

PROJETO DE UMA PLANTA QUÍMICA DIDÁTICA PARA DESENVOLVIMENTO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE PROCESSOS E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

Wagner Freitas Campos – campos.fw@gmail.com
Thiago Gomes Pineli – thiago_pinelli@yahoo.com.br
Flávio Vasconcelos da Silva – flavio@feq.unicamp.br
Roger Josef Zemp – zemp@desq.feq.unicamp.br
Ana Maria Frattini Fileti – frattini@desq.feq.unicamp.br
UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Química
Laboratório de Controle e Automação de Processos
Cidade Universitária Zeferino Vaz, SN
13083-970 – Campinas – São Paulo

Resumo: A incessante busca pela qualidade dos produtos e serviços com o objetivo de alcançar a competitividade internacional trouxe ao ambiente industrial a necessidade de controle total sobre os processos, aumentando a aplicabilidade da automação industrial e do controle de processos. Na indústria atual, a teoria e a aplicação de controle de processos têm uma interação profunda com sistemas de informação e processos de fabricação, baseada principalmente na linearização da modelagem matemática dos processos. Todavia, chegou-se a um estágio em que a metodologia adotada na análise matemática, com precisão, tornou-se tarefa árdua ou até impossível para sistemas mais complexos. Desta forma, nos últimos anos tem se observado a necessidade de uma maior interação entre o ensino de Engenharia Química e técnicas industriais de controle e a automação de processos. Assim, pensando-se no atendimento desta necessidade, este trabalho baseou-se na montagem de um protótipo experimental para desenvolvimento de aulas práticas em controle de processos e automação de sistemas no curso de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). O desenvolvimento da metodologia proposta para as aulas práticas baseou-se na criação do modelamento matemático do processo real (Reator Químico e Reator de Mistura). Os dados obtidos foram manipulados através de um software específico, onde foram feitas as verificações das curvas de resposta após aplicação de um distúrbio. Os parâmetros necessários aos controladores PID (Proporcional – Integral – Derivativo) foram determinados e implementados ao modelo desenvolvido no simulador. Estes parâmetros de controle foram testados e ajustados no sistema real. A planta operou em condições similares às encontradas na realidade industrial, possibilitando ao aluno um contato com uma realidade com a qual irá conviver que geralmente não está disponível na vida acadêmica.

Palavras-chave: Reator Químico, Controle de Processos, Automação Industrial, Sistema Supervisório e Controlador PID.

1 INTRODUÇÃO

O protótipo de uma planta química desenvolvido na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP tem como principal característica, a fácil interatividade entre os alunos e os dispositivos da planta, o que permite grande facilidade operacional, tanto para visualização do processo, quanto a inserção e obtenção de dados. Outra característica importante deste protótipo é a fácil acessibilidade aos elementos de campo como, por exemplo: inversores de frequência, medidores de vazão e sensores de temperatura, o que permite rapidez e segurança na execução de manutenção preventiva e corretiva.

Desta forma, o protótipo possibilita trazer para o âmbito educacional, problemas, dificuldades e soluções normalmente encontradas no projeto, operação e manutenção de sistemas industriais. Preenche-se, desta forma, uma lacuna considerável entre a realidade e industrial e acadêmica, permitindo ao aluno de engenharia o desenvolvimento de habilidades direcionadas à área de Automação e Controle de Processos, objetivando estes a lidar com situações reais de controle e sintonia de malhas, utilizando ferramentas existentes na realidade industrial.

Com a utilização do protótipo podem-se desenvolver vários estudos práticos e teóricos tais como: desenvolvimento de modelos baseados em balanços de massa e energia, comparações entre diferentes estratégias de controle, utilização de algoritmos clássicos de modernos de controladores, desenvolvimento de controladores inteligentes e comparação entre diferentes métodos de sintonia.

Sabe-se que atualmente um dos principais problemas na implementação industrial de controladores é o desenvolvimento de uma metodologia de sintonia eficaz, devido à dificuldade de se obter parâmetros que se ajustem às necessidades reais da planta envolvida, devido principalmente às não linearidades dos sistemas reais. Sendo assim, o protótipo foi concebido na tentativa de se facilitar a obtenção de curvas características do sistema para definir parâmetros de controle e realizar estudos comparativos de sintonia.

O sistema de automação empregado é baseado na utilização de CLP (Controlador Lógico Programável) permitindo uma grande versatilidade de aplicações. Todo o sistema foi monitorado por um software de supervisão SCADA (*Supervisory Control And Data Aquisition*), onde as variáveis de processo foram armazenadas em um banco de dados para possíveis consultas, bem como, a realização de cálculos e gráficos em planilhas. Com este sistema pode-se desenvolver um controle de processo operado a distancia via internet, possibilitando o desenvolvimento de aulas práticas em uma planta real operada virtualmente.

2 PLANTA INDUSTRIAL

Na figura 1 é apresentado o fluxograma da planta química e seus principais componentes.

O tanque TQ-102 denominado reservatório de água possui capacidade de armazenamento de 100 L de água, sendo utilizado para alimentar o reator químico, a camisa do reator químico e o tanque de mistura TQ-101.

O reator químico (RQ-101) é do tipo encamisado e possuem dimensões iguais a 210 x 315 mm e medidas internas de 180 x 300 mm. O tanque de mistura TQ-101 (210 x 315 mm) é utilizado para mistura de produtos.

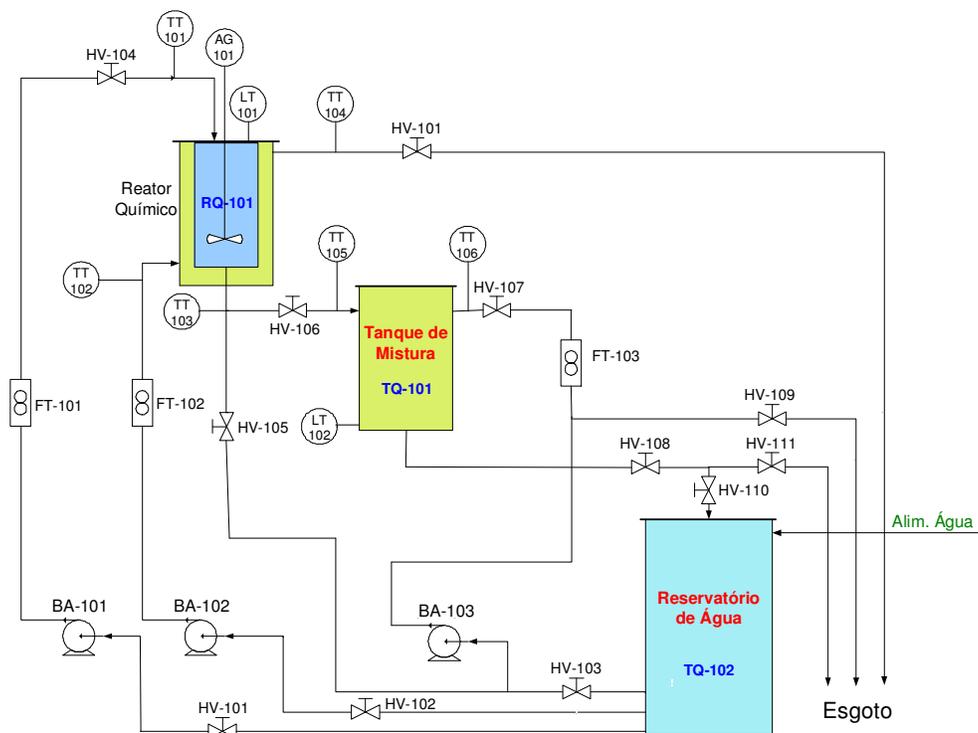


Figura 1 - Diagrama P&I (Processo e Instrumentação) da planta química.

A bomba BA-101 é responsável pela alimentação do reator RQ-101 com água que simulará a entrada de reagentes. Dentro do reator RQ-101 existem duas resistências de 3000 W que simulam o calor liberado por uma possível reação exotérmica. Estas resistências elétricas (RA-101 e RA-102) são acionadas por um variador de potência. A saída de produtos do reator é ligada diretamente ao TQ-101 ou, através do acionamento da válvula HV-105, pode ser ligada à bomba BA-103.

A bomba BA-102 alimenta a camisa do reator com o objetivo de retirar calor da reação que está ocorrendo no interior do reator. A bomba BA-103 alimenta a entrada 2 do tanque TQ-101 possibilitando assim a mistura de dois produtos.

Para o acionamento das bombas foram utilizados inversores de frequência permitindo a variação da velocidade rotacional das mesmas, bem como o acionamento remoto através das entradas digitais do controlador lógico programável.

As medidas de temperatura, vazão e nível foram realizadas utilizando-se sensores específicos para cada grandeza: sensores tipo Pt-100 para temperatura, sensores magnéticos para a vazão e sensor tipo bóia magnética e capacitivo para a determinação do nível.

O sensor de vazão magnético tem a função de medir a vazão de fluxo de água na saída de cada bomba, assim, pode-se registrar o consumo de água em cada parte do processo.

Na figura 2 é apresentado o protótipo montado no Laboratório de Engenharia Química, já em utilização nas disciplinas de graduação, onde se pode observar que durante a concepção do protótipo houve uma grande preocupação quanto à praticidade e interação entre aluno e planta, para que fosse possibilitada o ensino de controle de processos de forma mais coesa e real, aproximando o aluno da realidade industrial. Além de permitir o uso de várias ferramentas de controle e automação industrial, bem como o desenvolvimento de técnicas e soluções para possíveis problemas no decorrer das práticas envolvidas.



Figura 2 – Protótipo experimental montado no Laboratório de Engenharia Química/Unicamp.

O protótipo permite a realização de diferentes controladores, tais como: controle de nível no reator químico, controle de vazão na camisa do reator químico, controle de temperatura no interior do reator químico, controle de razão no tanque TQ-101 entre outras possibilidades.

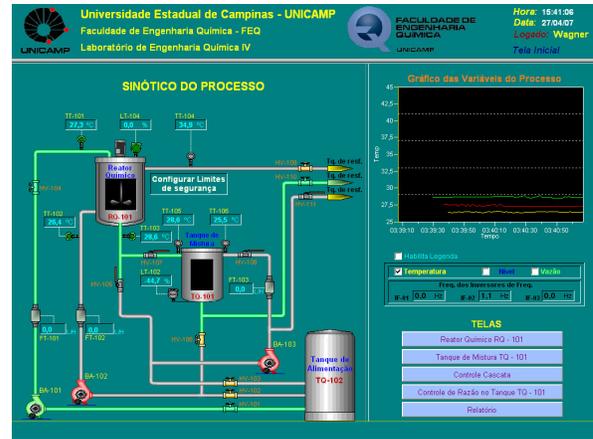
A escolha do controlador a ser utilizado é feita de uma maneira interativa através do software supervisor e a definição do lay-out utilizado no protótipo é realizada através da manipulação das válvulas.

Durante a realização das aulas práticas a estratégia de controle utilizada é definida, podendo ser utilizada as estratégias: Feedback, feed forward, controle em cascata, controle de razão e controle inteligente (controle *fuzzy*).

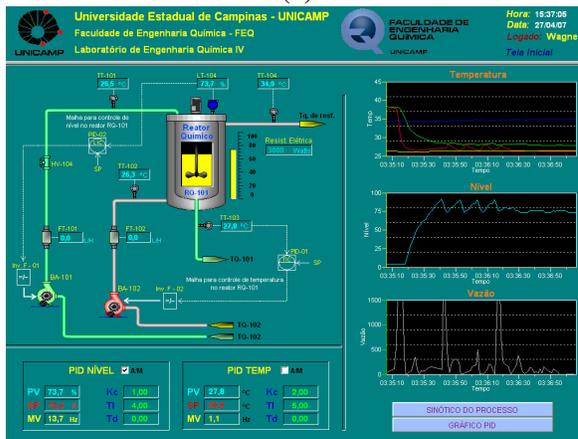
Na figura 3 são apresentadas as telas de supervisão do processo que permite aos usuários a monitoração de todas as variáveis importantes através de uma interface amigável. O desenvolvimento de telas de supervisão também faz parte da aprendizagem na área de automação, por ser esta uma ferramenta bastante difundida no meio industrial. As telas foram concebidas utilizando o sistema supervisor Elipse E3.



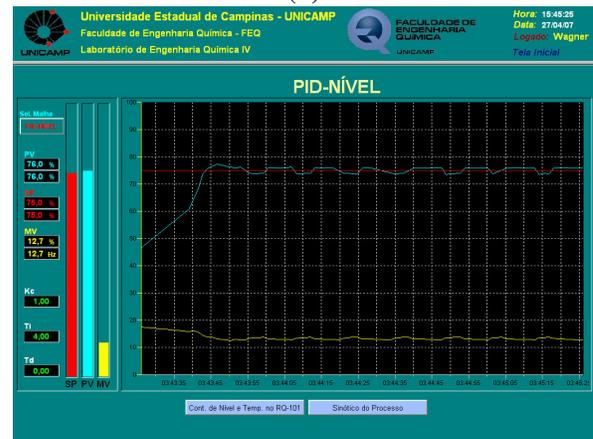
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3 – Telas de navegação do sistema supervisor: (a) Tela Inicial; (b) Tela do Sinótico do processo (Geral); (c) Tela do Reator Químico e (d) Tela de gráficos dos controladores PID.

Através da tela inicial é possível dar início à operação do protótipo através da digitação de um usuário válido e sua respectiva senha de acesso. A primeira tela de navegação apresenta o sinótico geral do processo que dá acesso às telas específicas dos processos do reator químico e do tanque de mistura.

Na tela de supervisão do reator químico são visualizadas todas as variáveis controladas e suas respectivas variáveis manipuladas. Nesta tela também é possível o acionamento das bombas BA-101 e BA-102, bastando para isso clicar sobre suas representações na tela. Ao realizar o comando para ligar uma bomba, o sistema de supervisão irá enviar um comando de acionamento ao controlador lógico programável que por sua vez enviará um comando discreto ao inversor de frequência através de uma saída digital.

Ao usuário também é oferecido o acompanhamento em tempo real das variáveis de processos (temperatura, vazão e nível), através de gráficos localizados na própria tela. O usuário pode escolher qual a variável que deseja monitorar nos gráficos.

Na tela dos controladores PID o usuário do protótipo pode configurar os parâmetro de sintonia definidos nos métodos aplicados em sala de aula.

A malha de controle de nível no reator RQ-101 utiliza-se um controlador PID, onde a variável manipulada é a velocidade rotacional da bomba BA-101, responsável por alimentar o reator químico. O nível do reator é medido por um sensor magnético tipo bóia, e seu sinal é enviado para o controlador (CLP), responsável por manipular a velocidade da bomba e conseqüentemente sua vazão.

A malha de controle da temperatura de saída do reator RQ-101 também utiliza um controlador PID que manipula a velocidade de rotação da bomba BA-102 variando a vazão do fluido refrigerante na camisa do reator.

Os valores dos *set-points* das variáveis controladas são definidos na própria tela de supervisão e seus valores podem ser alterados em tempo real.

3 SINTONIA DOS CONTROLADORES

O método de sintonia utilizado para configuração dos controladores utilizados nas malhas de controle do protótipo foi baseado na obtenção das curvas de reação dos sistemas em malha aberta. O método consiste em levar a planta até o regime permanente e em seguida, provocar um distúrbio em degrau na variável manipulada até o estabelecimento de um novo regime permanente.

Obtendo-se a curva de reação do sistema, traça-se uma reta tangente ao ponto de inflexão da curva obtendo-se graficamente os valores de ganho (k_p), constante de tempo (τ_p) e tempo morto (t_d). Estes valores serão utilizados na obtenção da função de transferência que aproxima a curva de reação obtida a um sistema de primeira ordem com tempo morto. Assim, podem-se utilizar as fórmulas propostas por Ziegler-Nichols e Cohen-Coon para calcular os parâmetros K_c , T_i e T_d dos controladores PID.

Na figura 4 é apresentada a curva de reação do sistema para o controle de temperatura no interior do reator químico.

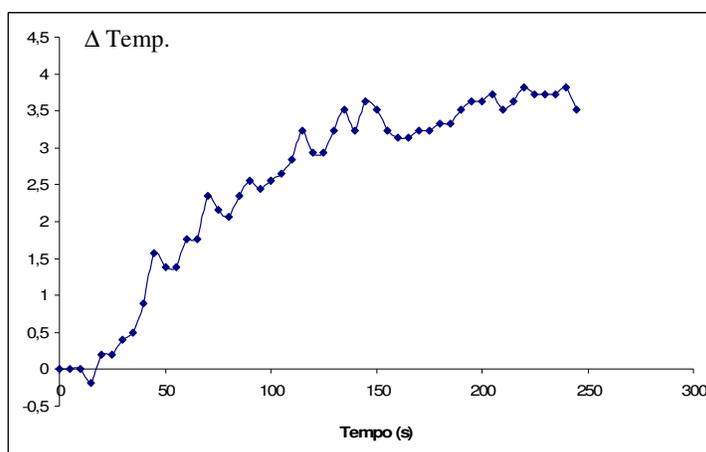


Figura 4 - Curva de reação da temperatura de saída do reator RQ-101.

Na figura 5 é apresentado o ajuste dos dados experimentais da curva de reação para obtenção dos parâmetros k_p , τ_p e t_d através da construção da reta tangente ao ponto de inflexão da curva.

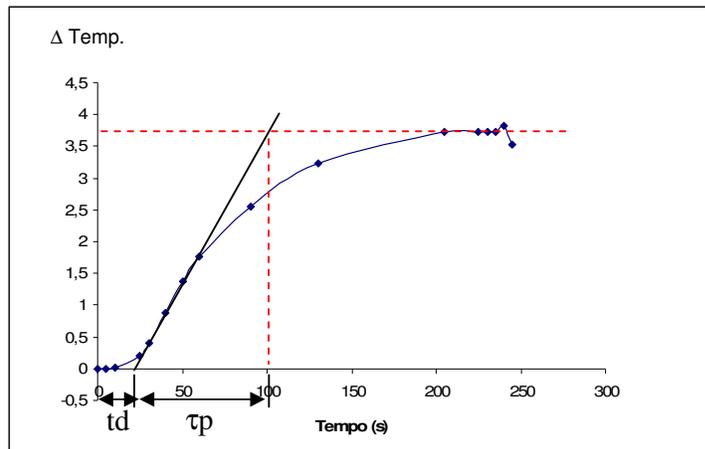


Figura 5 - Curva de resposta com reta tangente passando pelo ponto de inflexão.

Com base na curva da figura 5 pode-se definir os valores do ganho proporcional da planta (k_p), tempo morto (t_d) e constante de tempo (τ_p), aplicando os métodos de Ziegler-Nichols e Cohen-Coon.

O ganho do sistema foi obtido através da equação 1:

$$k_p = \frac{\Delta \text{Temp}}{\Delta \text{MV}} \quad (1)$$

O valor da variação da temperatura (ΔTemp) é obtida diretamente da figura 5 e da variação da variável manipulada (ΔMV) é a amplitude do distúrbio provocado no processo. Sendo $\Delta \text{MV} = 35 \text{ Hz}$ temos:

$$k_p = 0,11, \quad \tau_p = 100 \text{ s} \quad \text{e} \quad t_d = 22 \text{ s}$$

Com base nestes resultados, teve-se a seguinte função de transferência da planta.

$$G_p = \frac{0,11 \cdot e^{-22}}{100s + 1} \quad (2)$$

Na figura 6 é apresentada um diagrama de blocos do sistema químico em malha fechada, onde G_p representa a função de transferência da planta. O bloco do controlador PID segue a equação 3 representada abaixo.

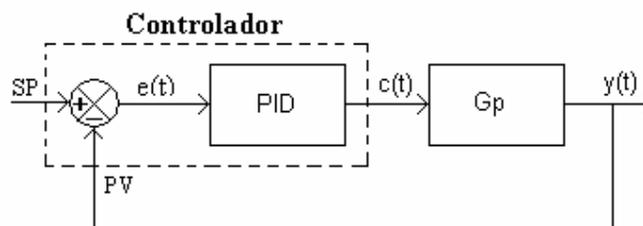


Figura 6 – Diagrama de blocos de um sistema em malha fechada *feedback*.

$$c(t) = k_c \cdot e(t) + \frac{k_c}{\tau_i} \int_0^t e(t) \cdot dt + k_c \cdot \tau_d \cdot \frac{de}{dt} + c_s \quad (3)$$

Observa-se através da equação 3 que é necessária a determinação dos parâmetros k_c , τ_i e τ_D para a utilização do controlador PID. Estes parâmetros foram obtidos utilizando-se a tabela de Ziegler-Nichols (tabela 1).

Tabela 1 - Tabela de cálculo dos parâmetros PID baseado no método Ziegler-Nichols

Controlador	k_c	τ_i	τ_D
P	$\tau_p / k_p \cdot \theta$	--	--
PI	$0,9 \cdot \tau / k_p \cdot \theta$	$3,33 \cdot t_d$	--
PID	$1,2 \cdot \tau_p / k_p \cdot \theta$	$2 \cdot t_d$	$0,5 \cdot t_d$

Usando-se a tabela 1 obtivemos:

$$K_c = 49,59 \quad \tau_i = 44 \text{ s} \quad \tau_D = 11 \text{ s}$$

Os parâmetros inicialmente obtidos através do método foram testados na planta e foi realizada uma sintonia fina (por tentativa e erro) com o objetivo de se encontrar a melhor resposta dinâmica do controlador. Assim, obtiveram-se os seguintes valores finais:

$$K_c = 4,9 \quad \tau_i = 4,4 \text{ s} \quad \tau_D = 1,1 \text{ s}$$

Através do sistema de supervisão, todos os dados calculados (k_c , T_i e T_d), foram inseridos no controlador PID para a temperatura, onde se observou o comportamento do sistema frente a perturbações.

4 ENSAIOS DE ESTABILIDADE DOS CONTROLADORES NA PARTIDA DA PLANTA.

Foram realizados ensaios na planta para se verificar a robustez dos controladores em situações críticas tais como a partida da planta. Esta situação é considerada de grande importância dentro do ambiente industrial, pois várias situações de risco estão presentes neste tipo de situação, como, por exemplo: a segurança das pessoas envolvidas, segurança dos equipamentos e cuidados com o meio ambiente.

4.1 - Partida da Planta em Modo Automático

Para esta análise foi utilizado para o teste de robustez o controlador de nível do reator RQ-101. Observou-se que para a partida automática o nível apresentou um comportamento oscilatório durante os primeiros 220 segundos (figura 7), levando o reator a trabalhar com o valor de nível acima dos valores de segurança estipulados. Este comportamento oscilatório leva o sistema a um maior consumo energético, além de colocar em risco a segurança da planta e das pessoas envolvidas.

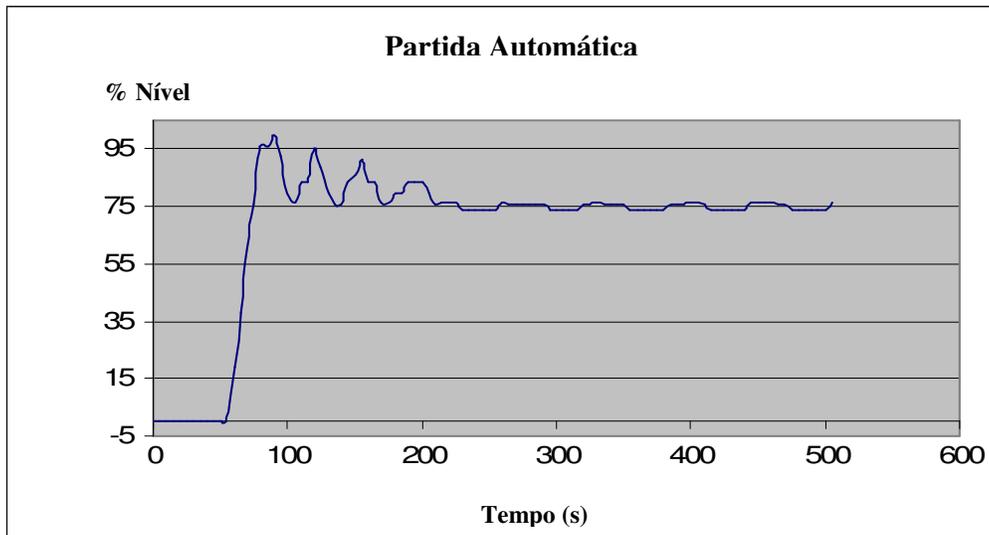


Figura 7 – Comportamento do nível do RQ-101 em partida automática.

Para uma partida automática mais segura seria recomendado diminuir o valor do parâmetro k_c do controlador PID, assim a variação da variável manipulada seria menor, aumentando o tempo de resposta (tempo necessário para que o nível alcance o valor final pela primeira vez) e diminuindo a sobre-elevação observada.

4.2 - Partida da Planta em Modo Manual

Com a partida realizada manualmente observou-se que o nível do reator químico atingiu o regime permanente em aproximadamente 130 segundos após a partida e poucas oscilações. Neste tipo de partida o operador manipula a velocidade de rotação da bomba de alimentação do reator até que o nível atinja um valor próximo ao valor de *set-point* em seguida passar o controlador para regime automático. Este procedimento permite reduzir o erro a valores pequenos, não permitindo oscilações bruscas no elemento final de controle. Na figura 8 é apresentado o comportamento do nível em partida manual.

5 ENSAIOS DE DESEMPENHO DOS CONTROLADORES

5.1 – Comportamento do controlador PID frente a um distúrbio em malha fechada.

Após definido e configurado os parâmetros do controlador PID para a temperatura do fluido de saída do reator RQ-101, o protótipo foi colocado em operação definindo-se um *set-point* de operação de 40°C. Para avaliar o comportamento do controlador PID foi provocado um distúrbio na variável de processo (temperatura de reação) através de uma redução na potência das resistências elétricas no interior do reator, assim pode-se simular uma redução no calor de reação gerando. Assim, foi observado o comportamento da variável controlada representada na figura 9.

Na figura 9 pode-se observar que a temperatura se estabilizou em aproximadamente 300 segundos após o distúrbio, variando em torno de $\pm 0,5$ °C do *set-point* definido em 40 °C. Assim, conclui-se que os parâmetros de sintonia obtidos foram suficientes para um desempenho satisfatório da planta, levando-se em consideração o caráter preliminar o

trabalho. Obviamente novos estudos serão desenvolvidos com o objetivo de se aperfeiçoar as respostas encontradas.

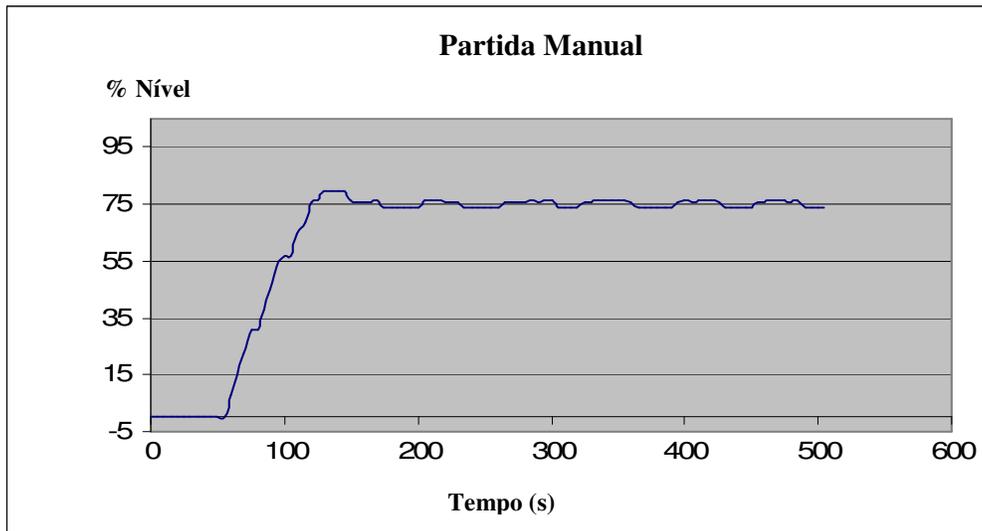


Figura 8 – Comportamento do nível do RQ-101 em partida manual.

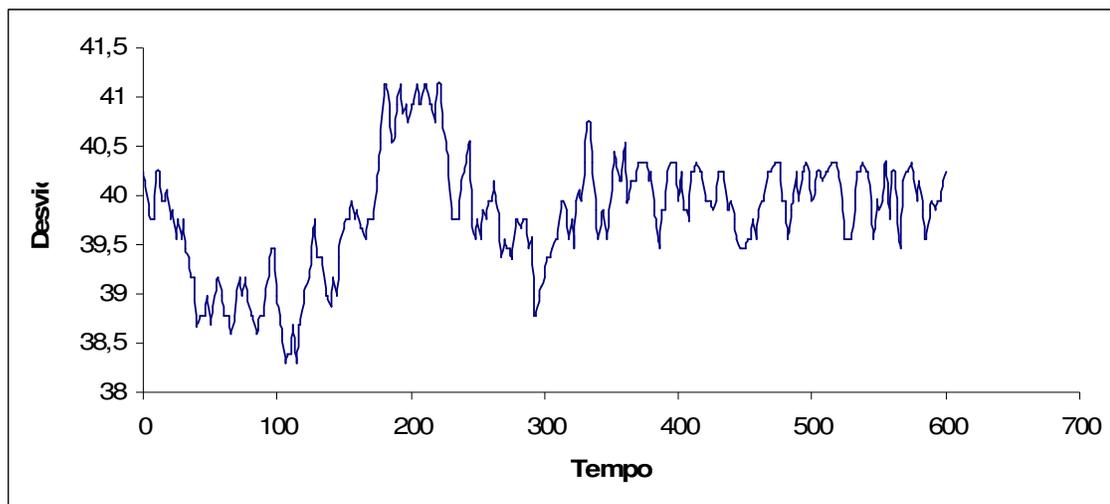


Figura 9 – Comportamento do controlador PID da temperatura do RQ-101.

Na figura 10 é apresentado o comportamento da variável manipulada (frequência de rotação da bomba) durante o distúrbio da variável controlada. Esta observação é pertinente, pois no projeto da maioria dos controladores tem-se uma preocupação unilateral com a variável controlada, entretanto, levando-se em consideração o consumo energético da planta, uma análise no comportamento da variável manipulada é de fundamental importância.

Assim, no caso em estudo observa-se um comportamento atenuado na variável manipulada. Este tipo de comportamento é adequado, pois não ocorrendo variações abruptas na atuação menor será o consumo energético e menor será o custo com manutenções corretivas no atuador devido a uma carga excessiva de atuações.

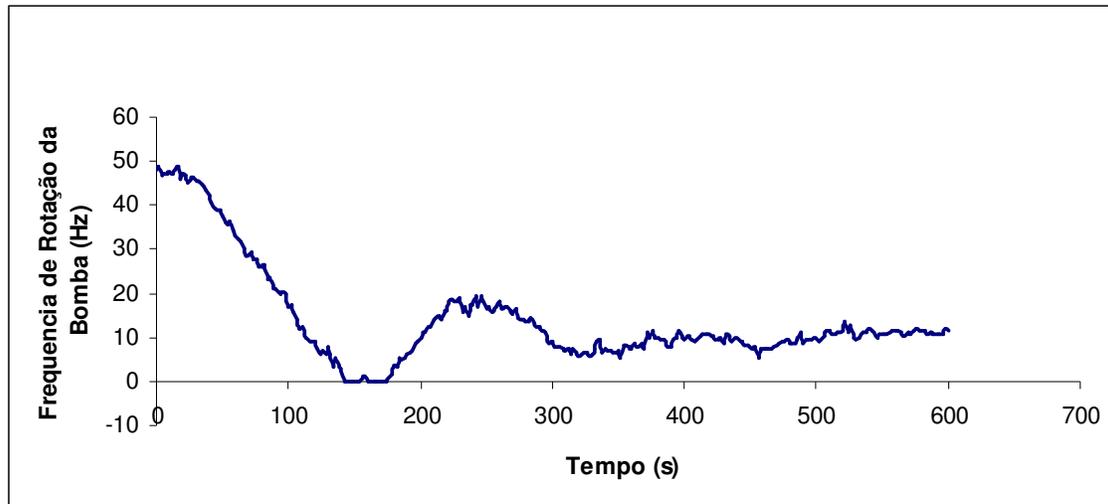


Figura 10 – Comportamento da variável manipulada do controlador de temperatura do RQ-101 após distúrbio.

6 CONDIÇÕES DE SEGURANÇA DO SISTEMA

Durante a concepção e o desenvolvimento do protótipo a segurança operacional da planta foi tratada como prioridade. Para possíveis erros operacionais dos usuários, foi desenvolvida uma lógica de programação que não permite acesso a parâmetros específicos do sistema. Estes parâmetros foram definidos de acordo com as limitações impostas pela planta e para o sistema. Abaixo são apresentadas algumas limitações que foram empregadas na programação:

- Temperatura máxima de reação

O calor gerado pela reação química ocorrida dentro do reator é simulada por duas resistências elétricas de 3000 W acionadas por um variador de potência, que recebe um sinal de controle de 4 ~ 20 mA proveniente do CLP, onde seu sinal de alimentação varia de 0 ~ 220 Vac/60Hz, proporcional ao sinal de controle, com capacidade de corrente igual a 16 A.

A principal preocupação está em não se permitir o acionamento das resistências elétricas sem a presença de produto dentro do reator. Foi definido um nível mínimo no reator de 65% (medido pelo transmissor de nível magnético tipo bóia). Assim, caso o nível do reator desça abaixo de 65% automaticamente as resistências elétricas são desligadas.

A temperatura máxima da reação é definida pelo professor de acordo com a aula prática definida, sendo assim, poder-se-á simular temperaturas que provoquem um desarme em todo o sistema definindo-se temperaturas de segurança.

- Nível máximo no reator

Outro importante fator de segurança do sistema está relacionado com o nível máximo do reator químico. O nível máximo foi definido no valor de 90% para evitar eventuais

transbordamentos. Caso o nível ultrapasse este valor, automaticamente é desligada a bomba BA-101. Sendo esta religada quando o nível alcança o valor de 10%.

Inúmeros testes foram realizados para verificar a eficiência destas rotinas de segurança.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar do caráter preliminar do trabalho desenvolvido pode-se constatar a eficiência e a interatividade do protótipo montado e suas potencialidades no auxílio ao ensino de instrumentação, automação e controle de processos no curso de graduação em Engenharia Química.

O caráter interdisciplinar favorece o desenvolvimento de inúmeros projetos. Principalmente na área de desenvolvimento de controladores avançados e inteligentes.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro da UNICAMP através do Projeto FAEPEX/PRP e à Capes.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CESAR, M. C. & TEIXEIRA, H.C.G - **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. Edgard Blucher, 2006.

COUTO DE MORAES, C. & CASTRUCCI, P. **Engenharia de Automação Industrial**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

HÉLVIA, H.B., LUPINACCI, W.M., SCHULZ, D.F., **Planta Industrial para Controle de um Trocador de Calor** – Universidade Federal de Juiz de fora – 2005.

OGATA, K.- **Engenharia de controle moderno**. Editora Prentice Hall do Brasil, 2003.

STEPHANOPOULOS, G. - **Chemical process control: An introduction to theory and practice**. 1.ed. New Jersey: Prentice-Hall International Inc, 1984. 696p.

PROJECT OF A DIDACTIC CHEMICAL PLANT FOR DEVELOPMENT OF DIFFERENT PROCESS CONTROLS AND INDUSTRIAL AUTOMATION STRATEGY.

***Abstract:** The incessant research for quality products and services with the objective of reaching the international competition brought to the industrial sector the necessity of total control over the process, raising the utilization of industrial automation and process control. Nowadays, the theory and the utilization of process control have a deep interaction with information systems and manufacture process, based mainly in the linearization of the process mathematic modeling. In the last years, a bigger interaction between the chemical*

engineering teaching and industrial techniques of control and process automation has been indispensable. Thus, thinking about this necessity, this work based on the mounting of a experimental prototype for the developing of practical classes in process control and systems automation in the Chemical engineering course at State University of Campinas (UNICAMP).

The project provides to the student the knowledge between discipline giving him a bigger interaction between practical and theoretical studies like: models estimation using mass and energies balance techniques, comparison between computational simulations and practical observations, different strategies of control such as SISO (Single Input Single Output), MIMO (Multiple Input Multiple Output) and "Feed forward", use of classic and modern control algorithms, including artificial intelligence and fuzzy logic, industrial automation based on PLC (Programmable Logic Controller).

Key-words: *Chemical Reactor, Process Control, Industrial Automation, Supervisory System and PID controller.*