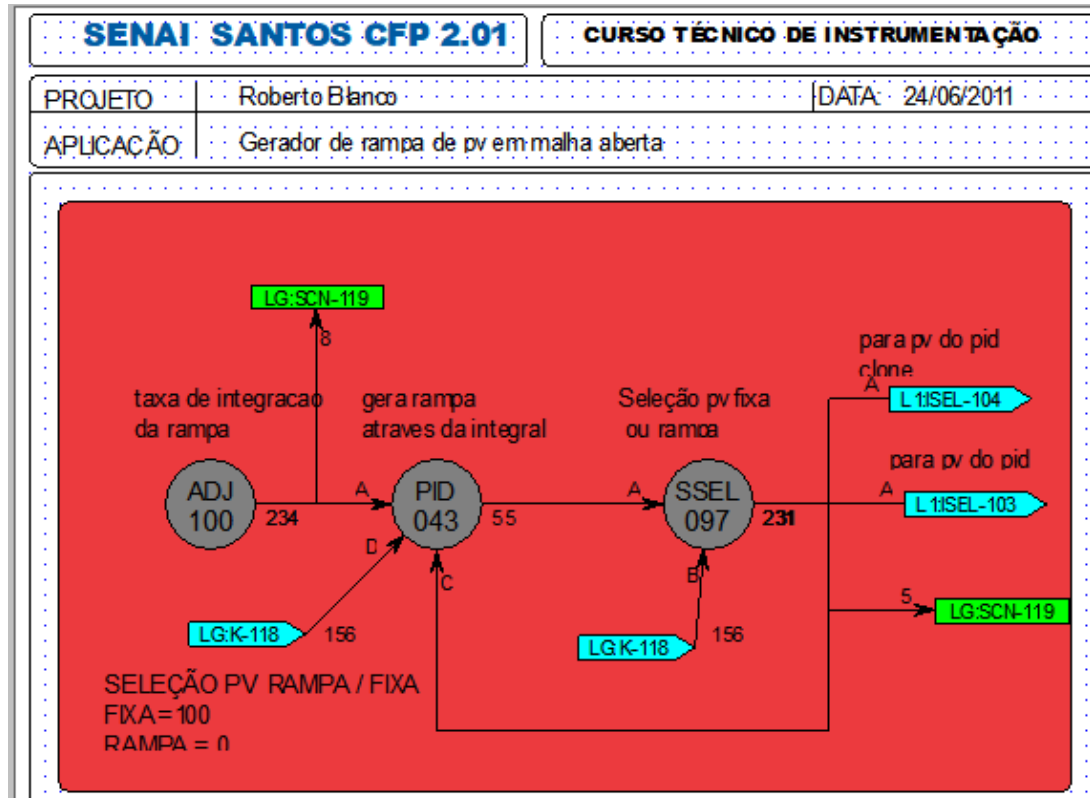


Fonte: Elaborada pelo autor

O bloco LL é um filtro de atraso de tempo de 1ª ordem, perfazendo assim a simulação de resposta de um processo dessa natureza. A constante de tempo de um processo pode ser simulada modificando o fator desse filtro através do parâmetro ATLA.

Para simular processos com resposta integrador foram usados blocos como o PID configurados somente com a ação integral, como observado na figura 7.

Figura 7- Simulador de processo integrador



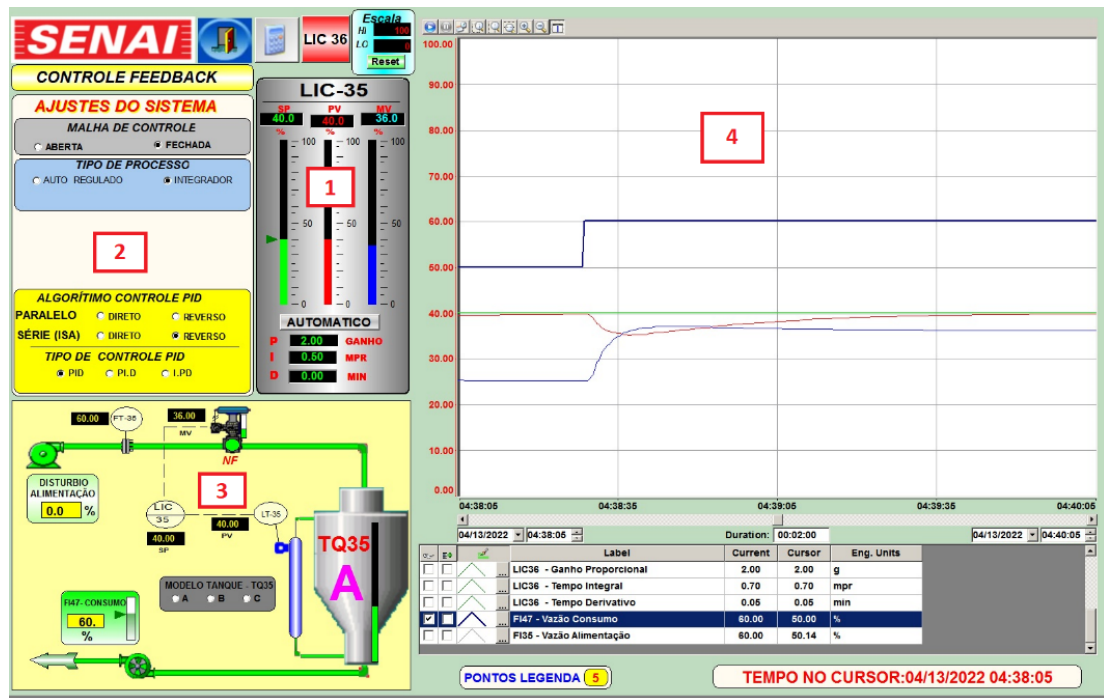
Fonte: Elaborada pelo autor

O SCADA foi criado utilizando-se o Indusoft Web Studio do fabricante Schneider (2016) em uma única tela, onde foi possível operar todo o sistema. Isto permitiu ao operador utilizar o ambiente com as informações apresentadas. Esta foi uma forma apropriada para testar o modelo de estudo. Tem-se quatro grandes áreas: *Faceplate* do controlador, quadro de ajuste do sistema, sinótico de um processo de controle de nível e registrador de tendências para análise dos dados como observado na figura 8. Na área de sinótico é possível ajustar a constante de tempo das variáveis de processo, distúrbios de alimentação e demanda.

Em função do controlador CD600 ter uma interface de comunicação industrial com protocolo *Open Platform Communications* (OPC) operando em rede RS-485 e assim incompatível com o computador executando o sistema SCADA, tornou-se necessária a instalação de uma interface de comunicação USB-i485 do fabricante Novus (2017), exibida na figura 9.

Figura 8- Estrutura da tela de operação

1-Controlador. 2- Ajuste do sistema. 3- Sinótico. 4- Registrador de tendências



Fonte: Elaborado pelo autor

O *faceplate* do controlador exibe em percentagem os valores de set point (SP), variável de processo (PV), variável manipulada (MV), modo de operação: automático/manual e as ações PID à saber: ganho proporcional (adimensional), tempo de integral (minutos por repetição) e tempo derivativo (minutos). As variáveis SP, PV e MV também contam com *bargraphs* para uma rápida análise da situação do controle.

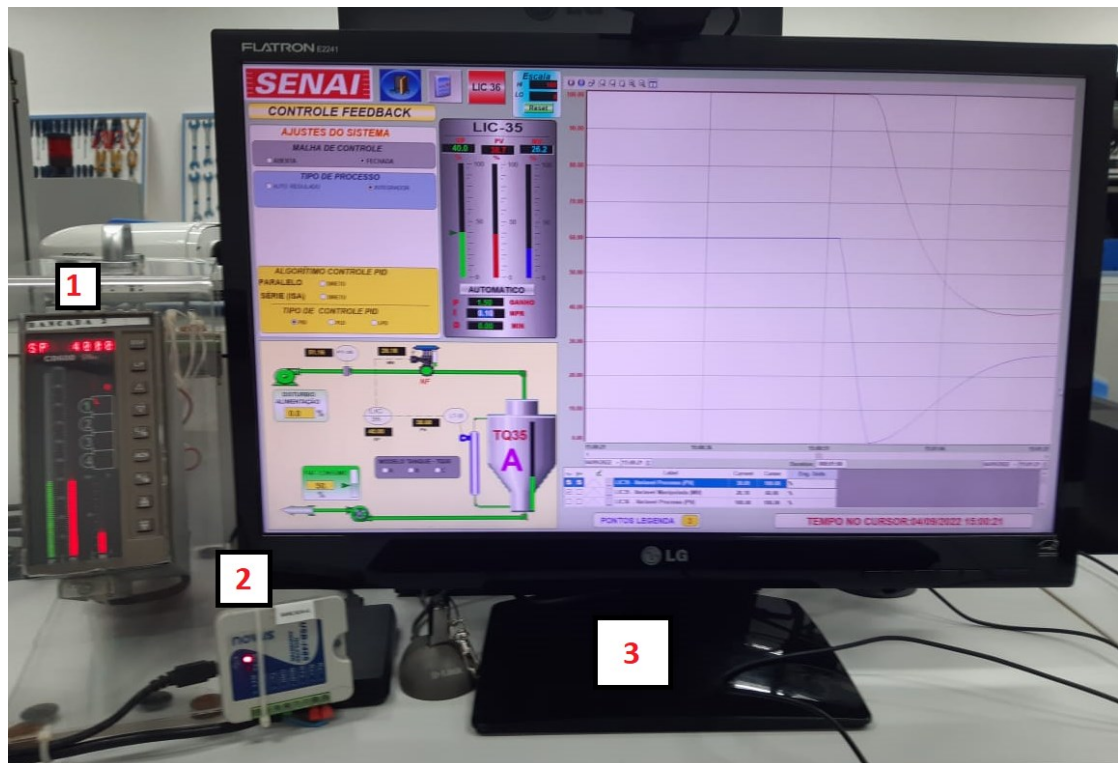
As constantes de ganho proporcional, tempo integral, tempo derivativo, *set point*, variável manipulada (desde que em modo manual) podem ser editadas sendo selecionadas com o *click* de mouse diretamente no *display* correspondente e o valor editado diretamente pelo teclado do computador ou ainda pelo *mouse* utilizando-se o *virtual keyboard*. As variáveis SP e MV ainda podem ser editadas pela utilização de um *slider* configurado ao lado do *bargraph* da variável (visível somente quando permitido). O botão A/M é editado por *click* de mouse utilizando-se botão do tipo *toggle*.

A maior parte dessa tela é dedicada ao registrador de tendências onde será feita a análise do comportamento das variáveis de processo. Esse registrador pode operar no modo histórico, aplicar níveis de *zoom* horizontais, verticais, *windows* e recuperar valores de tempo e das variáveis pelo posicionamento de um cursor sobre o ponto estudado. Os valores das variáveis podem ser coletados na tabela em tempo real abaixo do gráfico de tendências com os valores atuais e os valores sob o cursor.

Podem ser observadas nos gráficos as variáveis SP, PV, MV, AM, alimentação, consumo e ajuste das ações de controle.

O simulador em operação é apresentado na figura 9, sendo que a rede industrial utilizada na conexão de dados entre controlador e sistema de supervisão foi uma RS-485 com protocolo OPC DA. (SMAR, 2009)

Figura 9- Sistema de treinamento para sintonia de controladores controle
 1-Controlador, 2- Interface RS485, 3- Software de supervisão



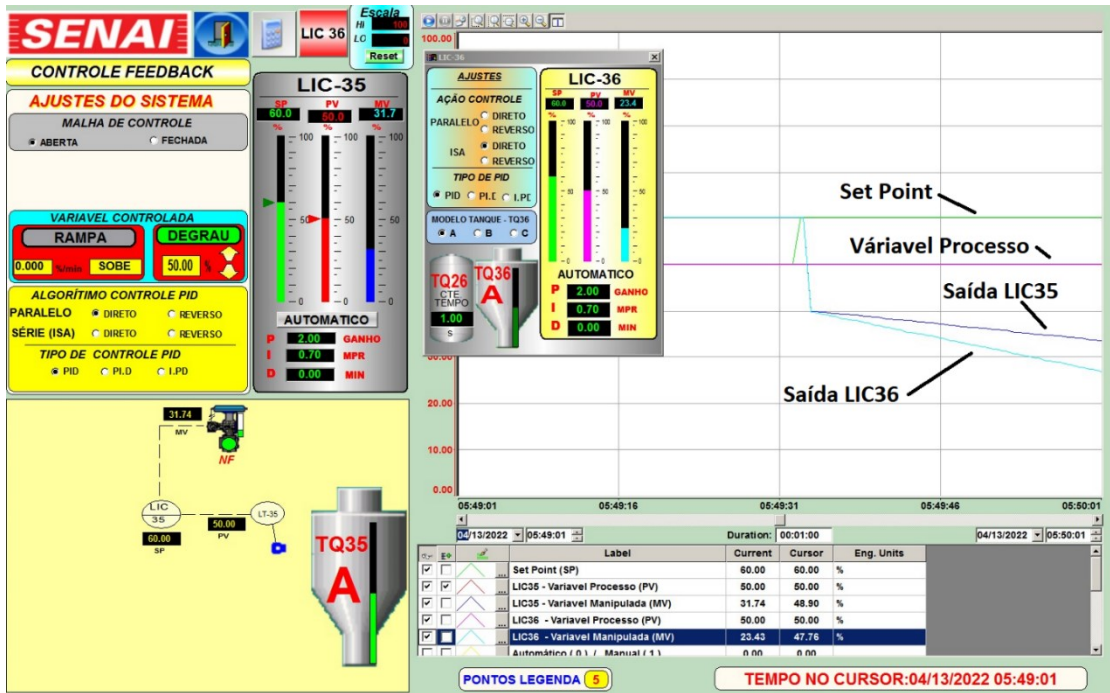
Fonte: Elaborado pelo autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema pode operar em malha aberta onde foi possível fixar valores para PV ou configurar uma rampa para se observar o comportamento do controlador PID em função do erro e das constantes nas ações de controle.

No sistema de treinamento foi construído um processo exatamente igual ao que está sendo estudado podendo ser observado pelo comando no botão LIC36. Nesse processo gêmeo digital os valores de SP, AM e MV (quando em manual) são sincronizados. Pode-se então modificar as constantes de tempo do processo e ajustes do controlador. Com isso foi possível no registrador fazer estudos comparando processos iguais com controladores diferentes ou respostas de um mesmo controlador em processos diferentes, conforme figura 10.

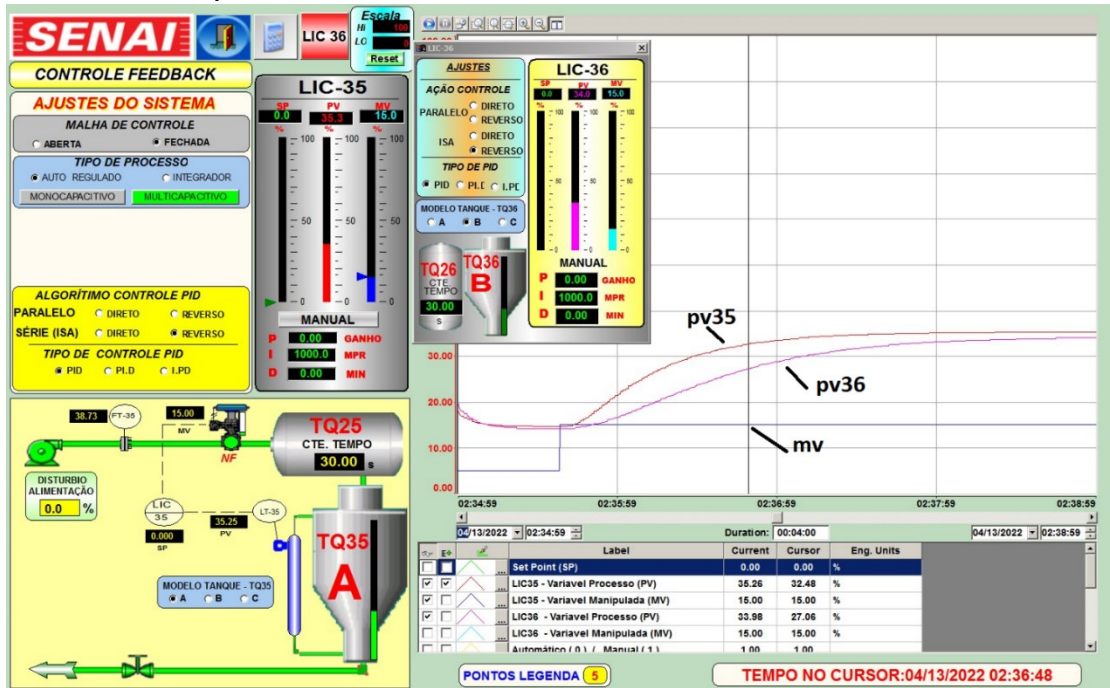
Figura 10 – Estudo de controladores com diferentes ajustes para processos idênticos



Fonte: Elaborado pelo autor

Em modo fechado foi possível escolher o tipo de processo a ser simulado: autorregulado monocapacitivo, multicapacitivo e integrador. Novamente foi possível acessar o processo gêmeo para estudos comparativos, conforme figura 11.

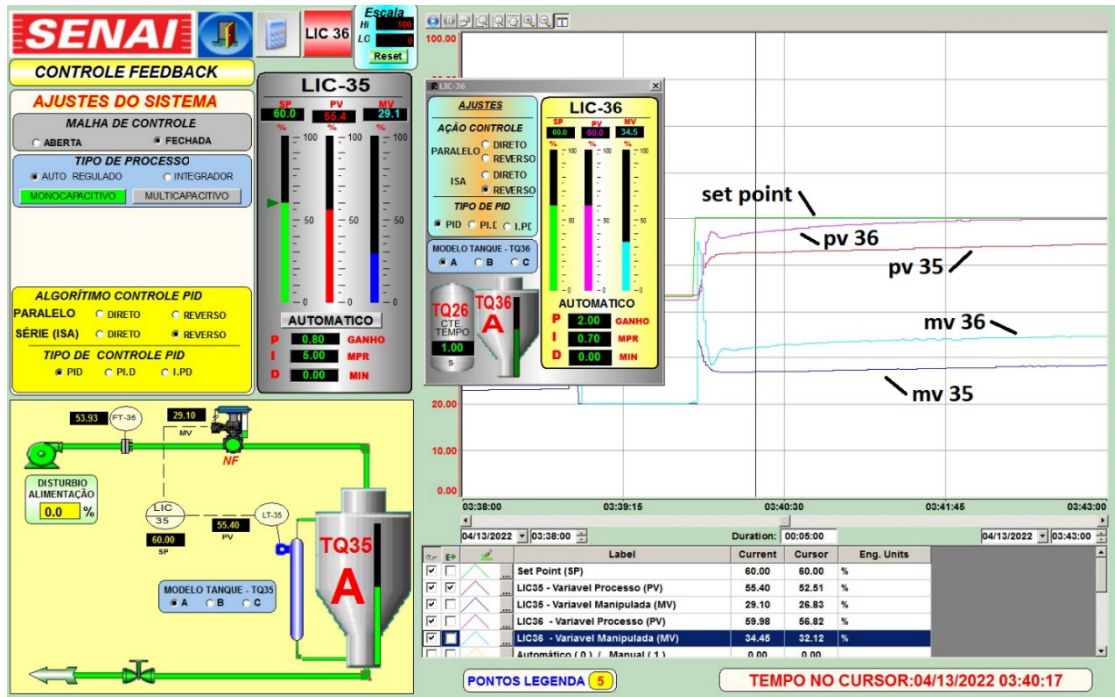
Figura 11 – Curva de reação de processos autorregulados multicapacitivos com diferentes constantes de tempo



Fonte: Elaborado pelo autor

Dessa forma foi possível gerar a curva de reação do processo e com os dados dos valores de suas constantes é através de métodos de sintonia calcular os melhores valores de KP, TI e TD e testar o desempenho no sistema, podendo sempre testar duas sintonias simultaneamente como pode ser observado na figura 12. Pode-se ainda testar efeito de ajuste do controlador em modo direto, reverso e tipo de PID: PID, PI.D e I.PD para que o sistema calcule a ação de correção em função do erro ou da própria variável tornando a saída do controlador mais suave quando se muda o *set point* em degrau.

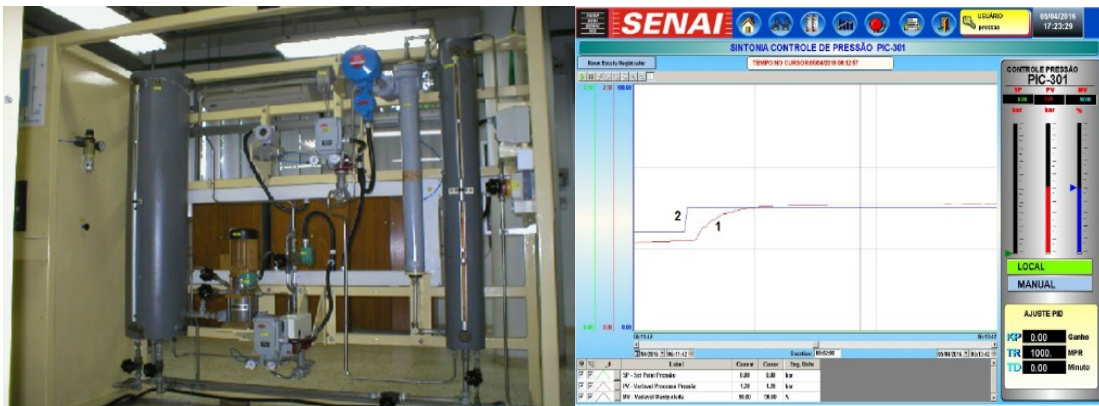
Figura 12 – Curva de desempenho de sintonias diferentes para um mesmo processo



Fonte: Elaborado pelo autor

Para testar a aderência do simulador foram levantadas curvas de reação de processos e das respostas das estratégias de controle em plantas piloto industriais para serem comparados com as respostas do sistema de treinamento em condições semelhantes. A figura 13 exibe um processo em que a variável de pressão da planta Plint tem um comportamento autorregulado de primeira ordem.

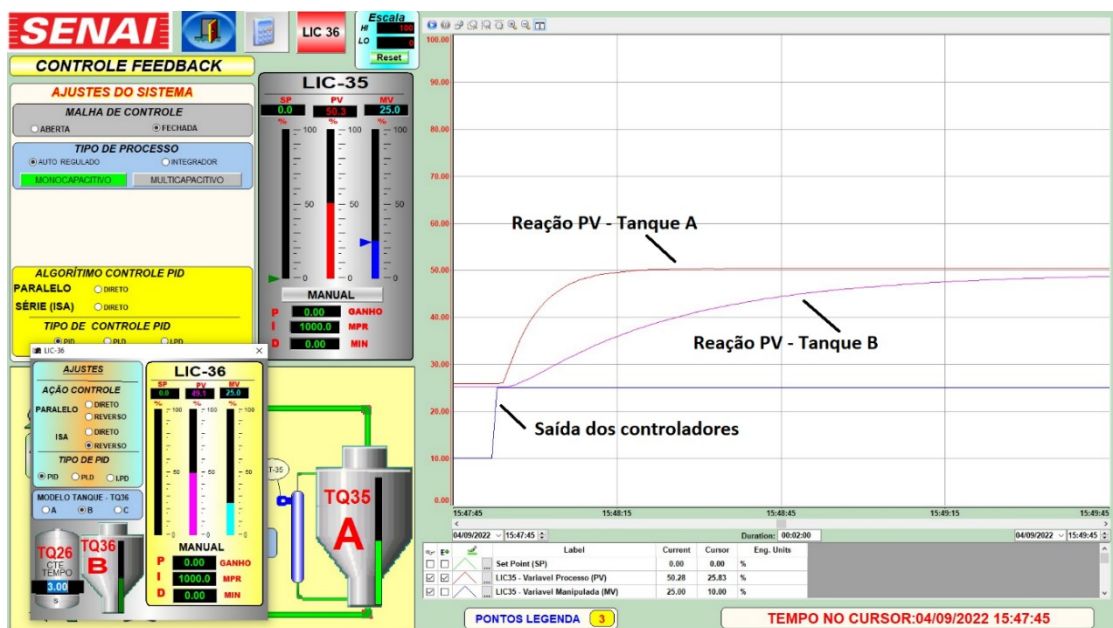
Figura 13- Curva de resposta da variável nível em processo autorregulado monocapacitivo
1- Variável de processo, 2 – Variável manipulada



Fonte: Elaborado pelo autor

Selecionando-se nos ajustes do sistema o modo malha fechada, processo autorregulado e monocapacitivo e ainda ativando o processo gêmeo foi possível verificar a aderência do sistema simulado com um processo real conforme exibido na figura 14.

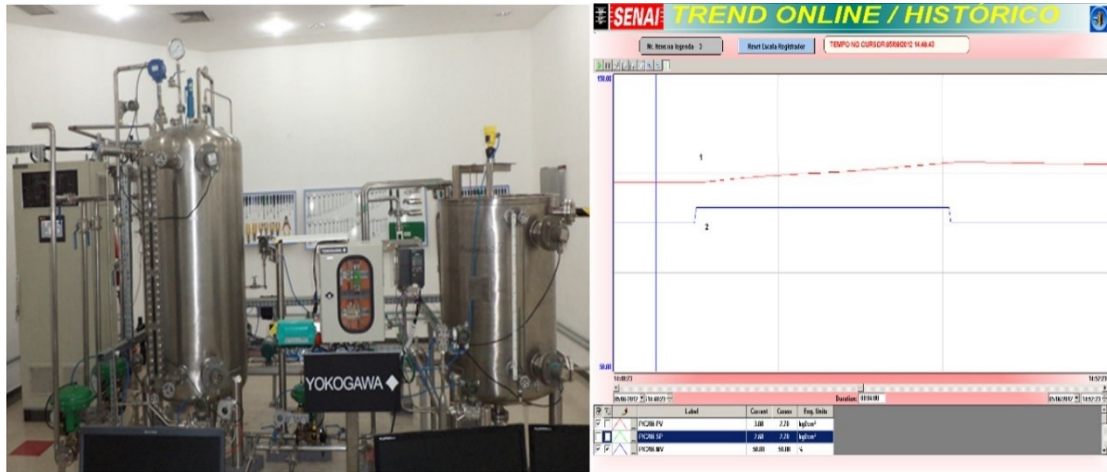
Figura 14- Curva de reação em processo autorregulado monocapacitivo em tanques com constantes de tempo diferentes



Fonte: Elaborado pelo autor

A planta piloto Yokogawa foi utilizada para o levantamento da curva de um processo integrador, no caso pressão do vaso, observado na figura 15.

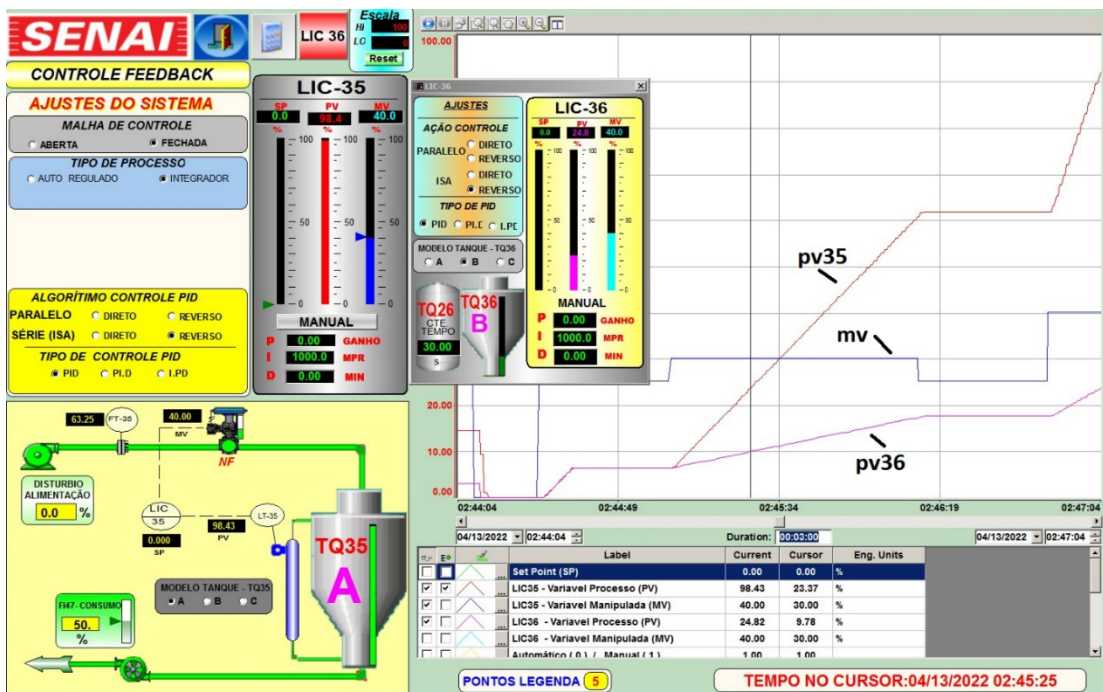
Figura 15- Resposta de processo integrador
1-Variável de processo, 2 – Variável manipulada



Fonte: Elaborado pelo autor

Selecionando-se nos ajustes do sistema o modo malha fechada, processo integrador e ainda ativando o processo gêmeo foi possível verificar a aderência do sistema simulado com um processo real conforme exibido na figura 16.

Figura 16- Curva de reação de processo integrador em tanques com constantes de integração diferentes



5 CONCLUSÃO

Na comparação de dados obtidos em plantas piloto com dados obtidos com o simulador ficou evidenciado que os modelos configurados representam o comportamento real de processos autorregulados e integradores.

As malhas de controle tiveram respostas similares a malhas de controle configuradas em sistemas digitais de controle distribuído operando em processos reais.

Dentre os vários experimentos que o sistema de treinamento pode disponibilizar, destacou-se a comparação das respostas de processos gêmeos com controladores de diferentes sintonias ou controladores gêmeos atuando em processos diferentes.

Como o sistema de treinamento é um sistema digital de controle real, foi possível sua utilização para estudo, teste do hardware do sistema instalado bem como a configuração de novos recursos no controlador digital, sistema de supervisão e rede industrial de comunicação.

Com a introdução do sistema de treinamento a partir do ano de 2012, o laboratório de controle passou de duas plantas de processo para oito estações de treinamento, para grupos de 16 alunos. Foi possível treiná-los nas técnicas de controle PID, na estratégia de controle *feedback* e a respectiva sintonia. Como fechamento da atividade os alunos realizavam a comprovação efetiva da sintonia dos controladores de processos reais nas duas plantas do laboratório.

REFERÊNCIAS

ASTROM E HAGGLUND. **PID Controllers: theory, design and tuning**. ISA, 1995.

ALVES, J. L. L. **Instrumentação, controle e automação de processos**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 201p.

BEGA, E. A. et al. **Instrumentação Industrial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

CARRAPIÇO, O. L. **Controle preditivo de horizonte infinito para processos integradores com tempo morto**. São Paulo: USP, 2004. 102p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-16122004-090825/publico/Dissertacao_Mestrado_OLCarrapico.pdf. Acesso em: 02 abr. 2022.

FRANCHI, C. M. **Controle de processos industriais**. São Paulo: Érica, 2011. 255p.

ISA. **ANSI/ISA - 5.1 - 2009 – Instrumentation Symbols and Identification**. North Carolina, USA: International Society of Automation, 2009. 128p.

LORENZO, R.B. **Desenvolvimento de Simulador com múltiplas estratégias de controle para processos industriais**. Santos: Universidade Santa Cecília, 2018, 118p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Santa Cecília, Santos, 2018. Disponível em: https://unisanta.br/arquivos/mestrado/mecanica/dissertacoes/Dissertacao_ROBERTOBLANCOLORENZO312.pdf. Acesso em: 10 abr. 2022.

MATOS, S.L.C.; et al. Recursos do controlador proporcional, integral e derivativo na automação baseada em sistemas digitais de controle. **Seleção Documental** - GLPA N.43 Ano v. 11, p. 9-14, Ed. Paralogike - Santos - SP Brasil ATC2 09/ 2016.

NOVUS. **Manual Conversor digital USB-i485**. São Paulo: Novus Produtos Eletrônicos Ltda., 2017.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL – Departamento Regional São Paulo - SENAI-SP. **Controle automático de processos**. São Paulo: SENAI-SP, 2015. 104p.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL – Departamento Regional São Paulo SENAI-SP. **Sistemas de controle**. São Paulo: SENAI-SP, 2016. 112p.

SCHNEIDER. **Indusoft Web Studio 8.0 Manual de treinamento**. São Paulo: Schneider Electric Software, 2016. 289p.

SMAR. **Manual do controlador digital CD600P**. Sertãozinho: Smar Equipamentos industriais Ltda., 2009. 194p.

SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. B. **Princípios e prática do controle automático de processo**. Tradução Maria Lúcia Godinho de Oliveira, 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 505p.

SOBRE OS AUTORES:

ROBERTO BLANCO LORENZO



Mestre em Eng. Mecânica pela universidade Santa Cecília (2018). Pós-graduado em Eng. da Manutenção pela universidade UNIP (2014) e graduação em Ciências da Computação pela universidade Santa Cecília (1995). Técnico em Instrumentação Industrial pela escola SENAI Santos (1984). Professor da Faculdade SENAI Santos no curso de Tecnologia em Automação Industrial nas áreas de sistemas digitais e redes industriais.

<https://orcid.org/0000-0001-9438-8429>

ii SERGIO LUIZ DA CONCEIÇÃO MATOS

Mestre em Eng. Mecânica pela universidade Santa Cecília (2018). Possui graduação em Eng. Elétrica pela Universidade do Vale do Paraíba (2002), Pós-graduação em Eng. de Segurança do Trabalho pela Universidade Santa Cecília (2010), Licenciatura em Física pela Universidade Metropolitana de Santos (2007) e Técnico de Instrumentação pelo Senai Santos (1989). Professor da Faculdade SENAI Santos no curso de Tecnologia em Automação Industrial. <https://orcid.org/0000-0002-5595-3947>