Unisanta Science and Technology, **2016, 16, December**
Published Online 2016 Vol.5 N°3 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Proposta de otimização de processo multivariável de quatro tanques controlados por controlador PID utilizando rede de análise paraconsistente

Vinícius Rodrigues dos Santos e Cláudio Rodrigo Torres
UNISANTA - Universidade Santa Cecília
Departamento de Pós Graduação – Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica PPGEMec
Rua Oswaldo Cruz, 266 – Santos-SP, Brasil
E-mail*:* viniciusrodriguesdossantos@yahoo.com.br

Received june, 2015

Resumo: Recuperar o controle de um processo industrial, após um problema, falha ou erro operacional, significa economia financeira, ganho de produtividade, prevenção de um impacto ambiental ou preservação de vidas. Na indústria encontramos processos que tem como finalidade a produção de diversos produtos ou subprodutos, com riscos que são inerentes de cada um deles. Um processo de controle multivariável para se atingir a estabilização, atendendo a uma especificação, depende da influência de mais de uma variável. Neste trabalho foram simuladas situações de problemas, alterando-se a sua dinâmica através de um parâmetro "X", utilizando um sistema de controle multivariável de nível de quatro tanques, desenvolvido com o intuito de estudar as limitações no desempenho de controladores frente à mudança desta dinâmica do processo. O objetivo foi prover o restabelecimento do controle deste processo multivariável e interconecta-lo com um controle proporcional-integral-derivativo (PID). Para prover o restabelecimento foi desenvolvido e testado uma rede de inteligência artificial, um sistema especialista, utilizando Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPA2v), propondo uma forma inovadora para esta planta. Foram realizados testes com vários parâmetros de funcionamento onde controles convencionais não eram capazes de prover a sua recuperação. Estes testes consistiram em três formas de simulações, num total de quarenta ensaios, sendo vinte desses ensaios, utilizando a rede de análise paraconsistente (RAP). Foram obtidos resultados muito favoráveis devido a RAP desenvolvida ter conseguido detectar quando a planta perde o controle, mesmo com a variação da dinâmica do processo, sem informar a RAP qualquer parâmetro sobre a mudança da dinâmica (parâmetro "X") e sem a interferência humana. Após a detecção da perda do controle, a RAP e circuitos auxiliares desenvolvidos nesta pesquisa, puderam devolver o controle aos controladores PID, atendendo a especificação do processo. Este trabalho aponta para a possibilidade do emprego de técnicas de inteligência artificial na recuperação do controle de processos industriais.

Palavras chave: Controle de Processos. Técnicas de Controle. LPA2v. Recuperação de Controle. Automação.

Proposed multivariable process optimization of four tanks controlled by PID controller using paraconsistent analysis network

Abstract: Recovering the control of an industrial process, after an issue, failure or operational error, means financial savings, production gain, prevention of environmental impact or saving lives. In the industry field there are processes that yield products and by products, with their respective inherent risks. A multivariable process, in order to achieve stability, complying with a specification, depends on the influence of more than one variable. In this paper, issues were simulated, altering their dynamics in a "X" parameter, using a multivariable system of level control in four tanks, developed to study the limitations in the performances of controllers while changing the process dynamics. The objective was to promote the reestablishment of the control over this multivariable process and interconnect it into a PID controller (proportional-integral-derivative). In order to reestablish the control, an artificial intelligence network and paraconsistent annotated logic with annotation of two values (PAL2v) were developed and tested in an innovative way for this plant. Tests were performed with various parameters where conventional controllers weren't effective in recovering control. These tests consisted of three simulations, a total of forty runs, twenty using the paraconsistent

Copyright © 2016 ISESC.

analysis network (PAN). Many favorable results were found due to the PAN's detection when the plant's control was lost, even with the dynamic variable of the process, without informing the PAN of any parameters over the changes in the dynamics ("X" parameter) and also without human interference. After detecting the loss of control, PAN and auxiliary circuits developed in this research could return the control to the PID controllers, complying with the specifications of the process. This paper aims towards the possibilities of the use of artificial intelligence in the recovery of control in industrial processes.

Keywords*:* Processes control, Control Techniques, PAL2v, Control Recovery, Automation.

1. Introdução

Alguns processos industriais são diferenciados seja essenciais, alto custo, como por exemplo: indústrias siderúrgicas, tanque ou pulmões de gases, distribuição de energia elétrica, distribuição de água, distribuição de gás e etc... Nesses processos, muitas vezes, devido a uma falha ou defeito, ocorre a perda do controle deste, podendo ocasionar danos irreparáveis, altos prejuízos materiais e pessoais.

A motivação para este projeto se deu a partir do fato de que os processos industriais atualmente exigem produção com alta eficiência sem perdas de energia para que o produto final tenha baixo custo sem perder a qualidade. Estas exigências do mercado motivam a investigação e pesquisas sobre novas técnicas de controle e automação das máquinas. Para isso, foram aplicados conceitos práticos, no que tange o controle de processos industriais e técnicas de inteligência artificial para a recuperação de controle de uma planta industrial.

2. Revisão Bibliográfica

O processo escolhido para esta pesquisa foi uma planta de nível, o Processo Multivariável de Quatro Tanques, conforme foi apresentado na IEEE Transactions on Control Systems Technology no ano de 2000, em Johansson (2000). Johansson ao idealizar esta planta e instrumentá-la para prover o seu controle (figura 1), utilizou a técnica (PID – Controlador Proporcional Integral e Derivativo). Nos seus ensaios constatou que em determinado valor de fase ou dinâmica (parâmetro X), a planta perde o controle e é necessária uma intervenção manual para restabelecê-lo.

Um trabalho muito interessante foi o realizado por Sagaz (2003), que demonstrou ser possível efetuar a recuperação do controle deste Processo Multivariável de Quatro Tanques, porém, informando a sua rede (Fuzzy) a causa do problema ou a fase em que se encontra o processo. Outro trabalho também interessante e inovador foi o realizado por Baptista (2014), que demonstrou ser possível se obter a recuperação do controle deste Processo Multivariável de Quatro Tanques, porém, informando à sua rede (LPA2v – Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores) a causa do problema ou a fase e utilizando como elemento final de controle o dispositivo causador do problema que é a válvula direcional de três vias.

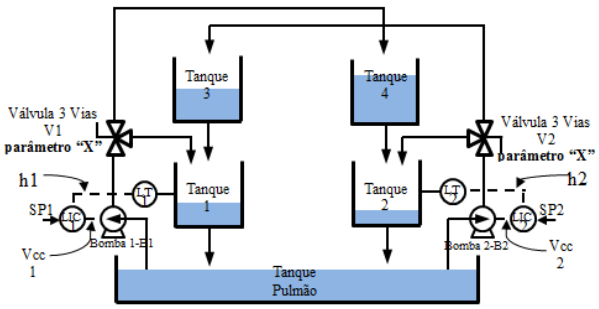


Figura 1 – Instrumentação do Sistema quatro tanques proposto por Johansson (2000).

Os trabalhos sobre esta planta demostraram que não importa o tipo de técnica que se empregue no controle desta, que ao se efetuar a mudança de fase e se, não for informado a causa do problema para o sistema, ocorrerá a perda do controle e será necessária uma intervenção manual para restabelecê-lo.

Os tanques 3 e 4 estão constantemente desaguando respectivamente nos tanques 1 e 2 e estes no tanque pulmão. A Bomba 1 através de V1 bombeia água para os Tanques 1 e 4. A Bomba 2 através de V2 bombeia água para os Tanques 2 e 3.

As válvulas de 3 Vias (V1 e V2) possuem um parâmetro X, que pode ser ajustado para qualquer valor de 0 à 1. O parâmetro X ajustado para 1 indica que toda vazão estará sendo direcionada para os tanques inferiores, por conseguinte o tanque superior não receberá nenhuma vazão. Por outro lado se X for ajustado para 0, nenhuma vazão estará sendo direcionada para os tanques

Copyright © 2016 ISESC

inferiores, por conseguinte toda vazão será direcionada para os tanques superiores. O parâmetro X ajustado para um valor entre 0 e 1 significa que esta taxa unitária de vazão estará sendo direcionada para os tanque inferiores e o restante para os tanques superiores.

Os parâmetros X das Válvulas de 3 Vias V1 e V2 são ajustados com o mesmo valor.

O parâmetro X é ajustado manualmente antes da observação do funcionamento da planta e seu objetivo é o de promover alteração na dinâmica e interação no processo.

Equacionamento do Sistema

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{a_1}{A_1}\sqrt{2gh_1} + \frac{a_2}{A_1}\sqrt{2gh_2} + \frac{X_1.K_1}{A_1}V_{cc\,1}$$

$$\frac{dh_2}{dt} = -\frac{a_2}{A_2}\sqrt{2gh_2} + \frac{a_4}{A_2}\sqrt{2gh_4} + \frac{X_2.K_2}{A_2}V_{cc\,2}$$

$$\frac{dh_3}{dt} = -\frac{a_3}{A_3}\sqrt{2gh_3} + \frac{(1-X_2).K_2}{A_3}V_{cc\,2}$$

$$\frac{dh_4}{dt} = -\frac{a_4}{A_4}\sqrt{2gh_4} + \frac{(1-X_1).K_1}{A_4}V_{cc\,1}$$

$\frac{dh_x}{dt}$ = Nível acumulado por unidade de tempo no Tanque x, (cm).
a_x = Seção do tubo de saída do tanque x, (cm^2).
A_x = Seção transversal do Tanque x, (cm^2).
g = Aceleração da gravidade, (cm/s^2).
h_x = Altura do líquido, nível, no Tanque x, (cm)
h_x = Altura do líquido, nível, no Tanque x, (cm).
X_x = Parâmetro de 0 a 1, que configura a válvula direcional Vx.
K_x = Fator da bomba "Bx", $(3{,}33)$. *"Obtido experimentalmente por Johansson (2000)".*
$V_{cc\,x}$ = Tensão 0 a 12 Vcc, aplicada à bomba "Bx", (V).

2.1 Inteligencia artificial, Lógica não clássica, Lógica Paraconsistente

Dados vários trabalhos e seus resultados, a inteligência artificial pode ser considerada uma forma de sintetizar a resolução de problemas, situações, e tornar as máquinas ou programas de computador capazes de resolvê-los. Pode-se verificar em Torres (2010), um sistema inteligente de controle e navegação de robôs móveis autônomos em um ambiente não estruturado.

Segundo Da Silva Filho e Abe (1999), as lógicas não clássicas caracterizam-se por ampliar, de algum modo, a atuação da lógica tradicional no que tange os sistemas especialistas, por infringir seus princípios ou pressupostos fundamentais.

A Lógica Paraconsistente é uma lógica que através de seus fundamentos pode-se implementar sistemas lógicos de controle e tomada de decisão por meio de programas de computação e hardwares que permitam manipular e trabalhar com sinais representativos sobre informações de conhecimento incerto.

A Lógica Paraconsistente pertence as lógicas não clássicas que fazem parte de sistemas de inteligência artificial.

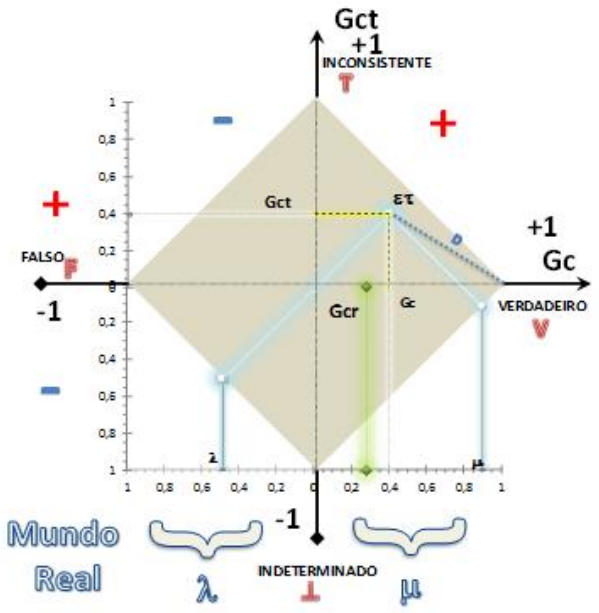


Figura 1. Simulação de uma análise Paraconsistente para demonstração da distância "G_{CR}". Com: μ=0,9; λ=0,5; G_{Ct}=0,4; G_C=0,4; D=0,721; G_{CR}=0,278.

3. Materiais e Métodos

3.1 Material

3.1. Plataforma de Desenvolvimento

Neste trabalho foi empregado a plataforma de desenvolvimento para aplicações em engenharia e ciências denominado LabVIEW® (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) da National Instruments®, que possui uma sintaxe de programação gráfica para criar e desenvolver códigos para sistemas de diversas áreas.

Copyright © 2014 ISESC.

Foi utilizado uma planta didática que consta nas bibliotecas do LabVIEW®.

A princípio esta planta não possui os controladores PID, ou seja, não possui a parte de automação e controle, foi construída somente para o estudo da dinâmica dos tanques.

A partir deste modelo foi realizada a implantação da instrumentação original proposta por Johansson (2000) e depois a implantação da rede de restabelecimento de controle e os demais circuitos desenvolvidos.

3.2 Método

Foram utilizados 40 ensaios, em três formas de simulações para testar e prover mudanças na dinâmica da planta, com vários valores de *set-points*. A primeira forma de simulações foi realizada com a planta original e o parâmetro "x" configurado para 0,7, onde os fluxos para os tanques inferiores são maiores. A segunda forma de simulações foi realizada com a planta original e o parâmetro "x" configurado para 0,3, onde os fluxos para os tanques inferiores são menores. A terceira forma de simulações foi realizada com o sistema de restabelecimento de controle projetado e o parâmetro "x" configurado hora para 0,7 e hora para 0,3, justamente para forçar a mudança da dinâmica do processo e testar a efetividade do sistema.

4. Desenvolvimento

Devido a funcionalidade da planta, quando o controle da mesma é perdido, uma inversão da sua dinâmica é promovida, devendo então o sistema se adequar a isso.

Para construir a rede, as entradas foram modeladas adequadamente e então aplicado as técnicas da LPA2v para atingir o objetivo, que é a proposição de planta sob controle.

As fontes de informações, sendo μ evidências favoráveis e λ evidências desfavoráveis à proposição foram obtidas dos respectivos pontos da figura 1, como mostrado a seguir no modelamento das variáveis:

Modelamento de μ1 *e* λ1:

$$\mu 1 = \frac{20-|SP1-h1|}{20} \qquad \lambda 1 = 1 - \mu 1$$

Modelamento de μ2 *e* λ2:

$$\mu 2 = \frac{20-|SP2-h2|}{20} \qquad \lambda 2 = 1 - \mu 2$$

Modelamento de μ3 *e* λ3:

$$\mu 3 = \frac{20-|Vcc1-Vcc2|}{20} \qquad \lambda 3 = 1 - \mu 3$$

Modelamento de μ4 *e* λ4:

$$\mu 4 = \frac{20-|h1-h2|}{20} \qquad \lambda 4 = 1 - \mu 4$$

Modelamento de μ5 *e* λ5:
Se o módulo da diferença entre $SP1$ *e* $SP2$ for menor que 1 então $\mu 5 = 1$ *e* $\lambda 5 = 0$, senão $\mu 5 = 0$ *e* $\lambda 5 = 1$;

4.1 NAP´s – Nós de análises Paraconsistentes

Além do NAP convencional, dois outros NPA´s foram empregados nesta pesquisa conforme figura 3 e 4.

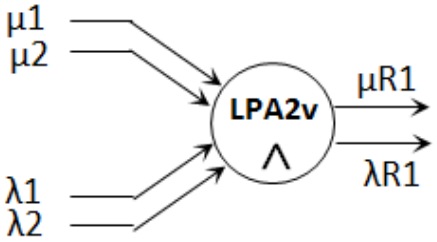


Figura 3 - Proposta de simbologia para a operação conjunção na LPA2v.

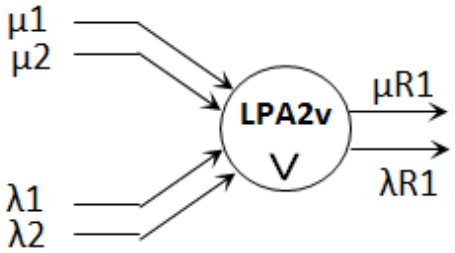


Figura 4 - Proposta de simbologia para a operação disjunção na LPA2v.

4.2 Sistemas auxiliares

Com a RAP desenvolvida, figura 5, foi possível detectar a perda do controle da planta e promover a inversão da saída dos controladores. Porém ao fazer isso, a planta passa a operar normalmente e então a RAP detecta o bom funcionamento e desativa a inversão, provocando então uma grande instabilidade.

Com isso foi necessário desenvolver uma forma de memorizar a condição explanada acima, o circuito da figura 6 satisfaz o requerido.

Copyright © 201x ISESC.

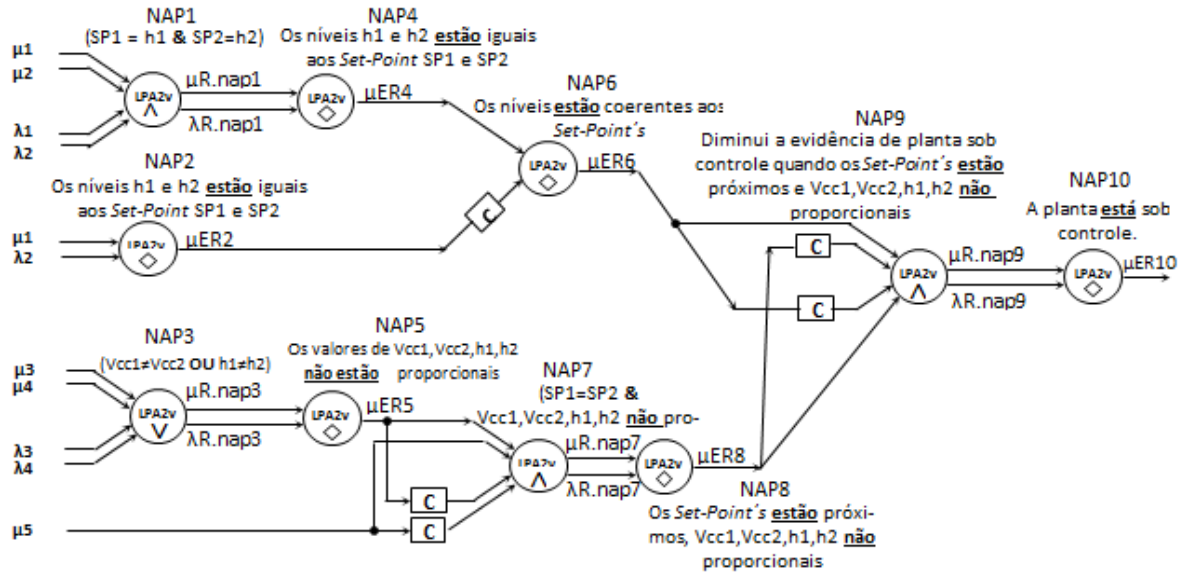


Figura 5. Rede paraconsistente para restabelecimento de controle de um sistema multivariável.

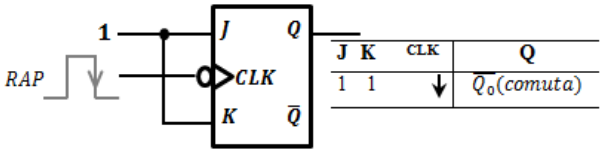


Figura 6. Flip-flop JK na configuração tipo "T", aplicado nível 1 na entrada, RAP como clock e a respectiva tabela da verdade.

Com o auxílio da figura 7, pode-se prever ainda o caso da RAP apresentar, no início do funcionamento do sistema, um valor de saída "0" (zero), então se nessa hipótese a planta perder o controle, a saída da RAP permanecerá em "0" (zero), não proporcionando a inversão da saída do flip-flop JK pelo motivo de não haver a "descida" do clock (nível lógico 1 para 0).

Para a situação acima foi desenvolvido um circuito denominado detector de estado lógico (figura 8). Este promove uma descida de clock em 43 segundos se a RAP estiver em nível lógico "0" (zero), ou seja, fora de controle (um sinal menor que 0,35 é considerado um valor de planta fora de controle) e não houver descida de pulso vindo da RAP.

Por fim a saída "Q" do Flip-flop precisa ainda acionar uma chave para a inversão da saída dos controladores, figura 9.

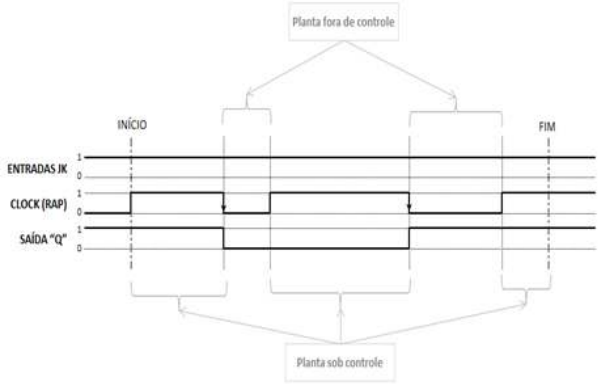


Figura 7. Ilustração do funcionamento do sistema de inversão (saída "Q") em função da saída da rede inteligente (RAP).

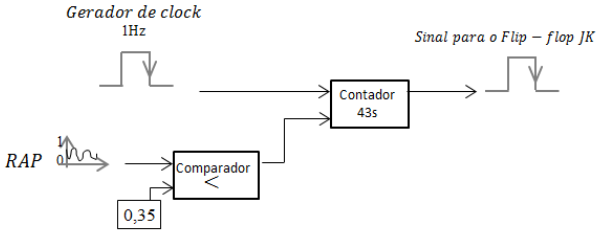


Figura 8. Diagrama de blocos do circuito detector de estado lógico.

Copyright © 2014 ISESC.

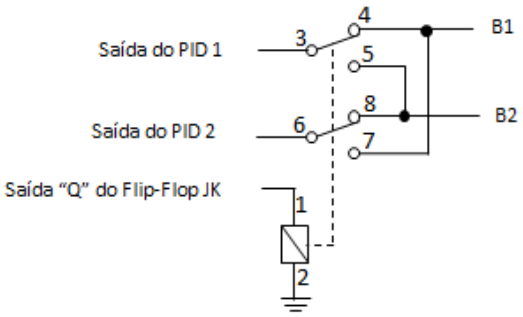


Figura 9. Símbolo ilustrativo de um relé duplo.

4.3. Construção do sistema de quatro tanques com sistema inteligente de restabelecimento de controle no Labview®

Na figura 10 tem-se o sistema multivariável de quatro tanques de Johansson (2000), com o sistema inteligente de restabelecimento de controle desenvolvido e demonstrado anteriormente.

5. Resultados e Discussão

Seguindo os estudos realizados por Sagaz (2003) e Baptista (2014) foram utilizados os seguintes parâmetros e condições para os ensaios:

- Um mesmo parâmetro X foi usado para parametrização de X1 e X2, ou seja, X1=X2;
- No estudo feito por Sagaz (2003) o parâmetro X foi definido em 0,7 num primeiro experimento e em 0,3 num segundo.
- Em cada experimento os níveis iniciais dos tanques 1 e 2 foram de 30% (6 cm) e 70% (14 cm). Os tanques 3 e 4 tiveram os níveis iniciais 0%.
- Em cada experimento, os set-points foram de 30% (6 cm) à 70% (14 cm).
- O sistema não possui um controle eletrônico de transbordo de tanque
- transbordo de tanque. Considera-se um controle mecânico tipo boia.

.

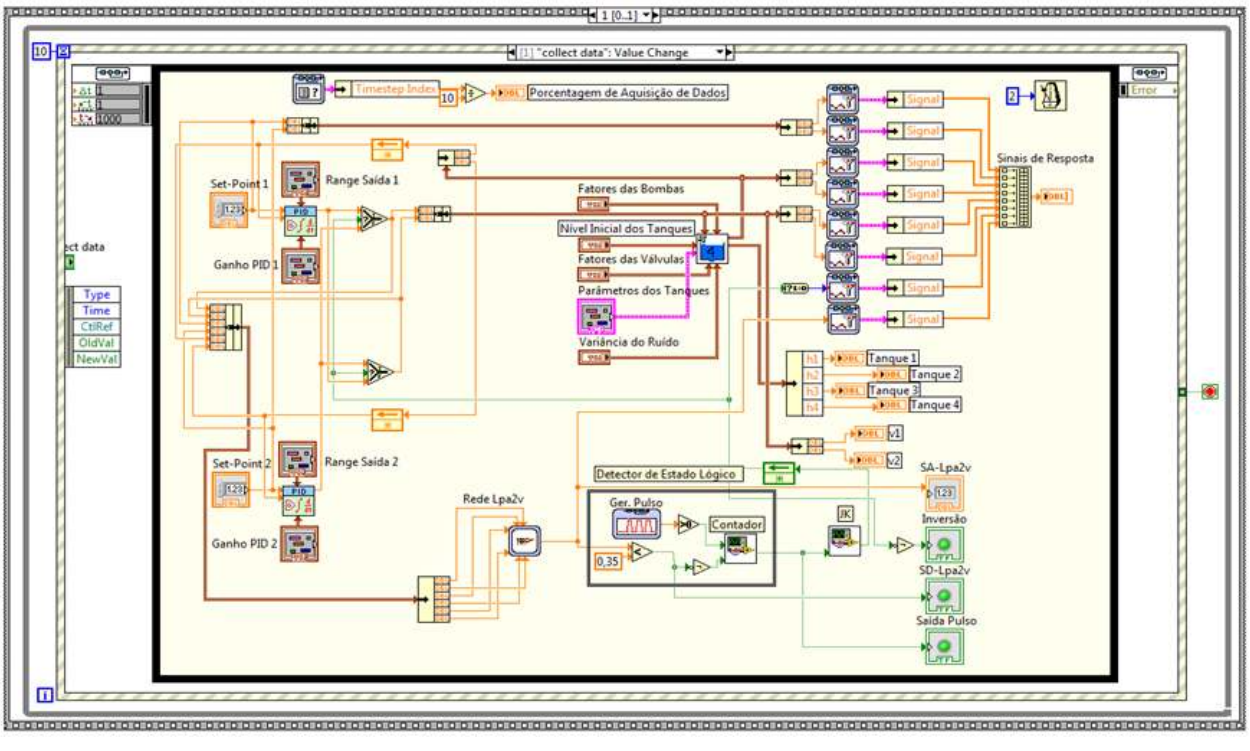


Figura 10. Planta Multivariável, Sistema Quatro Tanques, Johansson (2000), com sistema inteligente de restabelecimento de controle, reproduzida no LabVIEW®.

Copyright © 201x ISESC.

5.1 Discussão sobre a primeira forma de simulação com o sistema original

Na primeira forma de simulação com o sistema multivariável original de Johansson (2000), foram escolhidos, conforme tabela 1, vários valores de set-point, bem como, níveis iniciais dos tanques diferentes e o parâmetro X=0,7, a fim de testar os limites de controle nesta configuração.

Os controladores PID, LIC 1 e LIC 2 utilizados para controlar respectivamente B1 e B2, foram ajustados empiricamente com os parâmetros: ganho proporcional = 1; tempo integra = 0,001min, tempo derivativo = 0.

O método de ajuste dos parâmetros controladores foi de tentativa e erro, variando o termo proporcional, integral e derivativo até uma boa resposta da planta.

A linha de tempo adotada para os gráficos foi de 1000s, muito além do tempo necessário para o regime permanente. Esse tempo foi adotado para se obter uma comparação direta – visual com os gráficos posteriores.

Pode-se observar nos ensaios de 01 a 10, gráficos da figura 11 (a), que em todos os dez ensaios realizados os níveis dos tanques atingiram os set-points.

Conforme o resultado da matriz RGA, Johansson (2000), desta forma de simulações, os pares de variáveis manipuladas e controladas eram os corretos: M_1, C_1 e M_2, C_2. Então se conclui que a vazão parcial da bomba 1 "M_1" utilizada para controlar o nível no tanque 1 "C_1", e vazão parcial da bomba 2 "M_2" utilizada para controlar o nível no tanque 2 "C_2" são os pares mais indicados.

Tabela 1. Parâmetros da 1ª forma de Simulações e resultados.

Ensaio	X1	X2	Nível Inicial TQ1	Nível Inicial TQ2	SP1	SP2	Tempo aproximado para Estabilização Nível TQ1	Tempo aproximado para Estabilização Nível TQ2
1	0,7	0,7	6 cm	14 cm	14 cm	6 cm	125s	125s
2	0,7	0,7	6 cm	14 cm	12 cm	8 cm	110s	125s
3	0,7	0,7	6 cm	14 cm	10 cm	10 cm	100s	100s
4	0,7	0,7	6 cm	14 cm	8 cm	12 cm	100s	100s
5	0,7	0,7	6 cm	14 cm	6 cm	14 cm	100s	100s
6	0,7	0,7	14 cm	6 cm	14 cm	6 cm	120s	75s
7	0,7	0,7	14 cm	6 cm	12 cm	8 cm	120s	75s
8	0,7	0,7	14 cm	6 cm	10 cm	10 cm	120s	120s
9	0,7	0,7	14 cm	6 cm	8 cm	12 cm	125s	120s
10	0,7	0,7	14 cm	6 cm	6 cm	14 cm	100s	125s

Copyright © 2014 ISESC.

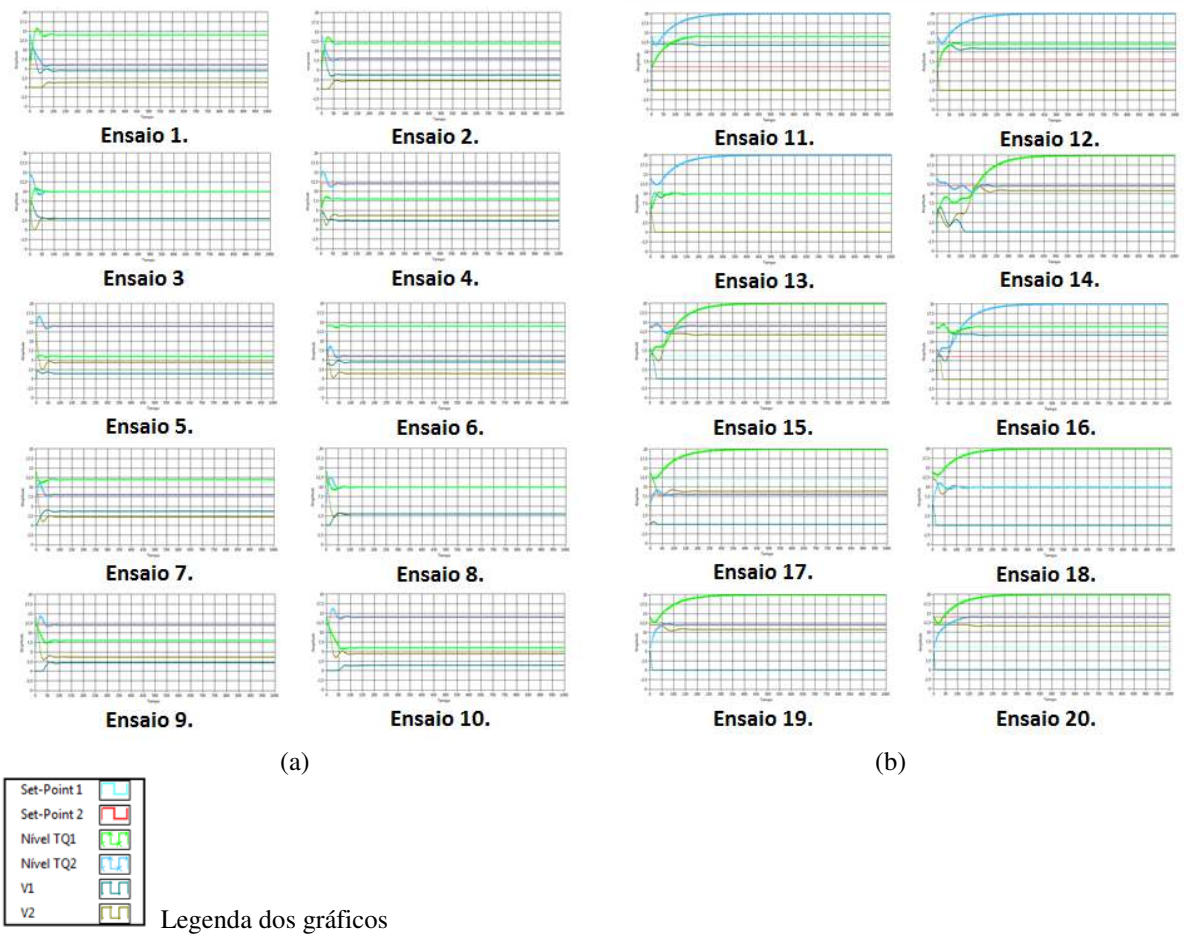


Figura 11. (a) 1ª forma de simulações, ensaios 1 ao 10, parâmetro X=0,7.

(b) 2ª forma de simulações, ensaios 11 ao 20, parâmetro X=0,3.

5.2. Discussão sobre a segunda forma de simulação com o sistema original

Na segunda forma de simulações, com o sistema multivariável original de Johansson (2000), foram escolhidos, conforme a tabela 2, os mesmos valores da tabela 1, porém com o parâmetro X=0,3, a fim de testar os limites de controle nesta configuração.

Os controladores PID, LIC 1 e LIC 2 utilizados para controlar respectivamente B1 e B2, foram ajustados com os mesmos valores da primeira forma de simulações: ganho proporcional = 1; tempo integral = 0,001min, tempo derivativo = 0.

Pode-se observar nos ensaios 11 à 20, gráficos da figura 12, que em todos os dez ensaios realizados, somente em um dos dois tanques o nível atingiu o set-point o outro ficou fora de controle.

O termo "fora de controle", tabela 2, significa que o nível do não atingirá o set-point, mesmo após um grande período de espera.

Conforme o resultado da matriz RGA, Johansson (2000), desta forma de simulações, os pares de variáveis manipuladas e controladas não eram os corretos: M_1, C_1 e M_2, C_2, os corretos seriam M_1, C_2 e M_2, C_1.

Então se conclui que a vazão parcial da bomba 1 "M_1" utilizada para controlar o nível no tanque 1 "C_1", e vazão parcial da bomba 2 "M_2" utilizada para controlar o nível no tanque 2 "C_2" não são os pares mais indicados.

Os pares indicados seriam vazão parcial da bomba 1 "M_1" utilizada para controlar o nível no tanque 1 "C_2", e vazão parcial da bomba 2 "M_2" utilizada para controlar o nível no tanque 2 "C_1" .

Copyright © 201x ISESC.

Tabela 2. Parâmetros da 2ª forma de Simulações e resultados.

Ensaio	X1	X2	Nível Inicial TQ1	Nível Inicial TQ2	SP1	SP2	Tempo aproximado para Estabilização Nível TQ1	Tempo aproximado para Estabilização Nível TQ2
11	0,3	0,3	6 cm	14 cm	14 cm	6 cm	200s	Fora de Controle
12	0,3	0,3	6 cm	14 cm	12 cm	8 cm	150s	Fora de Controle
13	0,3	0,3	6 cm	14 cm	10 cm	10 cm	150s	Fora de Controle
14	0,3	0,3	6 cm	14 cm	8 cm	12 cm	Fora de Controle	275s
15	0,3	0,3	6 cm	14 cm	6 cm	14 cm	Fora de Controle	200s
16	0,3	0,3	14 cm	6 cm	14 cm	6 cm	200s	Fora de Controle
17	0,3	0,3	14 cm	6 cm	12 cm	8 cm	Fora de Controle	175s
18	0,3	0,3	14 cm	6 cm	10 cm	10 cm	Fora de Controle	175s
19	0,3	0,3	14 cm	6 cm	8 cm	12 cm	140s	Fora de Controle
20	0,3	0,3	14 cm	6 cm	6 cm	14 cm	Fora de Controle	175s

Com a mudança do parâmetro "X" de 0,7 para 0,3, houve uma mudança na dinâmica do sistema, mudando também o par de variáveis manipuladas e controladas. É nesse ponto que há a necessidade de interferência humana para o restabelecimento do controle da planta.

Num sistema industrial, onde o parâmetro "X" pode variar por inúmeros motivos, um sistema de inteligência artificial pode prover o restabelecimento do controle.

5.3 Discussão sobre a terceira forma de simulação com o sistema inteligente de restabelecimento de controle

Na terceira forma de simulação com o sistema multivariável original de Johansson (2000) acrescido com o Sistema Inteligente de Restabelecimento de Controle, foram escolhidos, conforme tabela 3, vários valores de set-point, bem como, níveis iniciais dos tanques diferentes e o parâmetro X=0,7 e X=0,3, a fim de testar os limites de controle e a funcionalidade do sistema.

Os controladores PID, LIC 1 e LIC 2 utilizados para controlar respectivamente B1 e B2, foram ajustados empiricamente com os parâmetros: ganho proporcional = 0,5; tempo integra = 0,02min, tempo derivativo = 0.

O método de ajuste dos parâmetros dos controladores foi o de tentativa e erro, variando o termo proporcional, integral e derivativo até uma boa resposta da planta.

Pode-se observar nos gráficos que em todos os 20 ensaios realizados, ensaios 21 a 40, figura 13, os níveis dos tanques atingiram o set-point.

O termo "fora de controle", que significa que o nível do não atingirá o set-point, mesmo após um grande período de espera, não se aplicou nesta forma de simulação.

Conforme os resultados das matrizes RGA Johansson (2000), da primeira e segunda forma de simulações, os pares de variáveis manipuladas e controladas se alteram com a mudança do parâmetro "X". Os pares de variáveis corretos hora eram: M_1, C_1 e M_2, C_2, e hora eram M_1, C_2 e M_2, C_1.

Então se conclui que a vazão parcial da bomba 1 "M_1" utilizada para controlar o nível no tanque 1 "C_1", e vazão parcial da bomba 2 "M_2" utilizada para controlar o nível no tanque 2 "C_2" quando não eram os pares mais indicados, ocorreu a atuação da Rede Inteligente de Restabelecimento no sentido de mudar os pares de controle.

Quando os pares eram os mais indicados, a atuação da Rede Inteligente de Restabelecimento foi no sentido de manter os pares de controle.

A atuação da Rede Inteligente de Restabelecimento pode ser observada através dos sinais "inversão" e "LPA2v", nos ensaios 21 a 40, gráficos da figura 12.

Copyright © 2014 ISESC.

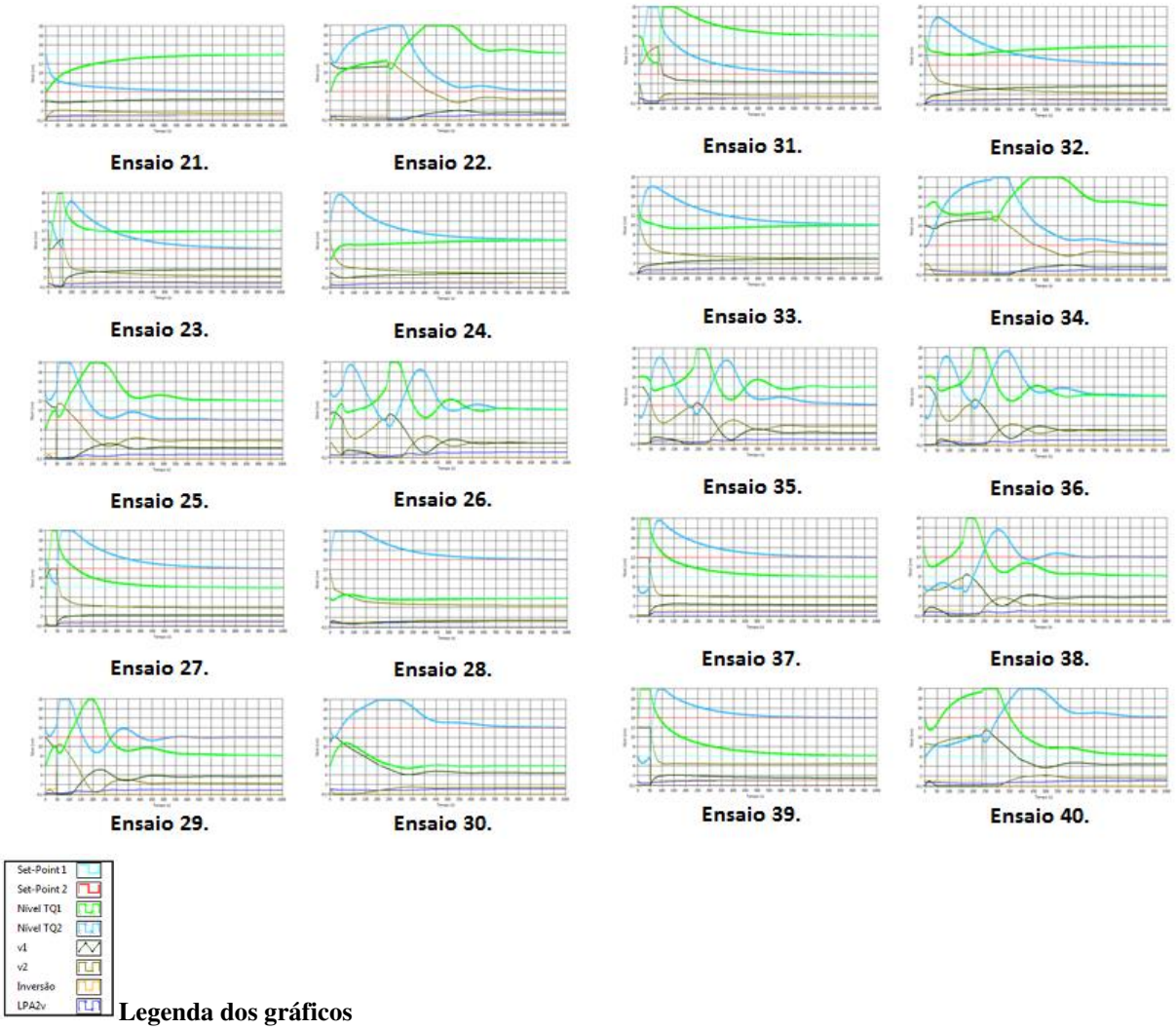


Figura 12. 3ª forma de simulações, ensaios 31 ao 40, parâmetro "X" alternando 0,3 e 0,7.

6. Resultados

Foram utilizados 40 ensaios, em três formas de simulações para testar e prover mudanças na dinâmica da planta.

Na primeira forma de simulação, com a planta original e o parâmetro "X=0,7", pode-se observar através dos ensaios 1 a 10, gráficos da figura 11 e da tabela 1, que os níveis dos tanques atingiram os set-points pré-determinados, por que como constatado através do cálculo da matriz RGA, Johansson (2000), os pares de controles eram corretos (PID 1 controlando B1 e PID 2 controlando B2).

Na segunda forma de simulação, com a planta original e o parâmetro "X=0,3", pode-se observar através ensaios 11 a 20, gráficos da figura 12 e da tabela 2, que somente o nível de um dos tanques atingiu o set-point pré-determinado (indicando perda de controle da planta), por que como constatado através do cálculo da matriz RGA, Johansson (2000), os pares de controles não eram corretos (PID 1 controlando B1 e PID 2 controlando B2) o correto seria PID 1 controlando B2 e PID 2 controlando B1. Na terceira forma de simulação, com o Sistema Inteligente de Restabelecimento de Controle, com os parâmetros "X" alternando entre 0,3 e 0,7, justamente para forçar a mudança da dinâmica do processo, pode-se observar através dos gráficos da figura 12 e da tabela 3, que os níveis dos tanques atingiram os set-points pré-determinados, porque como esperado, a RAP conseguiu detectar as perdas de controle e proporcionar a mudança do par de variáveis, manipulada e controlada quando necessário.

Copyright © 201x ISESC.

Tabela 3. Parâmetros da 3ª forma de simulações e resultados.

Ensaio	X1	X2	Nível Inicial TQ1	Nível Inicial TQ2	SP1	SP2	Tempo aproximado para Estabilização Nível TQ1	Tempo aproximado para Estabilização Nível TQ2
21	0,7	0,7	6 cm	14 cm	14 cm	6 cm	650s	550s
22	0,3	0,3	6 cm	14 cm	14 cm	6 cm	900s	850s
23	0,7	0,7	6 cm	14 cm	12 cm	8 cm	200s	800s
24	0,7	0,7	6 cm	14 cm	10 cm	10 cm	750s	750s
25	0,3	0,3	6 cm	14 cm	12 cm	8 cm	650s	500s
26	0,3	0,3	6 cm	14 cm	10 cm	10 cm	725s	725s
27	0,7	0,7	6 cm	14 cm	8 cm	12 cm	500s	800s
28	0,7	0,7	6 cm	14 cm	6 cm	14 cm	175s	800s
29	0,3	0,3	6 cm	14 cm	8 cm	12 cm	750s	600s
30	0,3	0,3	6 cm	14 cm	6 cm	14 cm	450s	850s
31	0,7	0,7	14 cm	6 cm	14 cm	6 cm	650s	800s
32	0,7	0,7	14 cm	6 cm	12 cm	8 cm	750s	900s
33	0,7	0,7	14 cm	6 cm	10 cm	10 cm	650s	850s
34	0,3	0,3	14 cm	6 cm	14 cm	6 cm	950s	900s
35	0,3	0,3	14 cm	6 cm	12 cm	8 cm	700s	950s
36	0,3	0,3	14 cm	6 cm	10 cm	10 cm	700s	700s
37	0,7	0,7	14 cm	6 cm	8 cm	12 cm	550s	750s
38	0,3	0,3	14 cm	6 cm	8 cm	12 cm	750s	650s
39	0,7	0,7	14 cm	6 cm	6 cm	14 cm	750s	650s
40	0,3	0,3	14 cm	6 cm	6 cm	14 cm	950	900s

Foi preciso redefinir os parâmetros PID dos controladores, isto porque agora tem-se que levar em consideração a capacitância dos tanques superiores, já que a maior parte do fluxo passam por eles, quando "X=0,3", atrasando um pouco a resposta do processo, por isso os tempos para estabilização dos níveis são maiores que na primeira e segunda forma de simulações.

7. Discussão geral

Como se pôde observar neste trabalho, nas três formas de simulações:

- A primeira forma de simulação (parâmetro X=0,7) o par de variáveis controlada e manipulada era adequado e o processo foi capaz de fornecer os resultados desejados, que eram o níveis de acordo com os set-points nos dois tanques inferiores TQ1 e TQ2.
- Na segunda forma de simulação (parâmetro X=0,3) o par de variáveis controlada e manipulada não era adequado e o processo foi incapaz de fornecer os resultados desejados, que eram os níveis de acordo com os set-points nos dois tanques inferiores TQ1 e TQ2.
- Na terceira forma de simulação, com o "Sistema Inteligente de Restabelecimento de Controle", (parâmetros X variando entre 0,3 e 0,7), o par de variáveis controlada e manipulada se tornava adequado a cada mudança da dinâmica e o processo foi capaz de fornecer os resultados desejados, que eram os níveis de acordo com os set-points nos dois tanques inferiores TQ1 e TQ2.

Em trabalhos de outros autores:

- Johansson (2000) idealizou esta planta com o intuito de testar sistemas de controles, onde se exige soluções para processos multivariáveis.

- Sagaz (2003), conseguiu excelente resultado, controlando esta mesma planta (os níveis dos tanques 1 e 2 individualmente, set-points diferentes) utilizando técnicas de lógica Fuzzy, utilizou como elemento final de controle as bombas (B1 e B2), porém informava para a rede a "causa" do problema (parâmetro X).

- Baptista (2014), conseguiu também um excelente resultado, controlando esta mesma planta (os níveis dos tanques 1 e 2 juntos, set-points iguais) utilizando técnicas de lógica Paraconsistente, porém utilizou como elemento final de controle as válvulas direcionais (V1 e V2) e também informava para a rede a "causa" do problema (parâmetro X).

Neste trabalho foi demostrado uma forma de controlar esta mesma planta (os níveis dos tanques 1 e 2 individualmente, set-points diferentes) utilizando técnicas de lógica Paraconsistente, utilizando como elemento final de controle as bombas (B1 e B2) e sem informar à rede a "causa" do problema (parâmetro X). A rede é capaz de detectar as mudanças na dinâmica do processo e mudar o par de variáveis manipuladas e controladas sem intervenção humana.

Copyright © 2014 ISESC.

8. Conclusões

O principal objetivo deste trabalho foi alcançado, que é o de se obter a recuperação do controle de um processo multivariável, onde a dinâmica do processo muda por variados motivos. Para atingir o objetivo, aplicaram-se técnicas de sistemas especialistas, Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores, da área de inteligência artificial. Como se viu, o sistema de quatro tanques é um sistema projetado para se alterar sua dinâmica. Ao se alterar a dinâmica deste processo, sistemas convencionais não são capazes de prover o seu controle. Foi projetado, desenvolvido, implementado e testado todo um sistema de inteligência capaz de detectar variações em um processo, e quando este processo se descontrola, o sistema promove a sua recuperação. O sistema conseguiu detectar mudanças na dinâmica e se recuperou de uma perda de controle sem nenhum tipo de informação sobre o problema (parâmetro "X") ou interferência humana. Este trabalho demostrou que informações de pontos chaves de um sistema multivariável podem ser extraídas em forma de evidências, e se criar uma rede especializada para detecções de algumas características e, por conseguinte, se tomar algumas decisões ou ações baseado nelas. Em trabalhos de outros autores o parâmetro "X" era informado e utilizado para atuação do sistema de controle. Esta pesquisa abre caminhos e reafirma a direção que pesquisadores estão tomando sobre resolução de problemas complexos nas áreas de Robótica, Instrumentação e Controle Industrial, Sistemas de distribuição de Energia Elétrica, Ciências Econômicas, Médicas e etc., utilizando técnicas de inteligência artificial. Não foi encontrada na literatura uma abordagem deste alcance com este sistema multivariável.

Trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros seguem duas ideias:

- Melhorar a Rede de Análise Paraconsistente a fim de diminuir o tempo de detecção da mudança de dinâmica do sistema.
- Elaborar um sistema de controle integralmente com Rede de Análise Paraconsistente e submete-lo as mesmas variações de dinâmica e set-points, a fim de superar o controle PID.
- Elaborar um controle contemplando um sistema anti-transbordo.

Referências

ABE, J. M. **Fundamentos da Lógica Anotada.** Tese de Doutoramento. FFLCH/USP - São Paulo, 1992.

ABE, J. M. **Um Panorama da Lógica Atual**. São Paulo: Coleção Cadernos de Estudos e Pesquisas - UNIP. Série: Estudos e Pesquisas, no 1-004/00,2000 (Relatório Técnico).

BAPTISTA, R. **Proposta de Modelo para Controle de Níveis de um Processo Multivariável de Quatro Tanques de Petróleo com Rede de Analise Paraconsistente.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UNISANTA – Universidade Santa Cecília, 2014, 125 p.

DA SILVA FILHO, J. I. **Métodos de Aplicações da Lógica Paraconsistente Anotada de Anotação com Dois Valores-LPA2v com Construção de Algoritmo de Implementação de Circuitos Eletrônicos.** São Paulo, SP: Universidade de São Paulo, Abril, 1999. Tese.

DA SILVA FILHO, J. I.; ABE, J. M. **Fundamentos das Redes Neurais Paraconsistentes: Destacando Aplicações em Neurocomputação**. São Paulo: Arte & Ciência, 1999.

DA SILVA FILHO, J. I. **Introdução às células neurais artificiais paraconsistentes.** Seleção Documental - GLPA, Santos, SP, n.8, pp.61–73, Outubro, Novembro, Dezembro, 2007.

DA SILVA FILHO, J. I.; ABE, J. M.; TORRES, G. L. **Inteligência Artificial com as Redes de Análises Paraconsistentes.** Editora LTC, 1ª. Ed., Rio de Janeiro, 2008, pp.4-185.

DA SILVA FILHO, J. I; SCALZITTI, A. **Análises de Sinais de Informações em Lógica Paraconsistente Anotada.** Ed. Paralogike, Santos, SP, n.14, Março, 2009.

DA SILVA FILHO, J. I. **Sistema Especialista no Tratamento de Incertezas e Tomadas de Decisão**. 1ª. Ed. Apostila Unisanta, 2014, 128 p.

DOTTAVIANO, ITALA M. LOFFREDO; GOMES, E. L. **On the development of logic in Brazil I: the early logic studies and the path to contemporary logic**. Revista Brasileira de História da Matemática , v. 11, p. 133-158, 2011.

GINN, D.; STREIBEL, B.; VARNER, E. **The design for six sigma memory jogger: tools and methods for robust processes and products.** 1st edn. Goal/QPC, 2004, 95p.

GONÇALVES, M. G. **Monitoramento e Controle de Processos.** 1ª. Ed. Apostila de treinamento Senai, Brasília, 2003, 100 p.

Copyright © 201x ISESC.

GROOVER, M. P. **Automação Industrial e Sistemas de Manufatura.** Editora Person, 3ª. Ed., São Paulo, 2011, pp.22-26.

LUKASIEWICZ, J. (1910/79). **Aristotle on the Law of Contradiction**. in Barnes, Schofield, Sorabji, (edd.), Articles on Aristotle, vol. 3, Londres: Duckworth, 1979,p. 50-62. Traduzido em português in Zingano, M. (ed.), Sobre a Metafísica de Aristóteles, Rio de Janeiro: Odysseus, 2005, p. 1-24

JOHANSSON, K. H. **The quadruple-tank process: A multivariable laboratory process with an adjustable zero.** Artigo técnico, IEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 8, Nº 3, 2000, pp. 456-465.

JAŚKOWSKI, S. **A propositional Calculus for Inconsistent Deductive Systems - 1948** (reprinted in: Studia Logica, 24 1969, pp 143–157 and in: Logic and Logical Philosophy 7, 1999 pp. 35–56).

MORAES JR.,D.; SILVA, E.L.; MORAES, M.S. **Aplicações Industriais de Estática e Dinâmica dos Fluídos I.** [S.l.: s.n.], 2014, 360 p.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno.** Editora PHB, Rio de Janeiro, 1970, pp.129-133.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno.** Editora LTC, 3ª. Ed., Rio de Janeiro, 2000, pp.83-84.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno.** 4. Ed. São Paulo: Ed. Pearson Prentice Hall, 2003.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno.** Editora Pearson, 5ª. Ed., São Paulo, 2010, 810 p.

OGUNNAIKE, B. A.; RAY, W. H. **Process Dynamics, Modeling and Control.** Oxford University Press, 1994, pp. 773-806.

OLIVEIRA, A. L. L. **Fundamentos de Controle de Processo**. 1ª. Ed. Apostila de treinamento Senai, Espírito Santo, 1999, 70 p.

PRADO, J. P. A. **Uma Arquitetura para Inteligência Artificial distribuída baseada em lógica Paraconsistente Anotada.** Tese de Doutorado, EPUSP, São Paulo, 1996.

PRADO, J. P. A.; ABE, J. M.; ÁVILA, B. C. **PARANET, A paraconsistent multi-agent system**. The First World Congress On Paraconsistency. Belgium, Universiteit Gent, 1997.

SAGAZ, F. S. G. **Sistema Baseado em lógica nebulosa aplicado ao controle dos níveis de um processo multivariável com quatro tanques.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, IME – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2003, 121 p.

SEBORG, D. E.; EDGARD, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **Process dynamics and control**. John Wiley & Sons, 2ª. Ed., 2004, pp.475-493.

SUBRAHMANIAN, V.S. **On the semantics of quantitative Lógic programs**. Proc. 4 th. IEEE Symposium on Logic Programming, Computer Society press, Washington DC, 1987.

TOCCI, Ronald J.; WIDMER, Neal S.; MOSS, Gregory L. **Sistemas digitais: princípios e aplicações.** Editora Person, 10ª. Ed., São Paulo, 2007, pp.45-232.

TORRES, C. R. **Sistema Inteligente Paraconsistente para Controle de Robôs Móveis Autônomos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2004, 85 p.

TORRES, C. R.; ABE, J. M.; LAMBERT-TORRES, G. **Sistema inteligente paraconsistente para controle de robôs móveis autônomos.** Revista de Ciências Exatas, Taubaté, SP, v.11, n.1, pp.21–27, 2005.

TORRES, C. R. **Sistema Inteligente Baseado na Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial $E\tau$ Para Controle e Navegação De Robôs Móveis Autônomos em um Ambiente não Estruturado.** Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010, 193 p.

VESELOV, V.; DEMCHENKO, E. **Turing Test Success Marks Milestone In Computing History.** University of Reading. Disponível em: http://www.reading.ac.uk/news-and-events/releases/PR583836.aspx Acesso em 03 Abr. 2016.

DA SILVA FILHO, J. I.; ABE, J. M. **Fundamentos das Redes Neurais Artificiais: destacando aplicações em Neurocomputação**. São Paulo: Villipress, 2001.

DA SILVA FILHO, J. I.; ABE, J. M.; LAMBERT-TORRES, G. L. **Inteligência artificial com as redes de análises Paraconsistentes**: **teoria e aplicações.** Rio de Janeiro: LTC, 2008.

Copyright © 2014 ISESC.