

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

VINÍCIUS RODRIGUES DOS SANTOS

**PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO MULTIVARIÁVEL DE QUATRO
TANQUES CONTROLADOS POR CONTROLADOR PID UTILIZANDO REDE DE
ANÁLISE PARACONSISTENTE**

SANTOS/SP

2016

VINÍCIUS RODRIGUES DOS SANTOS

**PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO MULTIVARIÁVEL DE QUATRO
TANQUES CONTROLADOS POR CONTROLADOR PID UTILIZANDO REDE DE
ANÁLISE PARACONSISTENTE**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação do Prof. Dr. Cláudio Rodrigo Torres.

SANTOS/SP

2016

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Dos Santos, Vinícius Rodrigues.

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

-- 2016.

n. de f.72

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Rodrigo Torres.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2016.

1. Controle de Processos. 2. Técnicas de Controle. 3. LPA2v
4. Processo Multivariável. 5. Automação. I. Torres, Cláudio Rodrigo, orient. II. Proposta de otimização de processo multivariável de quatro tanques controlados por controlador PID utilizando rede de análise paraconsistente.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas - Unisanta

*Dedico este projeto a todos que estiveram
comigo durante a vida, pois certamente aprendi
com cada um deles.*

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Edna Rodrigues dos Santos e meu filho Kauã Rodrigues dos Santos, por me apoiarem neste projeto.

Ao professor Doutor Claudio Rodrigo Torres, por suas valorosas contribuições na orientação deste trabalho e confiança em meu potencial.

Ao professor Doutor Marcos Tadeu Tavares Pacheco, por seus importantes ensinamentos sobre pesquisa e desenvolvimento.

Ao professor Doutor Luis Renato Bastos Lia, por sua didática impecável e cuidado nos ensinamentos.

Ao Mestre José Mauro Mendes, por me incentivar e apoiar em determinados momentos.

Aos profissionais que trabalharam comigo, que me ensinaram na prática como se deve trabalhar, tratar as pessoas, aprender, questionar, manter, consertar, projetar e melhorar. Isso certamente eu trouxe para o desenvolvimento deste trabalho, agradeço a vocês.

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 interconectá-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.

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 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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de Quatro Tanques (JOHANSSON, 2000).	16
Figura 2 – Instrumentação do Sistema quatro tanques proposto por Johansson (2000).	17
Figura 3 – Grupos e Subgrupos dos tipos de Lógicas.....	24
Figura 4 – Quadrado Unitário no Plano cartesiano – QUPC.....	29
Figura 5 - Aumento de Escala, Quadrado Unitário no Plano cartesiano QUPC.	30
Figura 6 - Quadrado Unitário no Plano cartesiano QUPC, com escala aumentada, Rotacionado 45° em relação e mantendo a origem.	31
Figura 7 - Movimentação de menos uma unidade no eixo "y".	31
Figura 8 - Transformação dos graus de evidências no QUPC (x, y) para o Reticulado da LPA2v (μ , λ).....	32
Figura 9 - Exemplo de análise Paraconsistente onde, para os sinais de evidencia $\mu=0,8$ e $\lambda=0,3$, resulta em sinais de $GC=0,5$ e $GCT=0,1$	33
Figura 10 – Simulação de uma análise Paraconsistente para demonstração da distância "D". Com: $\mu=0,4$; $\lambda=0,9$; $GCT=0,3$; $GC=-0,5$; $D=0,583$	35
Figura 11 - Simulação de uma análise Paraconsistente para demonstração da distância "GCR". Com: $\mu=0,9$; $\lambda=0,5$; $GCT=0,4$; $GC=0,4$; $D=0,721$; $GCR=0,278$	35
Figura 12 – Representação do algoritmo de análise paraconsistente da LPA2v com o cálculo do grau de contradição normalizado e intervalo de evidência.	38
Figura 13 - Símbolo do NAP com as saídas " μEr " e " $\varphi E \pm$ ".	39
Figura 14 - Proposta de simbologia para a operação disjunção na LPA2v.	40
Figura 15 - Proposta de simbologia para a operação conjunção na LPA2v.	40
Figura 16 - Planta Multivariável, Sistema Quatro Tanques, Johansson (2000), reproduzida do LabVIEW®.	41
Figura 17 - 1ª forma de simulações, ensaios 1 ao 10, parâmetro $X=0,7$	43
Figura 18 - 2ª forma de simulações, ensaios 11 ao 20, parâmetro $X=0,3$	46
Figura 19 - Rede paraconsistente para restabelecimento de controle de um sistema multivariável.....	52
Figura 20 - Flip-flop JK e a respectiva tabela da verdade.	56
Figura 21 - Flip-flop JK na configuração tipo "T", aplicado nível 1 na entrada, RAP como clock e a respectiva tabela da verdade.....	56
Figura 22 - Ilustração do funcionamento do sistema de inversão (saída "Q") em	

função da saída da rede inteligente (RAP).	57
Figura 23 – Diagrama de blocos do circuito detector de estado lógico.	57
Figura 24 - Símbolo ilustrativo de um relé duplo.	58
Figura 25 - Planta Multivariável, Sistema Quatro Tanques, Johansson (2000), com sistema inteligente de restabelecimento de controle, reproduzida no LabVIEW®.	59
Figura 26 - 3ª forma de simulações, ensaios 21 ao 30, parâmetro “X” alternando 0,3 e 0,7.	61
Figura 27 - 3ª forma de simulações, ensaios 31 ao 40, parâmetro “X” alternando 0,3 e 0,7.	62
Figura 28 – Carta de Controle para visualização gráfica do comportamento da planta.	68
Figura 29 - Modelo de um Tanque com duas entradas (Q1 e Q3) e uma saída (Q2).	77
Figura 30 – Processo múltiplas entradas e múltiplas saídas.	85
Figura 31 – Sistema 2x2.	86
Figura 32 - Controlador PID interligado a uma planta.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros da 1ª forma de Simulações e resultados.	42
Tabela 2 - Parâmetros da 2ª forma de Simulações e resultados.	45
Tabela 3 - Parâmetros da 3ª forma de simulações e resultados.....	60
Tabela 4 – Dados gerais e de estatística dos modos de simulações (após 1000s). .	67
Tabela 5 – Interpretação dos valores de γ	94

LISTA DE TERMOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

BINOMIAL	Distribuição de probabilidade discreta do número de sucessos numa sequência de um número de ensaios ou tentativa de Bernoulli.
BIT	(<i>Binary digit</i>) Menor unidade de informação binária.
CEP	Controle Estatístico do Processo.
CLOCK	Sinal usado para coordenar as ações de dois ou mais circuitos eletrônicos, oscila entre os estados alto e baixo.
DEGRAU	Mudança repentina de patamar na entrada do processo ou <i>set-point</i> .
DISTÚRBIO	Variáveis indesejáveis, de controle direto muito difícil e que afetam o desempenho do processo.
FASE	Dinâmica do processo que indica o quanto de vazão flui para os tanques.
FASE MÍNIMA	Quando a vazão para os tanques inferiores é menor que para os tanques superiores.
FASE NÃO MÍNIMA	Quando a vazão para os tanques inferiores é maior que para os tanques superiores.
FLIP-FLOP	Também conhecido como Multivibrador Biestável, são circuitos eletrônicos digitais, que funcionam a partir de um <i>clock</i> , capazes de servir como uma memória de um bit.
FLIP-FLOP TIPO "T"	(<i>Toggle</i>) Se a entrada estiver em estado "Alto", o flip-flop muda o estado sempre que houver um pulso de <i>clock</i> . Se a entrada estiver em estado "Baixo", o flip-flop mantém o valor do seu estado.
FUZZY	Lógica que lida com dados que contém algum tipo de incerteza. Para cada objeto ou declaração é dado em um valor no intervalo entre 0 e 1, indicando a sua adesão a um

determinado conjunto. Cada objeto pode ser membro de vários grupos com diferentes valores de adesão.

LabVIEW®

(*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é uma linguagem de programação gráfica originária da National Instruments.

LIC

(*Level Indicator Controller*) Indicador e Controlador de Nível.

LPA

Lógica Paraconsistente Anotada.

LPA2v

Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores.

MIMO

(*Multiple-Input Multiple-Output*) São processos multivariáveis, com mais de uma variável de entrada e mais de uma variável de saída, uma ou mais interferindo nas outras.

NAP

Nó de Análise Paraconsistente.

PID

Técnica de controle de processos que une as ações derivativa, integral e proporcional.

PRODUTO DE HADAMARD

Multiplicação entre vetores e matrizes feita elemento a elemento.

PROPOSIÇÃO

Trata-se de uma sentença declarativa, declarado por meio de palavras, cuja poderá ser considerada verdadeira ou falsa.

QUPC

Quadrado Unitário do Plano Cartesiano.

RAP

Rede de Análise Paraconsistente.

RETICULADO DE HASSE

É um diagrama matemático utilizado para representar um conjunto parcialmente ordenado finito, na forma de um grafo de sua redução transitiva, no qual se pode representar o sistema lógico paraconsistente, dando conotações de valoração, associando valores lógicos a uma proposição.

RGa	(<i>Relative Gain Array</i>) Matriz de Ganhos Relativos, técnica empregada para obtenção dos pares mais sensíveis e do emparelhamento mais adequado das variáveis controladas e manipuladas do processo.
SET-POINT	Valor alvo que um sistema de controle automático tentará alcançar.
SISO	(<i>Single-Input Single-Output</i>) São processos onde existe a influência de uma entrada sobre uma saída.
TQ1	Tanque 1 (tanque inferior esquerdo).
TQ2	Tanque 2 (tanque inferior direito).
VARIÁVEL CONTROLADA	Variável do processo que é medida e sobre a qual se deseja controlar.
VARIÁVEL MANIPULADA	Variável do processo sobre a qual o controle automático atua, no sentido de se manter a variável controlada no valor desejado.
VC	Volume de Controle, volume definido no espaço através do qual o fluido escoar.
VCC	Tensão Contínua ou tensão CC, tensão elétrica fornecida ao circuito de polaridades invariáveis.
LIE	Limite Inferior de Especificação do Processo
E	Especificação do Processo
LSE	Limite Superior de Especificação do Processo
pDi	Proporção de defeitos por amostra
Di	Defeitos na amostra "i"
GRÁFICO p	Carta de controle para fração de itens não conformes ou defeituosos.

ni

Tamanho da Amostra "i"

LISTA DE SIMBOLOS

SP_1	<i>Set-point 1</i>
SP_2	<i>Set-point 2</i>
$C_c(s)$	Saída do controlador PID
K_p	Ganho proporcional do controlador
$T_i s$	Tempo integral do controlador
$T_d s$	Tempo derivativo do controlador
B1	Bomba 1
B2	Bomba 2
K_1	Fator da bomba “B1”
K_2	Fator da bomba “B2”
V1	Válvula de 3 vias 1
V2	Válvula de 3 vias 2
X	Parâmetro “X”, utilizado para mudar a dinâmica do processo
X_1	Parâmetro de 0 a 1, que configura a válvula direcional V1
X_2	Parâmetro de 0 a 1, que configura a válvula direcional V2
V	Volume
Q	Vazão volumétrica
Q_{B1}	Vazão volumétrica fornecida pela bomba “B1”
Q_{V1}	Vazão volumétrica através da válvula direcional V1 para o tanque 1
Q_{V4}	Vazão volumétrica através da válvula direcional V1 para o Tanque 4
Q_1	Entrada de fluido parcial 1 no tanque
Q_2	Saída de fluido do tanque

Q_3	Entrada de fluído parcial 2 no tanque
h	Nível do tanque, diferença entre h_a e h_b
h_a	Altura do nível do tanque em relação a uma referência
h_b	Altura do escoamento do tanque em relação a uma referência
h_1	Altura do líquido, nível no Tanque 1
h_2	Altura do líquido, nível no Tanque 2
h_3	Altura do líquido, nível no Tanque 3
h_4	Altura do líquido, nível no Tanque 4
a	Seção transversal do tubo de escoamento
a_1	Seção do tubo de saída do tanque 1
a_2	Seção do tubo de saída do tanque 2
a_3	Seção do tubo de saída do tanque 3
a_4	Seção do tubo de saída do tanque 4
A	Seção transversal do tanque
A_1	Seção transversal do Tanque 1
A_2	Seção transversal do Tanque 2
A_3	Seção transversal do Tanque 3
A_4	Seção transversal do Tanque 4
$\emptyset$	Diâmetro do tubo ou tanque
vc	Volume de controle
$\frac{dM}{dt}$	Massa acumulada por unidade de tempo no vc
$\frac{dV}{dt}$	Volume acumulado por unidade de tempo no Tanque ou Volume de Controle (vc)
$\frac{dh}{dt}$	Nível acumulado por unidade de tempo no Tanque ou Volume de Controle (vc)

$\frac{dh_1}{dt}$	Nível acumulado por unidade de tempo no Tanque 1
$\frac{dh_2}{dt}$	Nível acumulado por unidade de tempo no Tanque 2
$\frac{dh_3}{dt}$	Nível acumulado por unidade de tempo no Tanque 3
$\frac{dh_4}{dt}$	Nível acumulado por unidade de tempo no Tanque 4
M	Massa
w	Vazão mássica, massa por unidade de tempo
$w_{e,vc}$	(Vazão mássica) Massa por unidade de tempo que entra no vc
$w_{s,vc}$	(Vazão mássica) Massa por unidade de tempo que sai do vc
ρ	Massa específica
$\rho_{s,vc}$	Massa específica na saída do vc
$\rho_{e,vc}$	Massa específica que entra no vc
$v_{s,vc}$	Velocidade do fluido que sai do vc
$v_{e,vc}$	Velocidade do fluido que entra no vc
$A_{s,vc}$	Seção transversal do tubo de saída do vc
$A_{e,vc}$	Seção transversal do tubo de entrada do vc
P_1	Pressão na superfície do líquido do tanque (no caso pressão de 1 atm.)
P_2	Pressão do fluido na saída do tanque (no caso pressão de 1 atm.)
d	Densidade da água
g	Aceleração da gravidade
v	Velocidade do fluido
v_1	Velocidade da variação do nível do tanque
v_2	Velocidade do líquido no tubo de saída
V_{cc}	Tensão de corrente contínua

$V_{cc\ 1}$	Tensão 0 a 12 Vcc, aplicada à bomba “B1”
$V_{cc\ 2}$	Tensão 0 a 12 Vcc, aplicada à bomba “B2”
ΔM_1	Variação da variável manipulada 1
ΔM_2	Variação da variável manipulada 2
ΔC_1	Variação da variável controlada 1
ΔC_2	Variação da variável controlada 2
K_{11}	Sistema que através dele, faz com que ΔM_1 influencie em ΔC_1 em malha aberta
K_{12}	Sistema que através dele, faz com que ΔM_2 influencie em ΔC_1 , em malha aberta
K_{21}	Sistema que através dele, faz com que ΔM_1 influencie em ΔC_2 em malha aberta
K_{22}	Sistema que através dele, faz com que ΔM_2 influencie em ΔC_2 em malha aberta
K'_{11}	Sistema que através dele, faz com que ΔM_1 influencie em ΔC_1 em malha fechada
K'_{12}	Sistema que através dele, faz com que ΔM_2 influencie em ΔC_1 , em malha fechada
K'_{21}	Sistema que através dele, faz com que ΔM_1 influencie em ΔC_2 em malha fechada
K'_{22}	Sistema que através dele, faz com que ΔM_1 influencie em ΔC_1 em malha fechada
Λ	Matriz de Ganhos Relativos
γ_{ij}	Cada termo da Matriz de Ganhos Relativos
$\left(\frac{\Delta C_i}{\Delta M_j}\right)_M$	Ganho Relacional de Malha Aberta
$\left(\frac{\Delta C_i}{\Delta M_j}\right)_C$	Ganho Relacional de Malha Fechada
μ	Evidência favorável à uma determinada proposição
λ	Evidência desfavorável à uma determinada proposição
$\Re$	Conjunto dos números reais
τ	Reticulado de Hasse

$\perp$	Paracompleto ou indeterminado
F	Falso
T	Inconsistente
V	Verdadeiro
$P_{(\mu,\lambda)}$	Fórmula atômica, notação de um sinal paraconsistente
G_C	Grau de certeza
G_{Ct}	Grau de contradição
$\varepsilon\tau$	Estado lógico resultante da análise paraconsistente
μ_{ctr}	Grau de Contradição Normalizado
D	Distância que vai do ponto de interpolação (G_C, G_{Ct}) , ou seja, estado lógico " $\varepsilon\tau$ " até o ponto de mínimo -1 do Grau de Certeza
G_{CR}	Grau de Certeza Real
μ_{Er}	Grau de Evidência Resultante Real
φ_E	Intervalo de Evidência
$\varphi_{E(\pm)}$	Intervalo de Evidência Sinalizado
$\vee$	Disjunção, operador OU
$\wedge$	Conjunção, operador E
$\bar{p}$	Média da proporção de defeitos por amostra

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	GENERALIDADES	13
1.2	MOTIVAÇÃO	13
1.3	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	13
1.4	OBJETIVOS.....	14
1.5	PLATAFORMA DE DESENVOLVIMENTO	14
1.6	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	15
2	EXPLANAÇÃO DO SISTEMA MULTIVARIÁVEL DE QUATRO TANQUES.....	16
2.1	INSTRUMENTAÇÃO ORIGINAL DO SISTEMA MULTIVARIÁVEL DE QUATRO TANQUES	17
2.2	EQUACIONAMENTO DO SISTEMA DE QUATRO TANQUES.....	18
2.2.1	EQUACIONAMENTO DO TANQUE 1.....	18
2.2.2	EQUACIONAMENTO DO TANQUE 2.....	19
2.2.3	EQUACIONAMENTO DO TANQUE 4.....	20
2.2.4	EQUACIONAMENTO DO TANQUE 3.....	21
3	SISTEMAS ESPECIALISTAS, INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E LÓGICA	23
3.1	SISTEMAS ESPECIALISTAS	23
3.2	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	23
3.3	LÓGICA	24
3.3.1	LÓGICA CLÁSSICA	24
3.3.2	LÓGICAS NÃO CLÁSSICAS.....	25
3.4	LÓGICA PARACONSISTENTE.....	25
3.4.1	PRECURSORES DA LÓGICA PARACONSISTENTE.....	26
3.4.2	DESENVOLVIMENTOS NA ÁREA DA LÓGICA PARACONSISTENTE	26
3.5	LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA – LPA	27
3.6	LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA DE ANOTAÇÃO COM DOIS VALORES – LPA2v	28
3.6.1	CRIAÇÃO DO RETICULADO DA LPA2V	29
3.6.2	O GRAU DE CERTEZA " GC " E O GRAU DE CONTRADIÇÃO " Gct "	32
3.6.3	GRAU DE CONTRADIÇÃO NORMALIZADO " μ_{ctr} "	34
3.6.4	A DISTÂNCIA " D "	34
3.6.5	O GRAU DE CERTEZA REAL " GCR "	35
3.6.6	O GRAU DE EVIDÊNCIA RESULTANTE REAL " μ_{Er} "	36
3.6.7	INTERVALO DE EVIDÊNCIA " ϕE "	36
3.6.8	SINALIZAÇÃO DO INTERVALO DE EVIDÊNCIA " $\phi E(\pm)$ "	37
3.6.9	ALGORITMO DE ANÁLISE PARACONSISTENTE DA LPA2v COM SAÍDA DE GRAU DE EVIDÊNCIA RESULTANTE REAL " μ_{Er} " COM INTERVALO DE EVIDÊNCIA " $\phi E(\pm)$ "	37
3.6.10	NÓ DE ANÁLISE PARACONSISTENTE – NAP	38
3.6.11	OPERAÇÕES LÓGICAS NO RETICULADO DA LPA2V.....	39
3.6.11.1	DISJUNÇÃO, OPERADOR OU	39
3.6.11.2	CONJUNÇÃO, OPERADOR E	40
4	CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE QUATRO TANQUES NO LabVIEW® ..	41

4.1	ENSAIOS PARA LEVANTAMENTO DE DADOS COM O SISTEMA ORIGINAL MULTIVARIÁVEL DE QUATRO TANQUES.....	41
4.2	PRIMEIRA FORMA DE SIMULAÇÕES.....	42
4.3	MATRIZ RGA PARA A PRIMEIRA FORMA DE SIMULAÇÃO.....	44
4.4	DISCUSSÃO SOBRE A PRIMEIRA FORMA DE SIMULAÇÃO COM O SISTEMA ORIGINAL.....	44
4.5	SEGUNDA FORMA DE SIMULAÇÕES.....	45
4.6	MATRIZ RGA PARA A SEGUNDA FORMA DE SIMULAÇÃO.....	47
4.7	DISCUSSÃO SOBRE A SEGUNDA FORMA DE SIMULAÇÃO COM O SISTEMA ORIGINAL.....	47
5	REDE DE RESTABELECIMENTO DE UM SISTEMA MULTIVARIÁVEL ...	49
5.1	CONSTRUÇÃO DA REDE	50
5.2	MODELAMENTO DAS VARIÁVEIS	50
5.3	REDE DE RESTABELECIMENTO DE CONTROLE.....	52
5.4	DESCRIÇÃO DOS NAP'S DA RAP DE RESTABELECIMENTO.....	53
5.5	CIRCUITO ACIONADOR DO CHAVEAMENTO	55
5.6	FLIP-FLOP OU MULTIVIBRADOR BIESTÁVEL.....	55
5.7	DETECTOR DE ESTADO LÓGICO	57
5.8	CHAVE DE INVERSÃO.....	58
6	CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE QUATRO TANQUES COM SISTEMA INTELIGENTE DE RESTABELECIMENTO DE CONTROLE NO LABVIEW®	59
6.1	ENSAIOS PARA LEVANTAMENTO DE DADOS COM O SISTEMA MULTIVARIÁVEL DE QUATRO TANQUES COM SISTEMA INTELIGENTE DE RESTABELECIMENTO DE CONTROLE.....	59
6.2	DISCUSSÃO SOBRE A TERCEIRA FORMA DE SIMULAÇÃO COM O SISTEMA INTELIGENTE DE RESTABELECIMENTO DE CONTROLE.....	63
7	RESULTADOS.....	64
7.1	CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO (CEP)	65
7.2	CAPACIDADE DO PROCESSO	68
7.3	DISCUSSÃO GERAL	69
8	CONCLUSÃO	71
8.1	TRABALHOS FUTUROS.....	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	APÊNDICE A – MODELAMENTO DE UM TANQUE.....	77
	APÊNDICE B - MATRIZ RGA (MATRIZ DE GANHOS RELATIVOS)	85
	APÊNDICE C - BLOCOS DESACOPLADORES	95
	APÊNDICE D – DESCRIÇÃO DOS BLOCOS E ESTRUTURAS NO LABVIEW ...	96
	APÊNDICE E - CONTROLE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS.....	108

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

Alguns processos industriais são diferenciados seja devido a sua complexidade, periculosidade, serviços 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.

1.2 MOTIVAÇÃO

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.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

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, utilizou a técnica (PID – Controlador Proporcional Integral e Derivativo). Nos seus ensaios constatou que em determinado valor de fase ou dinâmica, 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.

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.

1.4 OBJETIVOS

O objetivo foi prover o restabelecimento deste sistema multivariável automaticamente sem informar o problema e sem intervenção humana, para isso, foi desenvolvido uma rede, RAP – Rede de Análise Paraconsistente, utilizando a LPA2v – Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores, formando uma rede especializada. A instrumentação da planta foi a mesma empregada e idealizada por Johansson (2000), com controle PID (Proporcional Integral Derivativo).

1.5 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.

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

A princípio esta planta¹ 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.

¹ O caminho através do próprio LabVIEW® onde se pode encontra-la é: No menu principal do LabVIEW®, clicar em: Help/Find Examples... Em "Browse" selecionar "Task", clicar em: Control and Simulation\Case Studies\Process Control\Quadruple Tank System.vi

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.

1.6 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação esta organizada da seguinte forma. O capítulo 1 traz uma abordagem geral, importância e motivação sobre o tema, indica os principais trabalhos realizados na área e as suas limitações onde são expostos os objetivos deste trabalho como também a plataforma empregada. No capítulo 2 é explanado o sistema proposto por Johansson, seu funcionamento e suas características, também neste mesmo capítulo é apresentado como Johansson instrumentou originalmente a planta e como foi o processo de modelamento para cada um dos tanques e de todo o sistema de tanques. No capítulo 3 é explanado sobre Sistemas Especialistas, inteligência Artificial e Lógicas, Lógica Paraconsistente, desenvolvimentos na área, LPA2v (Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores) e suas equações, características e evoluções, NAP's, sua simbologias e operações. No capítulo 4 é apresentada a planta original de Johansson em LabVIEW®. São mostrados os métodos de como foram realizados os ensaios com a planta original para levantamento de dados, é realizada uma discussão sobre os ensaios feitos com a planta original. Também é demonstrado o que é, e como se pode obter a matriz de ganhos relativos - RGA de um processo multivariável. No capítulo 5 é construída a RAP (Rede de Análise Paraconsistente) e seus componentes com o modelamento das evidências e a descrição dos NAP's (Nós de Análises Paraconsistentes). No capítulo 6 é realizado a implantação da rede na plataforma LabVIEW®, são realizados ensaios com a planta modificada para levantamento de dados e apresentada a discussão sobre os ensaios feitos com a planta modificada. No capítulo 7 são demonstrados e discutidos os resultados de todos os ensaios, realizado uma discussão geral sobre este trabalho e de outros autores. A conclusão e oportunidades para trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 8. Por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas e os apêndices deste trabalho.

2 EXPLANAÇÃO DO SISTEMA MULTIVARIÁVEL DE QUATRO TANQUES

A explanação do sistema proposto por (JOHANSSON, 2000) é apresentada a seguir:

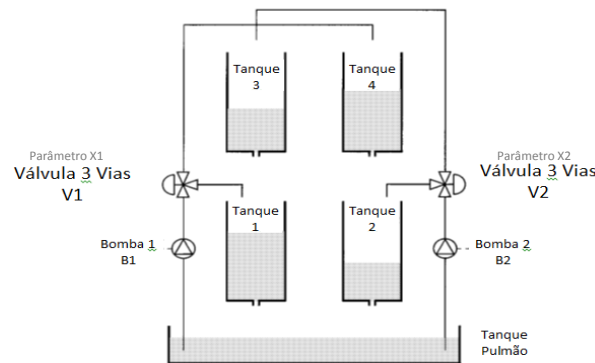


Figura 1 - Sistema de Quatro Tanques (JOHANSSON, 2000).

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 possui 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 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.

2.1 INSTRUMENTAÇÃO ORIGINAL DO SISTEMA MULTIVARIÁVEL DE QUATRO TANQUES

Para o seu trabalho, Johansson (2000) implantou a seguinte instrumentação no sistema (figura 2).

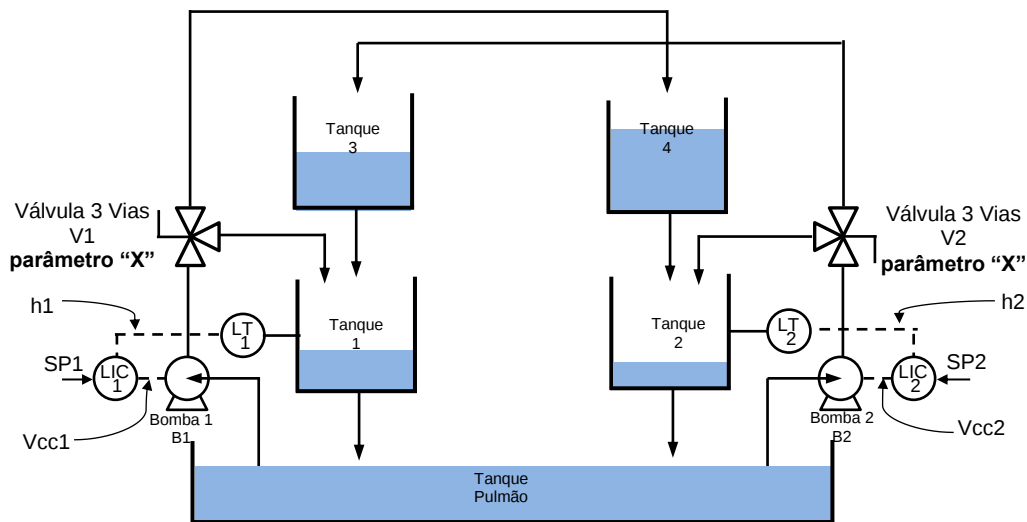


Figura 2 – Instrumentação do Sistema quatro tanques proposto por Johansson (2000).

A instrumentação proposta por Johansson (2000) prevê como sensores somente os transmissores de nível LT1 e LT2. Para o controle, os indicadores e controladores de nível (PID) LIC1 e LIC2. Como elemento final de controle, as bombas B1 e B2. As válvulas de 3 vias, V1 e V2, são ajustadas manualmente antes da simulação (parâmetro X) para se estudar a mudança da dinâmica da planta.

Sendo:

h1 = Sinal do nível do tanque 1

h2 = Sinal do nível do tanque 2

Vcc1 = Tensão 0 a 12 Vcc, aplicada à bomba “B1”

Vcc2 = Tensão 0 a 12 Vcc, aplicada à bomba “B2”

SP1 = *Set-point* do LIC1

SP2 = *Set-point* do LIC2

2.2 EQUACIONAMENTO DO SISTEMA DE QUATRO TANQUES

A seguir demonstra-se o equacionamento dos tanques e a explanação do sistema.

2.2.1 EQUACIONAMENTO DO TANQUE 1

Duas são as vazões volumétricas que entram no tanque 1 da figura 2, uma provém da válvula V1 e outra do escoamento do tanque 3.

O escoamento do tanque 1 vai para o tanque pulmão.

A Bomba “B1” fornece uma vazão volumétrica ao aplicarmos uma tensão de 0 a 12 Vcc em seus terminais. Um fator “K” obtido experimentalmente por Johansson (2000), multiplicado por esta tensão, fornece o valor da vazão volumétrica.

$$Q_{B1} = K_1 \cdot V_{cc1} \quad (2.2.1.1)$$

Q_{B1} = Vazão volumétrica fornecida pela bomba “B1”, (cm^3/s).

K_1 = Fator da bomba “B1”, (3,33), *obtido experimentalmente por Johansson (2000)*.

V_{cc1} = Tensão 0 a 12 Vcc, aplicada à bomba “B1”, (V).

A vazão fornecida por “B1” é “dividida” na válvula direcional “V1”. O parâmetro “X” configura a válvula direcional “V1”, conforme explanado no funcionamento da planta anteriormente, capítulo 2.

$$Q_{V1} = X_1 \cdot Q_{B1} \quad (2.2.1.2)$$

Substituindo 2.2.1.1 em 2.2.1.2 temos:

$$Q_{V1} = X_1 \cdot K_1 \cdot V_{cc1} \quad (2.2.1.3)$$

Q_{V1} = Vazão volumétrica através da válvula direcional V1 para o tanque 1, cm^3/s .

X_1 = Parâmetro que configura a válvula direcional V1.

Como Q_{V1} é uma das vazões volumétricas parciais de entrada do tanque 1 pode-se associá-la a Q_1 ².

$$Q_{V1} = Q_1 \quad (2.2.1.4)$$

A outra vazão volumétrica de entrada no tanque 1 é a proveniente do escoamento do tanque 3, ver figura 2.

² Para mais detalhes, ver figura 29 do Apêndice A.

Equação de escoamento³ do tanque 3:

$$Q_3 = a_3 \sqrt{2gh_3} \quad (2.2.1.5)$$

Abaixo tem-se o equacionamento⁴ genérico do tanque 1:

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{a_1 \sqrt{2gh_1}}{A_1} + \frac{Q_1}{A_1} + \frac{Q_3}{A_1} \quad (2.2.1.6)$$

Sabendo-se que $Q_{V1} = Q_1$, substitui-se a equação 2.2.1.3 e 2.2.1.5 na equação 2.2.1.6 obtém-se a equação 2.2.1.7.

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{a_1 \sqrt{2gh_1}}{A_1} + \frac{X_1 \cdot K_1 \cdot V_{cc1}}{A_1} + \frac{a_3 \sqrt{2gh_3}}{A_1} \quad (2.2.1.7)$$

Rearranjando, obtém-se a equação final para o tanque 1, figura 2.

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{2gh_3} + \frac{X_1 \cdot K_1}{A_1} V_{cc1} \quad (2.2.1.8)$$

$\frac{dh_1}{dt}$ = Nível acumulado por unidade de tempo no Tanque 1, (cm).

a_1 = Seção do tubo de saída do tanque 1, (cm²).

A_1 = Seção transversal do Tanque 1, (cm²).

g = Aceleração da gravidade, (cm/s²).

h_1 = Altura do líquido, nível, no Tanque 1, (cm)

a_3 = Seção do tubo de saída do tanque 3, (cm²).

h_3 = Altura do líquido, nível, no Tanque 3, (cm).

X_1 = Parâmetro de 0 a 1, que configura a válvula direcional V1.

K_1 = Fator da bomba "B1", (3,33). *"Obtido experimentalmente por Johansson (2000)".*

V_{cc1} = Tensão 0 a 12 Vcc, aplicada à bomba "B1", (V).

2.2.2 EQUACIONAMENTO DO TANQUE 2

Observando o funcionamento do sistema de quatro tanques, capítulo 2, e utilizando o mesmo raciocínio do equacionamento para o tanque 1, figura 2, pode-se

³ A dedução do escoamento de um tanque encontra-se no Apêndice A, item 3, equação 3.21.

⁴ A dedução do equacionamento genérico do tanque encontra-se no Apêndice A, item 5, equação 5.6.

fazer a associação e chegar-se a equação 2.2.2.1, tanque 2, figura 2.

$$\frac{dh_2}{dt} = -\frac{a_2}{A_2}\sqrt{2gh_2} + \frac{a_4}{A_2}\sqrt{2gh_4} + \frac{X_2 \cdot K_2}{A_2}V_{cc2} \quad (2.2.2.1)$$

$\frac{dh_2}{dt}$ = Nível acumulado por unidade de tempo no Tanque 2, (cm)

a_2 = Seção do tubo de saída do tanque 2, (cm²).

A_2 = Seção transversal do Tanque 2, (cm²).

g = Aceleração da gravidade, (cm/s²).

h_2 = Altura do líquido no Tanque 2 (nível), (cm)

a_4 = Seção do tubo de saída do tanque 4, (cm²).

h_4 = Altura do líquido no Tanque 4 (nível), (cm)

X_2 = Parâmetro de 0 a 1, que configura a válvula direcional V2.

K_2 = Fator da bomba "B2", (3,35) "Obtido experimentalmente por Johansson (2000)".

V_{cc2} = Tensão 0 a 12 Vcc, aplicada à bomba "B2" (V).

2.2.3 EQUACIONAMENTO DO TANQUE 4

Pode-se observar na figura 2 que, para o tanque 4, existe somente uma entrada de vazão volumétrica que provém da válvula V1.

O escoamento do tanque 4, entra para o tanque 2, figura 2.

Visualizando a figura 2 e a explanação da planta do sistema de quatro tanques, capítulo 2, pode-se notar que a quantidade de vazão que entra para o tanque 4 é o complemento da vazão volumétrica parcial que entra para o tanque 1 através de V1.

O parâmetro " X_1 " determina o posicionamento da válvula direcional (V1) e, por conseguinte a quantidade de vazão volumétrica que entra nos tanque 1 e 4 através de V1.

Visualizando a equação 2.2.1.3, a vazão volumétrica parcial através de V1 que entra no tanque 1 da figura 2, é reproduzida em 2.2.3.1:

$$Q_{V1} = X_1 \cdot K_1 \cdot V_{cc1} \quad (2.2.3.1)$$

Como X_1 determina a quantidade de vazão volumétrica que entra no tanque 1 através de V1, pode-se deduzir que o seu complemento determina a quantidade de vazão volumétrica que entra no tanque 4, figura 2.

$$\text{Complemento } X_1 = 1 - X_1 \quad (2.2.3.2)$$

Então a vazão volumétrica que entra no tanque 4, figura 2 é:

$$Q_{V4} = (1 - X_1) \cdot K_1 \cdot V_{cc1} \quad (2.2.3.3)$$

Q_{V4} = Vazão volumétrica que entra no Tanque 4

Abaixo tem-se o equacionamento⁵ genérico do tanque 4:

$$\frac{dh_4}{dt} = -\frac{a_4 \sqrt{2gh_4}}{A_4} + \frac{Q_{V4}}{A_4} \quad (2.2.3.4)$$

Substituindo a equação 2.2.3.3 na equação 2.2.3.4 obtém-se a equação 2.2.3.5.

$$\frac{dh_4}{dt} = -\frac{a_4 \sqrt{2gh_4}}{A_4} + \frac{(1 - X_1) \cdot K_1 \cdot V_{cc1}}{A_4} \quad (2.2.3.5)$$

Rearranjando, obtém-se a equação final para o tanque 4, figura 2.

$$\frac{dh_4}{dt} = -\frac{a_4}{A_4} \sqrt{2gh_4} + \frac{(1 - X_1) \cdot K_1}{A_4} V_{cc1} \quad (2.2.3.6)$$

$\frac{dh_4}{dt}$ = Nível acumulado por unidade de tempo no Tanque 4 (cm)

a_4 = Seção do tubo de saída do tanque 4 (cm²).

A_4 = Seção transversal do Tanque 4 (cm²).

g = Aceleração da gravidade (cm/s²).

h_4 = Altura do líquido, nível no Tanque 4 (cm).

X_1 = Parâmetro de 0 a 1, que configura a válvula direcional V1.

K_1 = Fator da bomba "B1", (3,33). "Obtido experimentalmente por Johansson (2000)".

V_{cc1} = Tensão 0 a 12 Vcc, aplicada à bomba "B1", (V).

2.2.4 EQUACIONAMENTO DO TANQUE 3

Observando o funcionamento do sistema de quatro tanques, capítulo 2, e utilizando o mesmo raciocínio do equacionamento para o tanque 4 da figura 2, podemos fazer a associação e chegarmos ao equacionamento do tanque 3, equação 2.2.4.1.

⁵ A dedução do equacionamento genérico do tanque encontra-se no Apêndice A, equação 5.6.

$$\frac{dh_3}{dt} = -\frac{a_3}{A_3}\sqrt{2gh_3} + \frac{(1-X_2) \cdot K_2}{A_3}V_{cc2} \quad (2.2.4.1)$$

$\frac{dh_3}{dt}$ = Nível acumulado por unidade de tempo no Tanque 3(cm).

a_3 = Seção do tubo de saída do tanque 3 (cm^2).

A_3 = Seção transversal do Tanque 3(cm^2).

g = Aceleração da gravidade (cm/s^2).

h_3 = Altura do líquido, nível no Tanque 3 (cm).

X_2 = Parâmetro de 0 a 1, que configura a válvula direcional V2.

K_2 = Fator da bomba “B2”, (3,35). *“Obtido experimentalmente por Johansson (2000)”*.

V_{cc2} = Tensão 0 a 12 Vcc, aplicada à bomba “B2”, (V).

3 SISTEMAS ESPECIALISTAS, INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E LÓGICA

3.1 SISTEMAS ESPECIALISTAS

Sistema Especialista é um sistema computacional que se utiliza do conhecimento de um especialista humano para resolução variados problemas. O conhecimento pode ser extraído de um ou mais especialistas, peritos humanos ou base de dados (DA SILVA FILHO, 1999).

A resolução de problemas por um Sistema Especialista pode ser uma resposta para uma ação em um processo de instrumentação, automação e controle, de uma máquina operatriz ou em uma planta de produção.

Um Sistema Especialista é projetado e desenvolvido para atender a uma aplicação onde se exija conhecimentos específicos para uma tomada de decisão.

O sistema especialista deve possuir certas peculiaridades da dinâmica do processo, seu funcionamento, comportamento, para que seja possível o seu projeto e, por conseguinte a decisão ou resposta seja a requerida.

Em Da Silva Filho (1999), por exemplo, foi desenvolvido, com base na LPA2v, um sistema especialista chamado Controlador Lógico Paraconsistente (ParaControl), que foi aplicado em um robô chamado Emmy I, que desempenha a função de desviar de obstáculos em um ambiente não estruturado.

3.2 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

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.

Os sistemas especialistas são uma área da Inteligência artificial. A inteligência artificial pode contemplar sistemas como o de se comunicar ou ser generalista por exemplo.

Como exemplo de um sistema especialista poder se comunicar, em Veselov, V., Demchenko, E., (2014) foi demonstrado, em evento organizado pela Universidade

de Reading na Royal Society em Londres, no Reino Unido, um programa chamado “Eugene Goostman” que convenceu dez de trinta juízes que era um humano, o chamado teste de Turing.

3.3 LÓGICA

Para se desenvolver um sistema especialista é necessário o emprego de uma lógica. Abaixo, na figura 3, temos um exemplo de ramificações de lógicas.

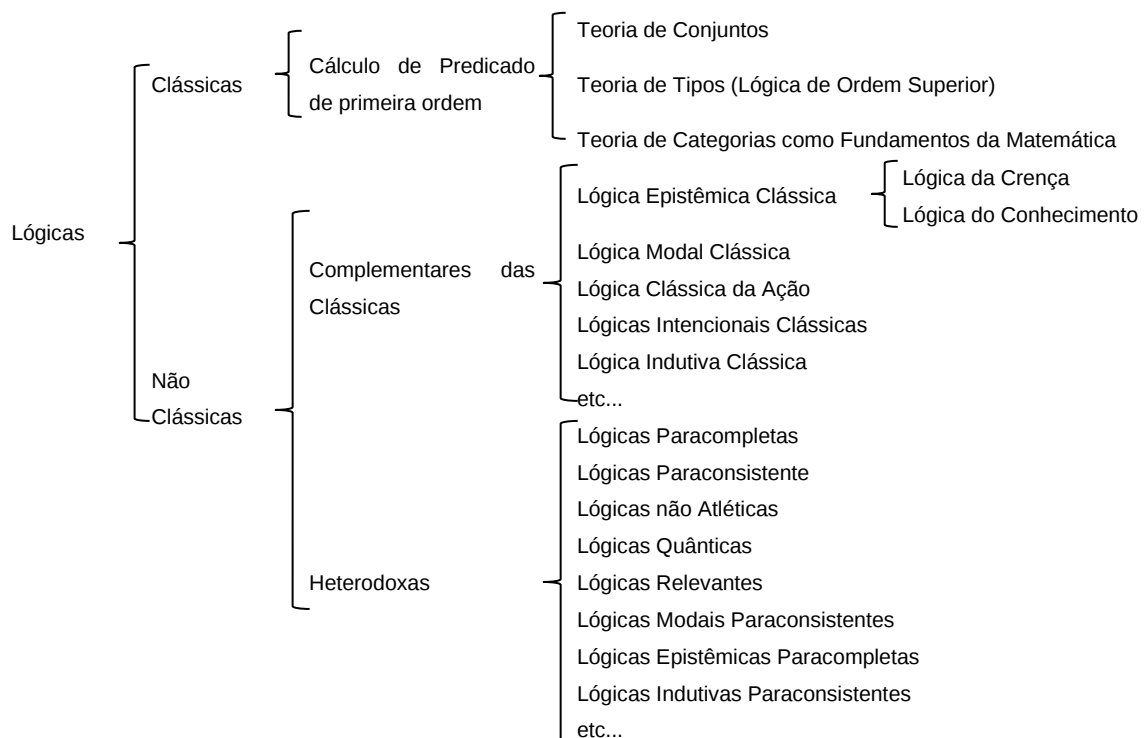


Figura 3 – Grupos e Subgrupos dos tipos de Lógicas.

Fonte: (Elaborado à partir de DA SILVA FILHO; ABE; TORRES, 2008, pp.4-7).

3.3.1 LÓGICA CLÁSSICA

A Lógica Clássica que, ao que tudo indica foi criada por Aristóteles, é estruturada com leis e conceitos rigidamente binários.

Podem-se enumerar alguns conceitos binários que regem a Lógica Clássica:

1. Princípio da Identidade:

Todo objeto é idêntico a si mesmo;

2. Princípio do terceiro excluído:

De duas proposições contraditórias (isto é, tais que uma é a negação da outra) uma delas é verdadeira.

3. Princípio da contradição (ou da não contradição):

Entre duas proposições contraditórias, uma é falsa.

3.3.2 LÓGICAS NÃO CLÁSSICAS

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.

Sistemas especialistas utilizando a Lógica Paraconsistente, como outras lógicas não clássicas, nasceram da necessidade de se criar análises mais eficientes, com capacidade de considerar situações reais que fogem às rígidas leis binárias da Lógica Clássica, tais como situações de inconsistência. Dito de outro modo, uma lógica Paraconsistente mostra-se capaz de manipular sistemas inconsistentes sem o perigo de trivialização (DA SILVA FILHO; ABE,1999).

3.4 LÓGICA PARACONSISTENTE

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.

As informações podem ser:

- Incompletas
- Ambíguas
- Complexas
- Vagas
- Contraditórias

Por outro lado a Lógica Clássica não permite a separação entre informação

inconsistente e trivial. A Lógica Clássica não trabalha com informações inconsistentes.

3.4.1 PRECURSORES DA LÓGICA PARACONSISTENTE

O médico russo Nikolai Vasiliev, entre 1910 e 1913, escreveu em russo, sobre construções de lógicas onde possibilita a derrogação de algumas formas da lei do terceiro excluído e da lei da “não contradição”. As traduções destes trabalhos constam em Arruda (1990).

O lógico polonês Jan Lukasiewicz, por volta de 1910, trabalhou na mesma linha que Nikolai Vasiliev, no desenvolvimento da lógica multivalente e lógica difusa, em Lukasiewicz (1910).

O lógico polonês Stanislaw Jaśkowski, em 1948, desenvolveu trabalhos em nível de lógica proposicional, em Jaśkowski (1948).

O lógico brasileiro Newton C. A. da Costa, a partir de 1954, formulou diversos sistemas formais de lógica paraconsistente, proposicional, de predicados e lógicas de ordem superior como a teoria dos conjuntos, como em da Costa (1963a, 1963b, 1974).

3.4.2 DESENVOLVIMENTOS NA ÁREA DA LÓGICA PARACONSISTENTE

Nos parágrafos seguintes, são citados alguns trabalhos que marcaram e firmaram alguns conceitos na área de lógica paraconsistente:

- ✓ Trabalhos sobre álgebra dos sistemas paraconsistentes começaram por volta de 1965, conhecidas como álgebra de Curry em homenagem ao matemático americano Haskell Curry como, por exemplo, em Da Costa (1967).
- ✓ Introdutórios e desenvolvimento dos cálculos paraconsistentes de predicados, “Sistemas Cn”, teoria paraconsistente de conjuntos (DA COSTA, 1963A, 1963B E 1974).
- ✓ Trabalhos sobre “Semântica de Valorações”, propuseram uma engenhosa semântica bivalente ou terceiro excluído para “C1”, generalizando a semântica comum para o cálculo clássico, traduzindo os axiomas de “C1” (DA COSTA & ARRUDA, 1977).
- ✓ O termo “Paraconsistente” foi introduzido pelo filósofo peruano Francisco Miró

Quesada, numa conferência pronunciada durante o III Simpósio Latino-Americano de Lógica Matemática, realizado na Universidade Estadual de Campinas de 12 a 16 de Julho de 1976 (DOTTAVIANO & GOMES, 2011).

- ✓ Aplicação em Programação Lógica pelo indiano V.S. Subrahmanian ,Un. de Syracuse, USA (SUBRAHMANIAN, 1987).
- ✓ Sistemas Anotados pelo brasileiro Jair M. Abe em 1992, abrangendo Teoria de Modelos, Teoria de Conjuntos e Sistemas Modais (ABE, 1992).
- ✓ Desenvolvimento da Linguagem de Programação “Paralog” por José Pacheco de Almeida Prado e Bráulio Coelho Ávila em 1996 (PRADO, 1996) e (ÁVILA, 1996).
- ✓ Consolidação de Frames, Representação de Conhecimento, Exceção e Inconsistências em 1996 (Bittencourt, 1996).
- ✓ Apresentação de uma arquitetura para a inteligência artificial, “PARANET” em um congresso na Bélgica (PRADO, ABE & ÁVILA, 1997).
- ✓ Implementações de Circuitos Eletrônicos Paraconsistentes com Robô Móvel Autônomo Emmy I, “Métodos de Aplicações da Lógica Paraconsistente Anotada de Anotação Com Dois Valores-LPA2v com Construção de Algoritmo e Implementação de Circuitos Eletrônicos” (DA SILVA FILHO 1999).
- ✓ Redes Neurais Artificiais Paraconsistentes – RNAPs em 2001 (DA SILVA FILHO & ABE, 2001).
- ✓ Robô móvel Autônomo Emmy II (TORRES, 2004).
- ✓ Métodos de Apoio a Decisão Médica para Análise em Diabetes Mellitus Gestacional Utilizando a Probabilidade Pragmática na Lógica Paraconsistente Anotada de Dois Valores para Melhor Precisão de Resposta (SOUZA, 2009).
- ✓ Sistema Inteligente Baseado na Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial $\varepsilon\tau$ Para Controle e Navegação de Robôs Móveis Autônomos em um Ambiente não Estruturado, (TORRES, 2010).

A partir daí foram desenvolvidas aplicações em diversas áreas como: Instrumentação, automação, medicina, biologia, energética, reconhecimento de imagens, e etc...

3.5 LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA – LPA

É uma classe de lógica paraconsistente que traz as proposições valoradas

por anotações chamadas de graus de crença ou de evidência.

Foi inicialmente empregada em programação Lógica em 1987 (SUBRAHMANIAN, 1987).

Posteriormente Blair e Subrahmanian construíram a teoria geral da programação anotada (BLAIR & SUBRAHMANIAN, 1988).

A LPA possibilita descrever declarações ou fatos com graus de crenças associados, onde estas crenças possuem certas evidências de apoio.

O Uso da Lógica Paraconsistente Anotada permite a manipulação de dados e descrições inconsistentes de modo não trivial (DA SILVA FILHO, 2014).

3.6 LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA DE ANOTAÇÃO COM DOIS VALORES – LPA2v

Na LPA2v dois Graus de Evidência, um de evidência favorável " μ " e outro de evidência desfavorável " λ ", formam uma anotação que, por sua vez, atribui uma conotação lógica à uma determinada proposição.

$$\text{Sendo : } (\mu, \lambda) \mid \mu, \lambda \in [0, 1] \subset \mathfrak{R}$$

Os dois Graus de Evidência que compõem a anotação são Independentes, podendo vir de duas fontes diferentes.

Fonte 1 - Grau de evidência favorável " μ ".

Fonte 2 - Grau de evidência desfavorável " λ ".

Também podemos obter o Grau de evidência desfavorável a partir do complemento de uma fonte de informações favorável (DA SILVA FILHO, 1999).

Grau de evidência desfavorável = 1 - Grau de evidência favorável

μ_1 = Grau de evidência favorável da Fonte 1

μ_2 = Grau de evidência favorável da Fonte 2

$$\lambda = 1 - \mu_2 \quad (3.6.1)$$

λ = Grau de evidência desfavorável

3.6.1 CRIAÇÃO DO RETICULADO DA LPA2V

A seguir são demonstrados os passos, conforme estudos de Da Silva Filho (1999), onde se pode associar ao sistema da LPA2v um reticulado de Hasse " τ ", finito, duas variáveis, representado num plano cartesiano com um quadrado unitário.

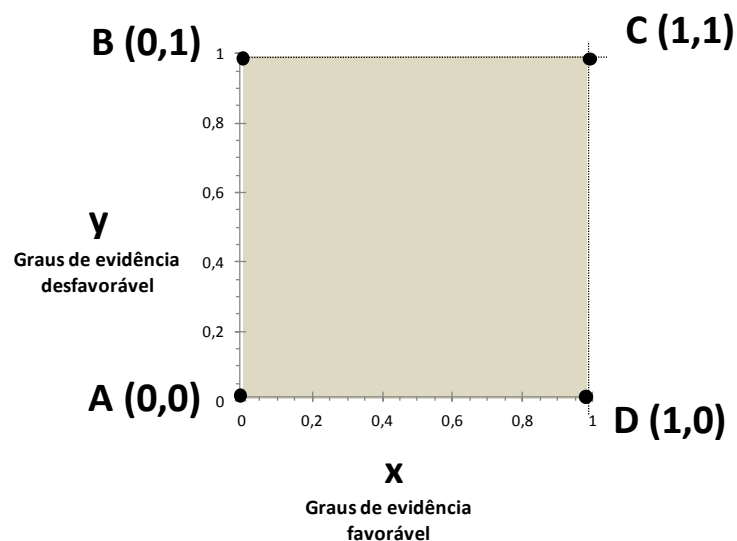


Figura 4 – Quadrado Unitário no Plano cartesiano – QUPC.

(Adaptado: DA SILVA FILHO, 1999).

Desta forma, na figura 4, temos no eixo "x" os graus de evidência favorável a uma proposição e no eixo "y" os graus de evidência desfavorável a uma proposição.

Pode-se então, segundo Da Silva Filho (1999), representar os pontos extremos ou estados:

No ponto A, paracompleto ou indeterminado, símbolo " $\perp$ ".

No ponto B, falso, símbolo "F".

No ponto C, inconsistente, símbolo "T".

No ponto D, verdadeiro, símbolo "V".

Pode-se observar que ao se definir os valores de " μ " e " λ " ("x" e "y"), o ponto formado, poderá se aproximar a qualquer extremo do quadrado unitário.

A partir daí, segundo Da Silva Filho (2008) é possível transformar o quadrado unitário, figura 4, no reticulado da LPA2v seguindo os seguintes passos:

I. Obter o aumento da escala pela transformação linear, Multiplicando as coordenadas dos pontos extremos por $\sqrt{2}$.

$$(x, y) = \sqrt{2} \cdot x, \sqrt{2} \cdot y \quad (3.6.1.1)$$

cuja matriz é: $\begin{bmatrix} \sqrt{2} & 0 \\ 0 & \sqrt{2} \end{bmatrix}$

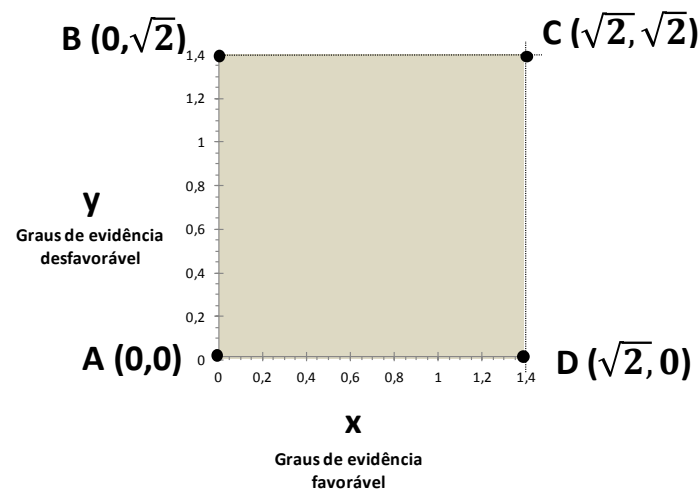


Figura 5 - Aumento de Escala, Quadrado Unitário no Plano cartesiano QUPC.

(Adaptado: DA SILVA FILHO, 2008).

II. Efetuar uma rotação de 45° em relação e mantendo a origem, no sentido anti-horário.

$$(x, y) = \left(\frac{\sqrt{2}}{2}x - \frac{\sqrt{2}}{2}y, \frac{\sqrt{2}}{2}x + \frac{\sqrt{2}}{2}y \right) \quad (3.6.1.2)$$

Cuja Matriz é: $\begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}$

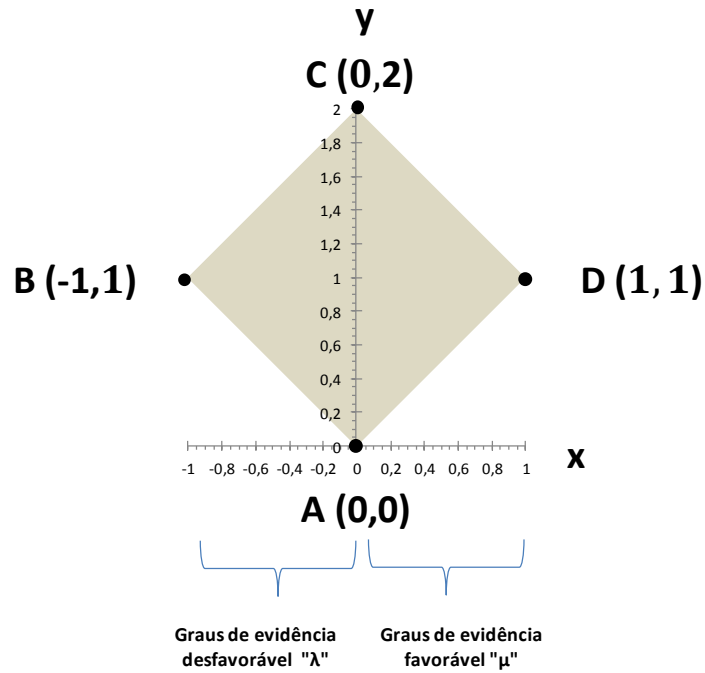


Figura 6 - Quadrado Unitário no Plano cartesiano QUPC, com escala aumentada, Rotacionado 45° em relação e mantendo a origem.

(adaptado: DA SILVA FILHO, 2008).

III. Subtrair uma unidade da coordenada "y".

$$(x, y) = (x, y - 1) \quad (3.6.1.3)$$

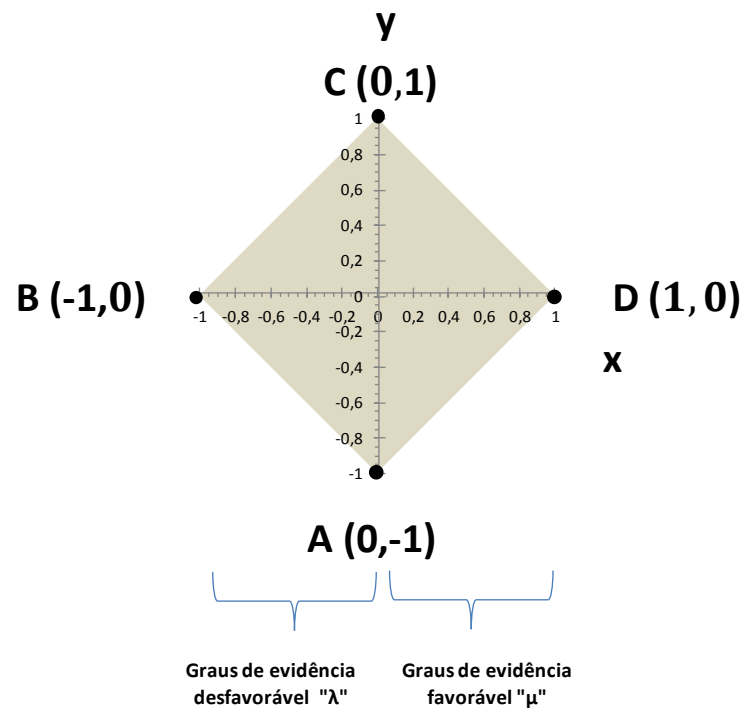


Figura 7 - Movimentação de menos uma unidade no eixo "y".

(Adaptado: DA SILVA FILHO, 2008).

Então se pode obter a transformação do QUPC no reticulado da LPA2v através da equação de transformação (DA SILVA FILHO, 2008):

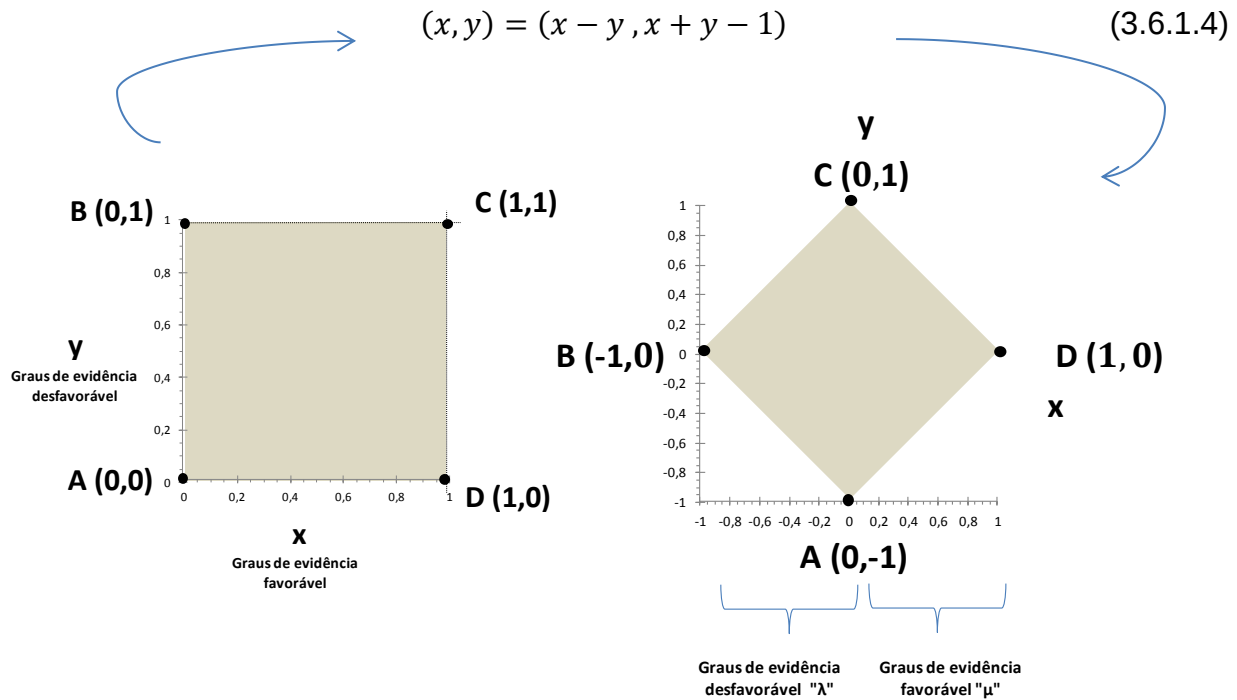


Figura 8 - Transformação dos graus de evidências no QUPC (x, y) para o Reticulado da LPA2v (μ, λ) .

Conforme a transformação acima, equação 3.6.1.4, e utilizando a nomenclatura usual da LPA2v, tem-se que:

$$(x, y) = (\mu, \lambda) \quad (3.6.1.5)$$

Segundo Da Silva Filho (2009), pode-se efetuar a notação de um sinal paraconsistente com a fórmula atômica $P_{(\mu, \lambda)}$.

A partir disso, se extrai algumas características para um determinado sinal de evidência (μ, λ) .

3.6.2 O GRAU DE CERTEZA " G_c " E O GRAU DE CONTRADIÇÃO " G_{ct} "

Segundo Da Silva Filho (2008), pode-se calcular o grau de certeza e grau de contradição a partir de μ e λ .

$$G_c = \mu - \lambda \quad (3.6.2.1)$$

E,

$$G_{Ct} = \mu + \lambda - 1 \quad (3.6.2.2)$$

G_C = Grau de Certeza

G_{Ct} = Grau de Contradição

μ = Grau de Evidência Favorável a Proposição.

λ = Grau de Evidência Desfavorável a Proposição.

Sendo que, G_C e G_{Ct} pertencem ao conjunto $\mathfrak{R}$, variam no intervalo fechado +1 e -1 estão nos eixos horizontal e vertical respectivamente do reticulado os quais se denominam de “Eixo dos graus de Certeza” e “Eixo dos graus de Contradição” respectivamente.

Quando G_C resultar em +1 significa que o estado lógico " $\varepsilon\tau$ " resultante da análise paraconsistente é Verdadeiro, e quando em -1 significa que o estado lógico " $\varepsilon\tau$ " resultante da análise é Falso.

Quando G_{Ct} resultar em +1 significa que o estado lógico " $\varepsilon\tau$ " resultante da análise paraconsistente é Inconsistente, e quando em -1 significa que o estado lógico " $\varepsilon\tau$ " resultante da análise é Indeterminado. Ver figura 9.

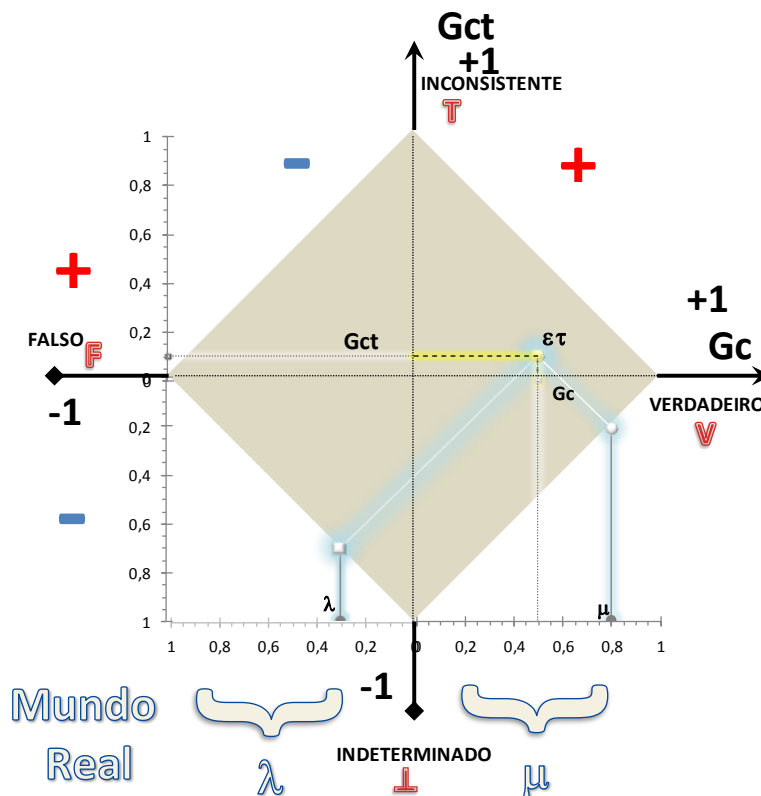


Figura 9 - Exemplo de análise Paraconsistente onde, para os sinais de evidência $\mu=0,8$ e $\lambda=0,3$, resulta em sinais de $G_C=0,5$ e $G_{Ct}=0,1$.

3.6.3 GRAU DE CONTRADIÇÃO NORMALIZADO " μ_{ctr} "

Segundo Da Silva Filho (2008), para que a resposta em um sistema de análise paraconsistente possa apresentar em sua saída um sinal de contradição padronizado é feito uma normalização no Grau de Contradição, e assim seus valores resultantes encontrados ficarão no intervalo real fechado entre 0 e 1.

Utilizamos então as equações:

$$\mu_{ctr} = \frac{G_{ct} + 1}{2} \quad (3.6.3.1)$$

$$\mu_{ctr} = \frac{\{(\mu + \lambda) - 1\} + 1}{2} \quad (3.6.3.2)$$

$$\mu_{ctr} = \frac{\mu + \lambda}{2} \quad (3.6.3.3)$$

μ_{ctr} = Grau de Contradição Normalizado

G_{ct} = *Grau de Contradição*

μ = *Grau de Evidencia Favorável a uma Proposição.*

λ = *Grau de Evidencia Desfavorável a uma Proposição.*

3.6.4 A DISTÂNCIA " D "

A distância " D " é a distância que vai do ponto de interpolação (G_c, G_{ct}), ou seja, estado lógico " $\varepsilon\tau$ " até o ponto de mínimo -1 ou ponto de máximo +1 do Grau de Certeza " G_c " (a menor delas). Ver figura 10 e 11.

Calcula-se " D " da seguinte forma:

$$D = \sqrt{(1 - |G_c|)^2 + G_{ct}^2} \quad (3.6.4.1)$$

Então o cálculo se procede da seguinte forma:

Para $G_c > 0$

$$G_{CR} = 1 - \sqrt{(1 - |G_c|)^2 + G_{ct}^2} \quad (3.6.5.1)$$

Ou,

$$G_{CR} = 1 - D \quad (3.6.5.2)$$

Para $G_c < 0$

$$G_{CR} = \sqrt{(1 - |G_c|)^2 + G_{ct}^2} - 1 \quad (3.6.5.3)$$

Ou,

$$G_{CR} = D - 1 \quad (3.6.5.4)$$

3.6.6 O GRAU DE EVIDÊNCIA RESULTANTE REAL " μ_{Er} "

Segundo Da Silva Filho et al. (2008), o Grau de Evidência resultante real " μ_{Er} " é aquele considerado um valor atenuado ou livre dos efeitos da contradição. É um valor calculado a partir de " G_{CR} ", no qual, encontramos o seu valor normalizado e valorado no intervalo real fechado entre 0 e 1.

Então:

$$\mu_{Er} = \frac{G_{CR} + 1}{2} \quad (3.6.6.1)$$

3.6.7 INTERVALO DE EVIDÊNCIA " φ_E "

O intervalo de Evidência é um valor que indica o quanto na análise paraconsistente está sendo influenciado o valor do Grau de Evidência Resultante Real " μ_{Er} ", por conta das contradições (DA SILVA FILHO, 2009).

Calculado por:

$$\varphi_E = 1 - |2\mu_{ctr} - 1| \quad (3.6.7.1)$$

3.6.8 SINALIZAÇÃO DO INTERVALO DE EVIDÊNCIA " $\varphi_{E(\pm)}$ "

Podemos utilizar o Intervalo de Evidência " φ_E " na recuperação de valores e então, por exemplo, poder implementar lógicas com realimentações, para isso devemos sinalizá-lo, sendo então representado por " $\varphi_{E(\pm)}$ " (DA SILVA FILHO, 2009).

A sinalização é obtida da seguinte forma:

Se $Gct < 0$, Sinalizar com $(-)$ $\rightarrow \varphi_{E(-)}$

Se $Gct > 0$, Sinalizar com $(+)$ $\rightarrow \varphi_{E(+)}$

Se $Gct = 0$, Sinalizar com (0) $\rightarrow \varphi_{E(0)}$

3.6.9 ALGORITMO DE ANÁLISE PARACONSISTENTE DA LPA2v COM SAÍDA DE GRAU DE EVIDÊNCIA RESULTANTE REAL " μ_{Er} " COM INTERVALO DE EVIDÊNCIA " $\varphi_{E(\pm)}$ "

O algoritmo de análise paraconsistente da LPA2v com Saída de Evidência Resultante Real " μ_{Er} " e Intervalo de Evidência " $\varphi_{E(\pm)}$ ", foi desenvolvido por Da Silva Filho et al. (2008).

Os cálculos empregados neste algoritmo foram demonstrados nos parágrafos anteriores.

Abaixo tem-se o algoritmo:

I. Entre com os valores de Entrada

" μ " */ Grau de Evidência favorável $0 \leq \mu \leq 1$

" λ " */ Grau de Evidência desfavorável $0 \leq \lambda \leq 1$

II. Calcule o Grau de Contradição normalizado

$$\mu_{ctr} = \frac{\mu + \lambda}{2}$$

III. Calcule o Intervalo de Evidência resultante

$$\varphi_E = 1 - |2\mu_{ctr} - 1|$$

IV. Calcule o Grau de Certeza

$$G_C = \mu - \lambda$$

V. Calcule o Grau de Contradição

$$G_{Ct} = \mu + \lambda - 1$$

VI. Calcule a distância D

$$D = \sqrt{(1 - |G_C|)^2 + G_{Ct}^2}$$

VII. Determine o sinal da Saída

Se $\varphi_E \leq 0,25$ ou $D > 1$, então faça:

$S1 = 0,5$ e $S2 = \varphi_{E(\pm)}$ Indefinição e vá para o fim.

Senão vá para o próximo item.

VIII. Determine o Grau de Certeza real

Se $G_C > 0$, $G_{CR} = 1 - D$

Se $G_C < 0$, $G_{CR} = D - 1$

IX. Calcule o Grau de Evidência resultante real

$$\mu_{Er} = \frac{G_{CR} + 1}{2}$$

X. Apresente os resultados na saída

Faça $S1 = \mu_{Er}$ e $S2 = \varphi_{E(\pm)}$

XI. Fim

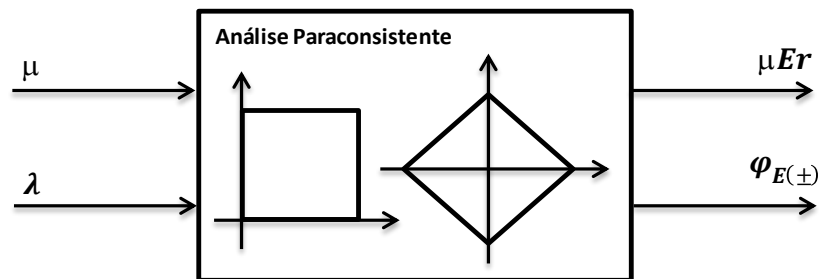


Figura 12 – Representação do algoritmo de análise paraconsistente da LPA2v com o cálculo do grau de contradição normalizado e intervalo de evidência.

(Fonte: DA SILVA FILHO et al., 2008).

3.6.10 NÓ DE ANÁLISE PARACONSISTENTE – NAP

Conforme os conceitos e equações empregados anteriormente, juntamente com o algoritmo de análise paraconsistente da LPA2v com saída de grau de evidência resultante real " μ_{Er} " e intervalo de evidência " $\varphi_{E(\pm)}$ " é possível de se produzir um tratamento e controle de sinais de informações incertas e contraditórias

segundo Da Silva Filho et al. (2008).

O NAP é a representação dos algoritmos paraconsistentes, e estes poderão ser interligados para construção de redes com variadas topologias.

O símbolo do NAP com as saídas " μ_{Er} " e " $\varphi_{E(\pm)}$ " é mostrado abaixo:

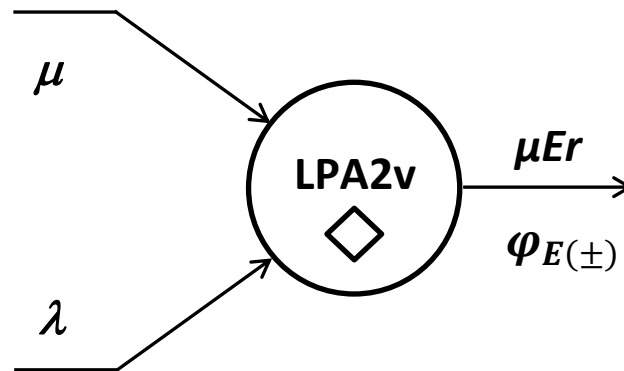


Figura 13 - Símbolo do NAP com as saídas " μ_{Er} " e " $\varphi_{E(\pm)}$ ".

(Fonte: DA SILVA FILHO et al., 2008).

3.6.11 OPERAÇÕES LÓGICAS NO RETICULADO DA LPA2V

Abaixo estão descritas duas operações lógicas no reticulado da LPA2v, que foram aplicadas neste trabalho.

Estas operações se darão da seguinte forma, quatro fontes de informações independentes, produzindo graus de evidências independentes para compor duas anotações.

3.6.11.1 DISJUNÇÃO, OPERADOR OU

O NAP disjunção está intimamente relacionado com a operação de união de conjuntos de dados. Seu operador é o símbolo " $\vee$ ".

Dados dois valores paraconsistentes P_{μ_1, λ_1} e P_{μ_2, λ_2} , definimos $P_{\mu_1, \lambda_1} \vee P_{\mu_2, \lambda_2}$ como sendo o valor paraconsistente do máximo valor entre as duas evidências favoráveis μ_1 e μ_2 e o mínimo valor entre as evidências desfavoráveis λ_1 e λ_2 (DA SILVA FILHO & SCALZITTI, 2009).

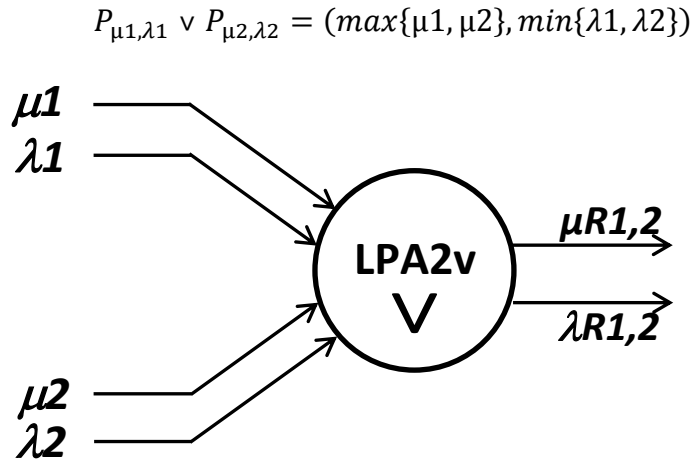


Figura 14 - Proposta de simbologia para a operação disjunção na LPA2v.

3.6.11.2 CONJUNÇÃO, OPERADOR E

O NAP conjunção é uma operação lógica utilizada quando se quer a interseção de conjuntos de dados. A conjunção é representada pelo conectivo lógico " $\wedge$ ".

Dados dois valores paraconsistentes $P_{\mu 1, \lambda 1}$ e $P_{\mu 2, \lambda 2}$, definimos $P_{\mu 1, \lambda 1} \wedge P_{\mu 2, \lambda 2}$ como sendo o valor paraconsistente do mínimo valor entre as duas evidências favoráveis $\mu 1$ e $\mu 2$ e o máximo valor entre as evidências desfavoráveis $\lambda 1$ e $\lambda 2$ (DA SILVA FILHO & SCALZITTI, 2009).

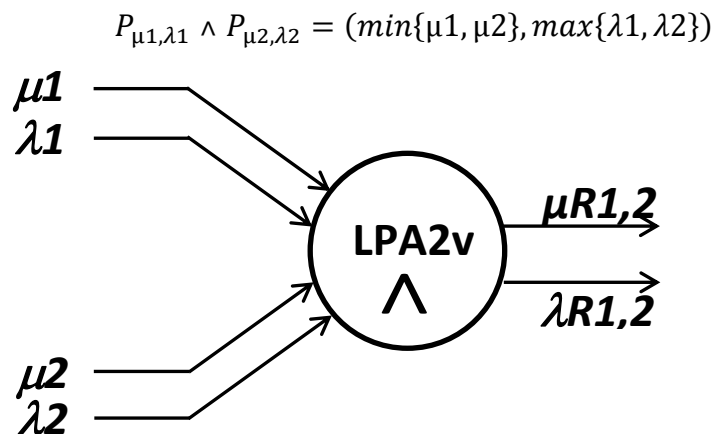


Figura 15 - Proposta de simbologia para a operação conjunção na LPA2v.

4 CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE QUATRO TANQUES NO LABVIEW®

Observando a figura 2, que é o sistema de Johansson completo com a instrumentação, foi reconstruída cada parte no ambiente LabVIEW®.

Seguindo o modelo de Johansson (2000) com a instrumentação (figura 2), abaixo tem-se este sistema no LabVIEW®, figura 16.

No Apêndice D, apresenta-se o detalhamento de cada item do modelo de Johansson (2000) no LabVIEW®.

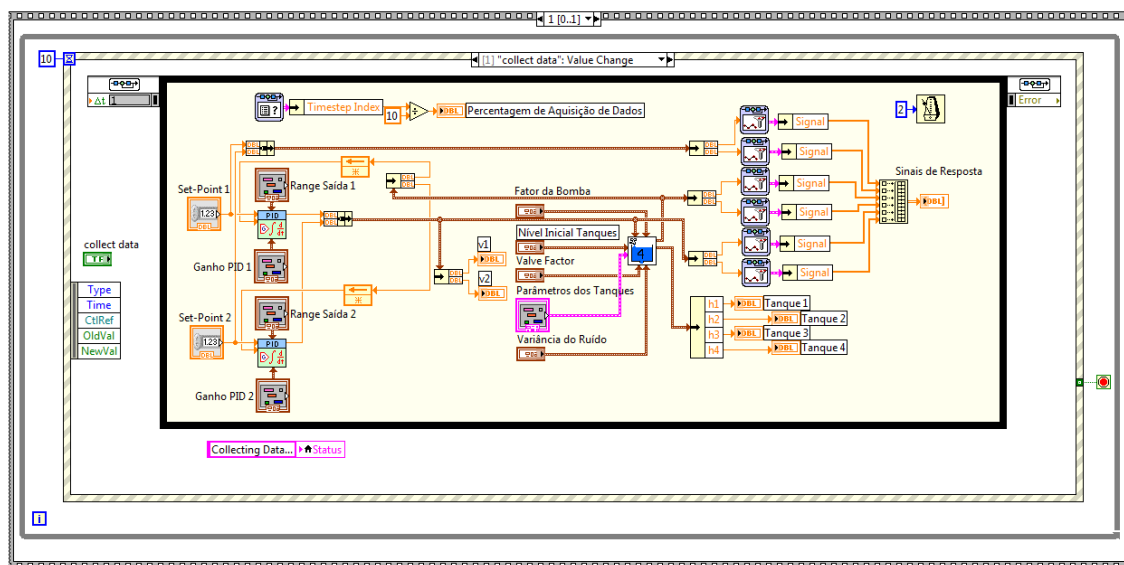


Figura 16 - Planta Multivariável, Sistema Quatro Tanques, Johansson (2000), reproduzida do LabVIEW®.

4.1 ENSAIOS PARA LEVANTAMENTO DE DADOS COM O SISTEMA ORIGINAL MULTIVARIÁVEL DE QUATRO TANQUES

Para se obter informações sobre qual é o comportamento do processo multivariável proposto por Johansson (2000), foi simulado este processo no LabVIEW® com os mesmos parâmetros utilizados por outros autores.

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. Considera-se um controle mecânico tipo boia.

4.2 PRIMEIRA FORMA DE SIMULAÇÕES

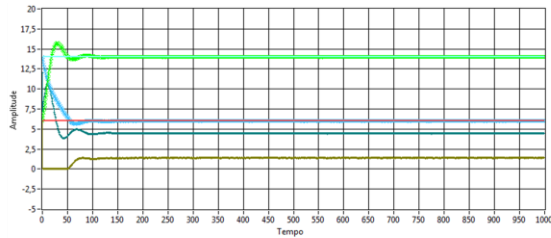
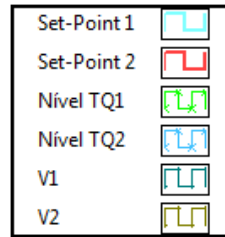
A primeira forma de simulações é apresentada na tabela 1.

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

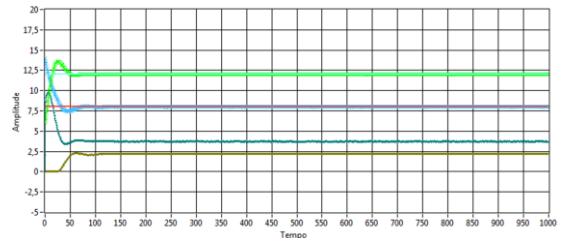
Ensaio	X1	X2	Nível Inicial TQ1	Nível Inicial TQ2	SP1	SP2	Tempo aproximado para Estabilização Nível TQ1	Tempo aproximado para Estabilização Nível TQ2
1	0,7	0,7	6 cm	14 cm	14 cm	6 cm	125s	125s
2	0,7	0,7	6 cm	14 cm	12 cm	8 cm	110s	125s
3	0,7	0,7	6 cm	14 cm	10 cm	10 cm	100s	100s
4	0,7	0,7	6 cm	14 cm	8 cm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

A seguir temos os gráficos com os dados de cada um dos ensaios da tabela 1.

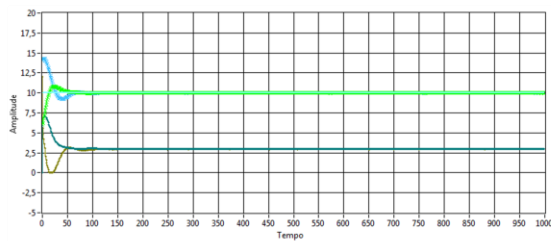
Legenda dos gráficos



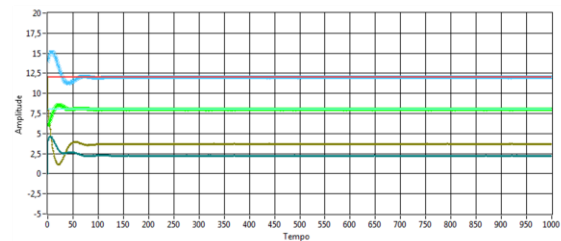
Ensaio 1.



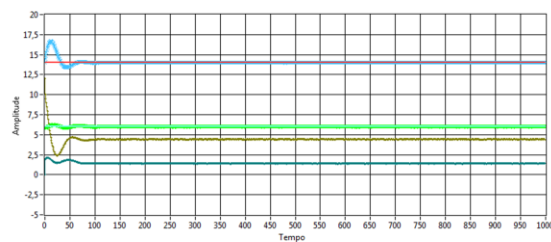
Ensaio 2.



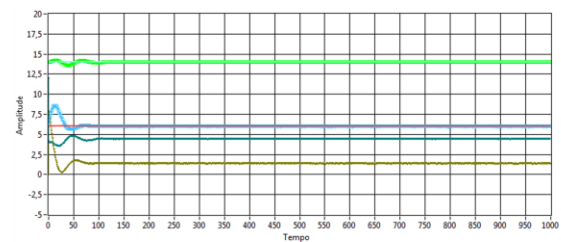
Ensaio 3.



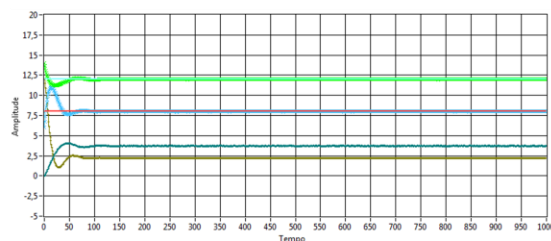
Ensaio 4.



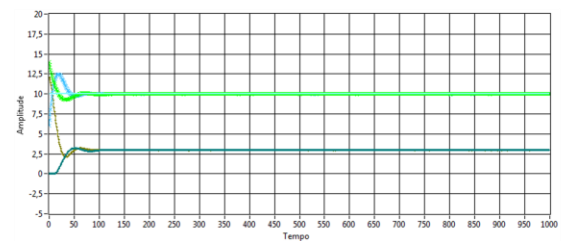
Ensaio 5.



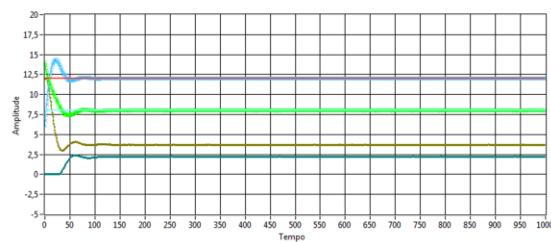
Ensaio 6.



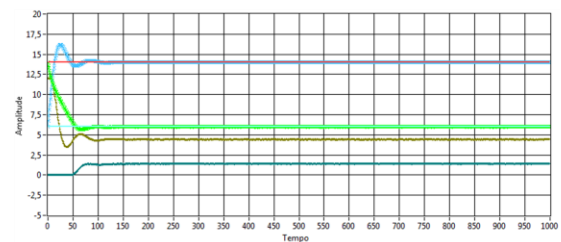
Ensaio 7.



Ensaio 8.



Ensaio 9.



Ensaio 10.

Figura 17 - 1ª forma de simulações, ensaios 1 ao 10, parâmetro $X=0,7$.

4.3 MATRIZ RGA PARA A PRIMEIRA FORMA DE SIMULAÇÃO

Pode-se verificar se o par de variáveis realmente foi escolhido adequadamente, para isso utiliza-se o estudo feito por Sagaz (2003), onde aplicando a técnicas para a determinação da matriz RGA, demonstrada no Apêndice B, encontrou a matriz de ganhos em malha aberta do sistema (SEBORG et al., 2004, p.487).

Então Sagaz (2003) encontrou o valor de $\gamma_{11} = 1,8323$

Representando-se γ_{11} simplesmente como γ e substituindo em 75 do Apêndice B tem-se a matriz RGA:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1,8323 & -0,8323 \\ -0,8323 & 1,8323 \end{bmatrix} \quad (4.3.1)$$

Para se determinar qual o par de variáveis manipuladas e controladas mais adequado substitui-se 4.3.1 na equação 76 do Apêndice B e utiliza-se a interpretação da tabela 5.

Portanto chega-se a conclusão que é necessário um valor de γ_{ij} positivo e o mais próximo de 1 possível.

$$\Lambda = \begin{matrix} & \begin{matrix} M_1 & M_2 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 1,8323 & -0,8323 \\ -0,8323 & 1,8323 \end{bmatrix} & \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \end{matrix} \end{matrix} \quad (4.3.2)$$

Então, os pares M_1, C_1 e M_2, C_2 são os pares mais adequados.

4.4 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 17, que em todos os dez ensaios realizados os níveis dos tanques atingiram os *set-points*.

Conforme o resultado da matriz RGA, no subcapítulo 4.3, 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.

4.5 SEGUNDA FORMA DE SIMULAÇÕES

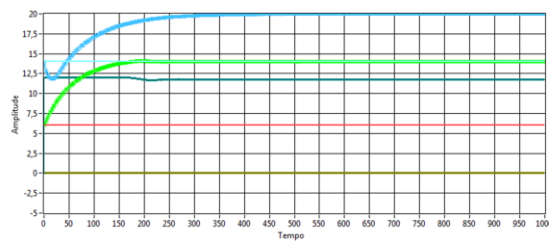
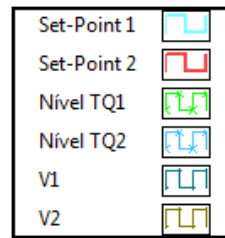
A segunda forma de simulações é apresentada na tabela 2.

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

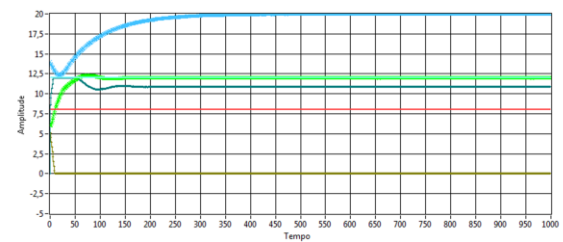
Ensaio	X1	X2	Nível Inicial TQ1	Nível Inicial TQ2	SP1	SP2	Tempo aproximado para Estabilização Nível TQ1	Tempo aproximado para Estabilização Nível TQ2
11	0,3	0,3	6 cm	14 cm	14 cm	6 cm	200s	Fora de Controle
12	0,3	0,3	6 cm	14 cm	12 cm	8 cm	150s	Fora de Controle
13	0,3	0,3	6 cm	14 cm	10 cm	10 cm	150s	Fora 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

Abaixo temos os gráficos com os dados de cada um dos ensaios da tabela 2.

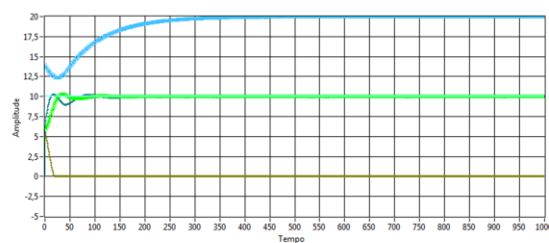
Legenda dos gráficos.



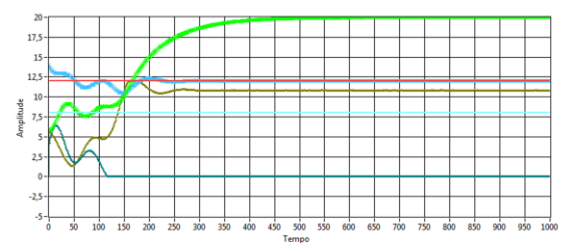
Ensaio 11.



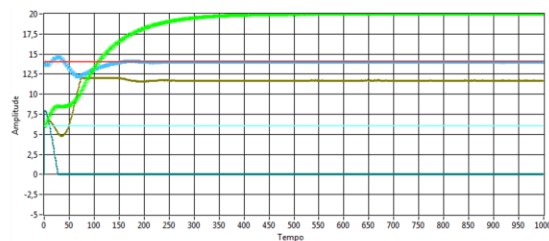
Ensaio 12.



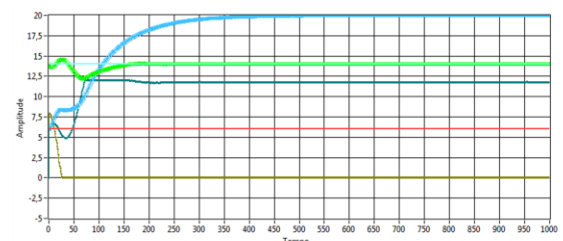
Ensaio 13.



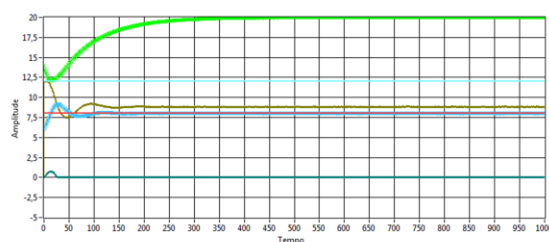
Ensaio 14.



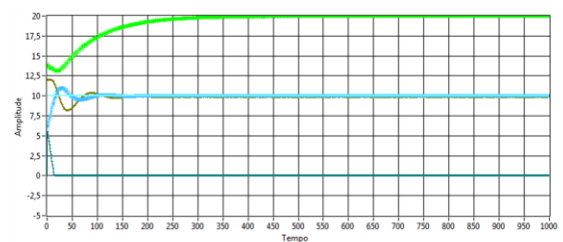
Ensaio 15.



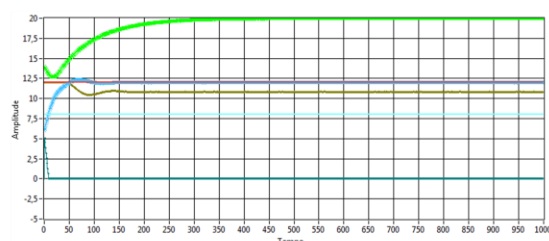
Ensaio 16.



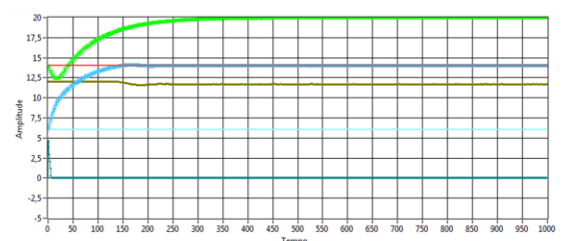
Ensaio 17.



Ensaio 18.



Ensaio 19.



Ensaio 20.

Figura 18 - 2ª forma de simulações, ensaios 11 ao 20, parâmetro $X=0,3$.

4.6 MATRIZ RGA PARA A SEGUNDA FORMA DE SIMULAÇÃO

Como foi feito anteriormente, pode-se verificar se o par de variáveis realmente foi escolhido adequadamente, para isso utilizou-se o estudo feito por Sagaz (2003), onde aplicando a técnicas para a determinação da matriz RGA demonstrada no Apêndice B, encontrou a matriz de ganhos em malha aberta do sistema (SEBORG et al., 2004, p.487).

Então Sagaz (2003) encontrou o valor de $\gamma_{11} = -0,26$

Se γ_{11} for representado simplesmente como γ e substituindo em 75 do Apêndice B temos a matriz RGA:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -0,26 & 1,26 \\ 1,26 & -0,26 \end{bmatrix} \quad (4.6.1)$$

Para determinar qual o par de variáveis manipuladas e controladas mais adequado substitui-se 4.6.1 na equação 76 do Apêndice B e utiliza-se a interpretação da tabela 5.

Portanto chega-se a conclusão que é necessário um valor de γ_{ij} positivo e o mais próximo de 1 possível.

$$\Lambda = \begin{matrix} & \begin{matrix} M_1 & M_2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -0,26 & 1,26 \\ 1,26 & -0,26 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4.6.2)$$

Então, os pares M_1, C_2 e M_2, C_1 são os pares mais adequados.

4.7 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.

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 11 à 20, gráficos da figura 18, 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, no subcapítulo 4.6, 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 ".

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 REDE DE RESTABELECIMENTO DE UM SISTEMA MULTIVARIÁVEL

Como se pôde verificar na segunda forma de simulações ($X=0,3$), com a planta originalmente idealizada por Johansson (2000), a mesma perde o controle, pois as variáveis controladas não respondem significativamente as variáveis manipuladas e então uma interferência humana seria necessária para o restabelecimento do controle.

Ainda nos ensaios da segunda forma de simulações ($X=0,3$), seria necessário à inversão do sinal de correção vindo da saída dos controladores (redefinição do par de variáveis, manipulada e controlada), afim de que, as correções fossem coerentes às novas características do processo. Sagaz (2003) demonstrou que ao se redefinir o par de variáveis manipulada e controlada é possível restabelecer o controle da planta.

A rede de restabelecimento desenvolvida deverá “sentir” as variações da dinâmica do processo e promover a mudança (inversão) do sinal de correção vindo dos controladores automaticamente sem a intervenção humana.

Com o objetivo construir a rede de restabelecimento, são evidenciadas algumas características do comportamento da planta quando ela está sob controle e fora de controle, ver figura 2:

- Sob controle e em uma condição de estabilidade, é coerente dizer que, o valor de SP1 está mais próximo de h_1 e SP2 está mais próximo de h_2 . Quando os *set-point's* SP1 e SP2 forem iguais ou muito próximos, V_{cc1} , V_{cc2} , h_1 e h_2 manterão uma proporcionalidade entre si e com SP1 e SP2.
- Fora de controle, é coerente dizer que, o valor de SP1 está mais distante de h_1 e/ou SP2 está mais distante de h_2 . Quando os *set-point's* SP1 e SP2 forem iguais ou muito próximos, V_{cc1} , V_{cc2} , h_1 e h_2 não manterão proporcionalidade entre si e com SP1 e SP2.
- Quando os *set-point's* SP1 e SP2 forem diferentes ou muito distantes, V_{cc1} e V_{cc2} podem possuir quaisquer valores para se obter o controle.

5.1 CONSTRUÇÃO DA REDE

Para construir a rede ter-se-á que modelar as entradas adequadamente e então aplicar as técnicas da LPA2v para atingir o objetivo.

As fontes de informações, sendo μ evidências favoráveis e λ evidências desfavoráveis a uma determinada proposição, foram obtidas como mostrado a seguir, no modelamento das variáveis.

5.2 MODELAMENTO DAS VARIÁVEIS

Modelamento de μ_1 e λ_1 .

O módulo da diferença entre SP_1 e h_1 subtraído do nível máximo do tanque “20cm” e dividido pelo nível máximo do tanque “20cm”. Isso significa que quanto mais próximo o nível do tanque 1 estiver do *set-point* 1, mais alta será a evidência de μ_1 .

$$\mu_1 = \frac{20 - |SP_1 - h_1|}{20} \quad (5.2.1)$$

Com o complemento de μ_1 temos λ_1 .

$$\lambda_1 = 1 - \mu_1 \quad (5.2.2)$$

Modelamento de μ_2 e λ_2 .

O módulo da diferença entre SP_2 e h_2 subtraído do nível máximo do tanque “20cm”, dividido pelo nível máximo do tanque “20cm”. Isso significa que quanto mais próximo o nível do tanque 2 estiver do *set-point* 2, mais alta será a evidência de μ_2 .

$$\mu_2 = \frac{20 - |SP_2 - h_2|}{20} \quad (5.2.3)$$

Com o complemento de μ_2 temos λ_2 .

$$\lambda_2 = 1 - \mu_2 \quad (5.2.4)$$

Modelamento de μ_3 e λ_3 .

O módulo da diferença entre V_{cc1} e V_{cc2} subtraído do nível máximo do tanque “20cm” e dividido pelo nível máximo do tanque “20cm”. Isso significa que quanto mais próximo a tensão da bomba 1 estiver da bomba 2, mais alta será a evidência de μ_3 .

$$\mu_3 = \frac{20 - |V_{cc1} - V_{cc2}|}{20} \quad (5.2.5)$$

Com o complemento de μ_3 temos λ_3 .

$$\lambda_3 = 1 - \mu_3 \quad (5.2.6)$$

Modelamento de μ_4 e λ_4 .

O módulo da diferença entre h_1 e h_2 subtraído do nível máximo do tanque “20cm” e dividido pelo nível máximo do tanque “20cm”. Isso significa que quanto mais próximo o nível do tanque 1 estiver do tanque 2, mais alta será a evidência de μ_4 .

$$\mu_4 = \frac{20 - |h_1 - h_2|}{20} \quad (5.2.7)$$

Com o complemento de μ_4 temos λ_4 .

$$\lambda_4 = 1 - \mu_4 \quad (5.2.8)$$

Modelamento de μ_5 e λ_5 .

Se o módulo da diferença entre SP_1 e SP_2 for menor que 1 então $\mu_5 = 1$ e $\lambda_5 = 0$, senão $\mu_5 = 0$ e $\lambda_5 = 1$; Determina se os *set-points* estão próximos.

Com os levantamentos de evidências, capítulo 5, e os modelamentos adequados, subcapítulo 5.2, foi construída a Rede de Análise Paraconsistente (RAP), para restabelecimento do sistema multivariável.

A seguir tem-se a RAP:

5.3 REDE DE RESTABELECIMENTO DE CONTROLE

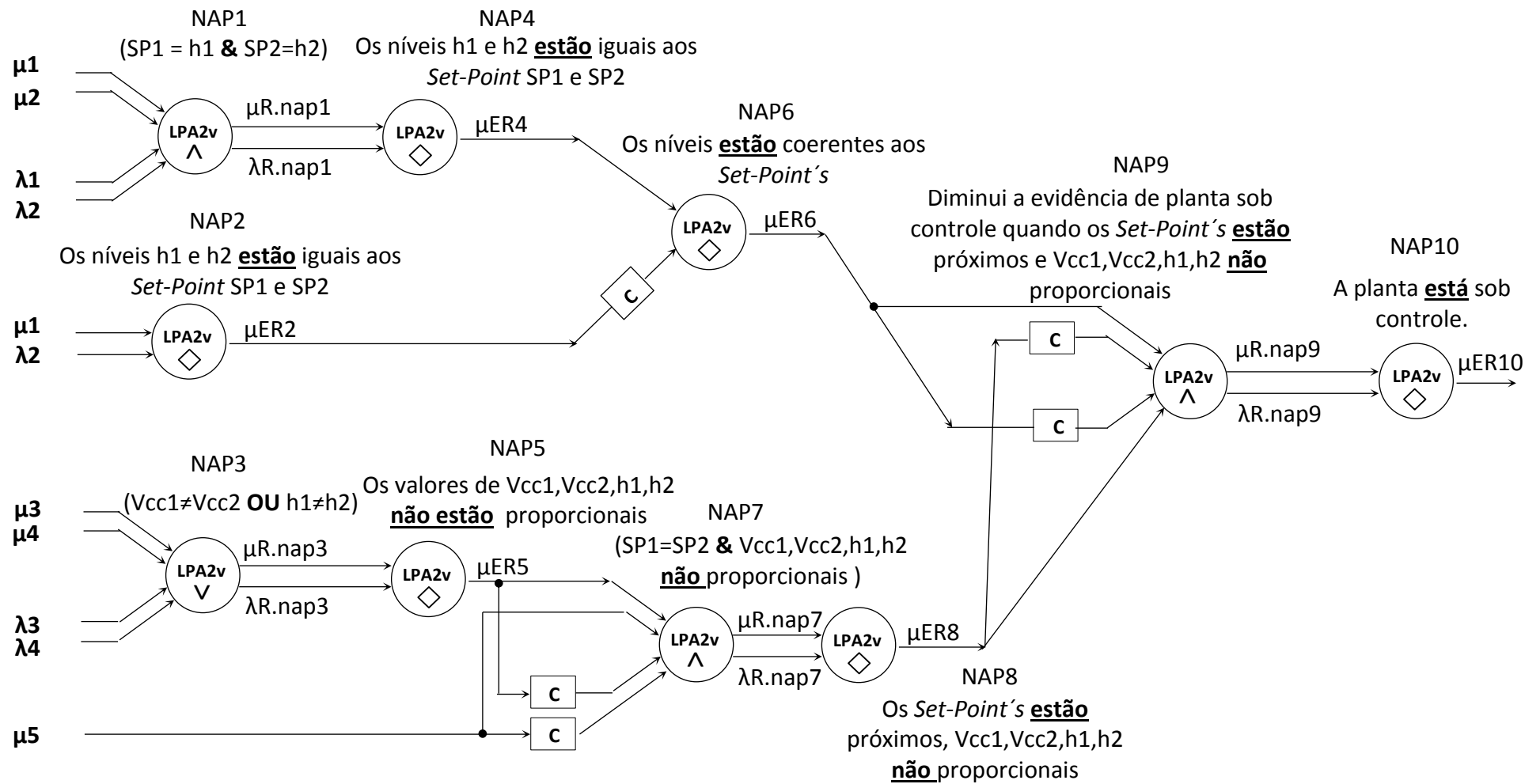


Figura 19 - Rede paraconsistente para restabelecimento de controle de um sistema multivariável.

5.4 DESCRIÇÃO DOS NAP'S DA RAP DE RESTABELECIMENTO

Abaixo é descrito cada parte da RAP de restabelecimento em detalhes, bem como a proposição de cada um dos NAPs.

Os NAP1, NAP2, NAP4, NAP6 analisam proposições favoráveis à planta sob controle.

NAP1: Análise da igualdade dos *Set-Point's* em Relação aos Níveis.

Proposição: “O sinal de $h1$ está próximo do sinal do $SP1$ “E” O sinal de $h2$ está próximo do sinal do $SP2$ ”.

O NAP1 executa uma análise paraconsistente “E” entre $\mu1, \lambda1, \mu2, \lambda2$ para atender à proposição, sua saída apresenta os sinais: $\mu R.nap1$ e $\lambda R.nap1$.

NAP4: Análise da igualdade dos *Set-Point's* em Relação aos Níveis.

Proposição: “O sinal de $h1$ e $h2$ estão respectivamente próximos de $SP1$ e $SP2$ ”.

O nó de análise paraconsistente NAP4 executa o tratamento das incertezas entre $\mu R.nap1, \lambda R.nap1$ para atender à proposição, sua saída apresenta o sinal: $\mu ER4$.

NAP2: Análise da igualdade dos *Set-Point's* em Relação aos Níveis.

Proposição: “O sinal de $h1$ e $h2$ estão respectivamente próximos de $SP1$ e $SP2$ ”.

O nó de análise paraconsistente NAP2 executa o tratamento das incertezas entre $\mu1, \lambda1$ para atender à proposição, sua saída apresenta o sinal: $\mu ER2$.

NAP6: Análise da igualdade dos *Set-Point's* em relação aos níveis.

Proposição: “O sinal de $h1$ e $h2$ estão respectivamente próximos de $SP1$ e $SP2$ ”.

O nó de análise paraconsistente NAP6 executa o tratamento das incertezas entre $\mu ER4$ e o complemento de $\mu ER2$ para atender à proposição, sua saída apresenta o sinal: $\mu ER6$.

Os NAP3, NAP5, NAP7, NAP8 analisam proposições desfavoráveis à planta sob controle. Estes NAP's “enfraquecem” a evidência de “Planta sob controle” devido a uma característica peculiar dos valores de $SP1, SP2, h1, h2, Vcc1$ e $Vcc2$ estarem equilibrados.

NAP3: Análise da diferença entre as tensões nas bombas ou os níveis nos tanques.

Proposição: “As tensões nas bombas 1 e 2 são diferentes “OU” Os níveis dos Tanques 1 e 2 são diferentes”.

O NAP3 executa uma análise paraconsistente “OU” entre $\mu_3, \mu_4, \lambda_3, \lambda_4$ para atender à proposição, sua saída apresenta os sinais: $\mu R.nap3$ e $\lambda R.nap3$.

NAP5: Análise da não proporcionalidade entre os níveis ou as tensões.

Proposição: “O valor do Vcc1 não está proporcional a Vcc2 ou h1 não está proporcional a h2”.

O nó de análise paraconsistente NAP5 executa o tratamento das incertezas entre $\mu R.nap3$ e $\lambda R.nap3$ para atender à proposição, sua saída apresenta o sinal: $\mu ER5$.

NAP7: Análise da igualdade entre os Set-point's e da não proporcionalidade entre os níveis ou as tensões.

Proposição: “O valor de SP1 é próximo ao SP2 “E” O valor do Vcc1 não está proporcional a Vcc2 ou h1 não está proporcional a h2”.

O NAP7 executa uma análise paraconsistente “E” entre $\mu ER5, \mu_5$, o complemento de $\mu ER5$ e o complemento de μ_5 para atender à proposição, sua saída apresenta os sinais: $\mu R.nap7$ e $\lambda R.nap7$.

NAP8: Análise da igualdade entre os Set-point's da não proporcionalidade entre os níveis ou as tensões.

Proposição: “O valor de SP1 é próximo ao SP2 “E” O valor do Vcc1 não está proporcional a Vcc2 ou h1 não está proporcional a h2”.

O nó de análise paraconsistente NAP8 executa o tratamento das incertezas entre $\mu R.nap7, \lambda R.nap7$ para atender à proposição, sua saída apresenta o sinal: $\mu ER8$.

Os NAP9 e NAP10 finalizam a RAP.

NAP9: Análise da diminuição da evidência de planta sob controle quando os Set-point's estão próximos e as tensões e os níveis não são proporcionais.

Proposição: “A análise das magnitudes favoráveis e desfavoráveis estão coerentes para a planta sob controle”.

O NAP9 executa uma análise paraconsistente “E” entre $\mu ER6$, o complemento de $\mu ER8$, o complemento de $\mu ER6$ e $\mu ER8$ para atender à proposição, sua saída apresenta os sinais: $\mu R.nap9$ e $\lambda R.nap9$.

NAP10: Verifica o controle da planta.

Proposição: “A planta está sob controle”.

O nó de análise paraconsistente NAP10 executa o tratamento das incertezas entre: $\mu R.nap9$ e $\lambda R.nap9$, para atender à proposição, sua saída apresenta o sinal: $\mu ER10$.

5.5 CIRCUITO ACIONADOR DO CHAVEAMENTO

Como foi visto na segunda forma de simulação ($X=0,3$), quando a planta perde o controle devido à mudança da sua dinâmica pela alteração dos valores de $X1$ e $X2$, há a necessidade de intervenção humana para o seu restabelecimento (inversão do sinal de saída dos controladores, par de variáveis), como em Sagaz (2003).

Com a RAP desenvolvida, figura 19, 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.

5.6 FLIP-FLOP OU MULTIVIBRADOR BIESTÁVEL

Um Flip-flop ou Multivibrador Biestável é um circuito digital acionado por pulso capaz de servir como uma memória de um bit (unidade de informação).

Segundo Tocci, Widmer e Moss (2007), o elemento de memória mais importante é o Flip-flop, que é implementado a partir de portas lógicas. Embora uma porta lógica, por si só, não tenha capacidade de armazenamento, algumas delas podem ser conectadas entre si de tal forma que permita o armazenamento de informação. Algumas formas diferentes de arranjo de portas são usadas para produzir Flip-flops.

A seguir temos a simbologia de um Flip-flop JK, bem com a sua tabela da

verdade.

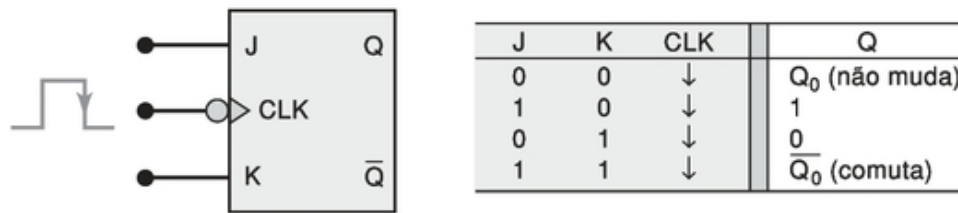


Figura 20 - Flip-flop JK e a respectiva tabela da verdade.

(Fonte: TOCCI, WIDMER E MOSS, 2007)

Para este trabalho, ao unir as entradas JK e aplicar-se nível 1, figura 20, a cada pulso de clock, na borda de descida, na saída “Q” tem-se o inverso da saída anterior, ou seja, a cada pulso (borda de descida) a saída do Flip-flop se inverte.

A seguir tem-se a nova configuração com a respectiva tabela da verdade.

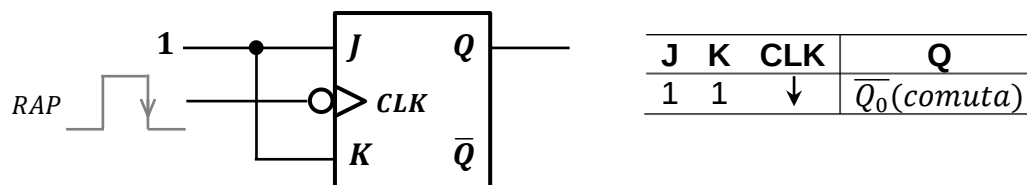


Figura 21 - Flip-flop JK na configuração tipo “T”, aplicado nível 1 na entrada, RAP como clock e a respectiva tabela da verdade.

Utilizou-se a saída da RAP como clock para o Flip-flop JK, figura 21. Quando a RAP estiver indicando que a planta está sob controle, o clock estará em nível 1, não havendo mudança na saída do Flip-Flop JK, a planta continuará funcionando normalmente. Assim que houver mudança na dinâmica do processo (alteração dos parâmetros “X”), a saída da RAP irá para nível 0 (borda de descida), provocando a mudança de estado do Flip-flop JK, invertendo assim a saída dos controladores. Quando houver a correção (automaticamente pelos controladores PID) e a planta ficar sob controle novamente, a RAP que apresentava saída 0, passará a apresentar 1, mais como o Flip-Flop JK é acionado somente na borda de descida, a planta continuará sobre controle.

A figura 22 ilustra o descrito acima.

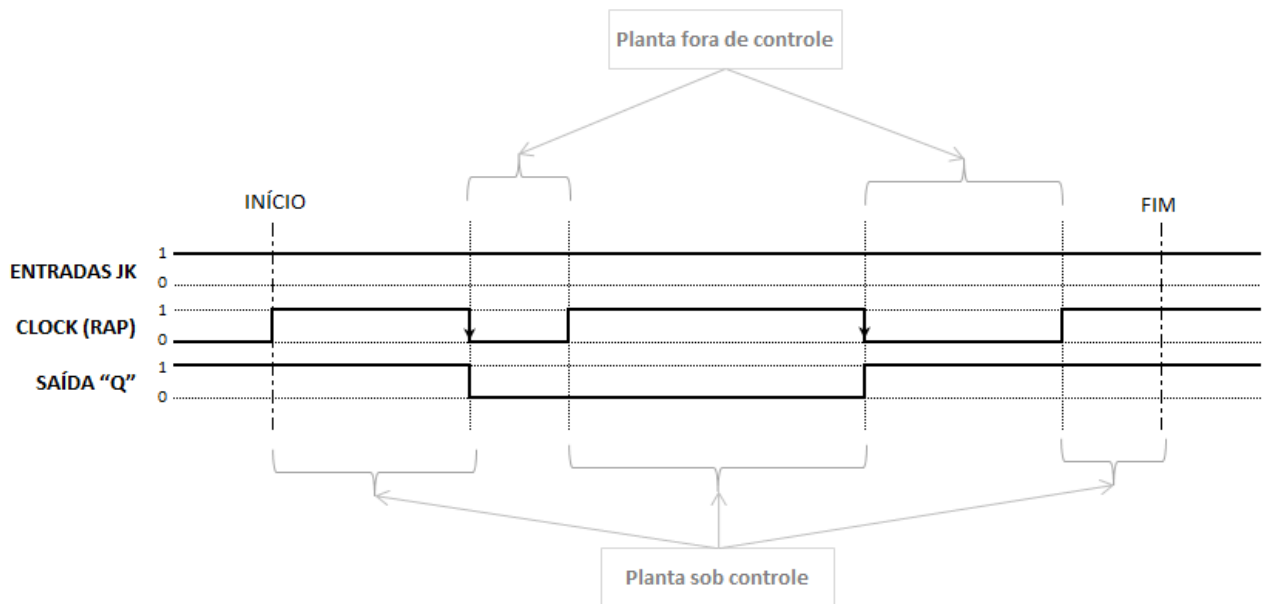


Figura 22 - Ilustração do funcionamento do sistema de inversão (saída "Q") em função da saída da rede inteligente (RAP).

Ainda há 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.

5.7 DETECTOR DE ESTADO LÓGICO

O circuito abaixo foi inserido entre a RAP e o Flip-flop JK. 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.

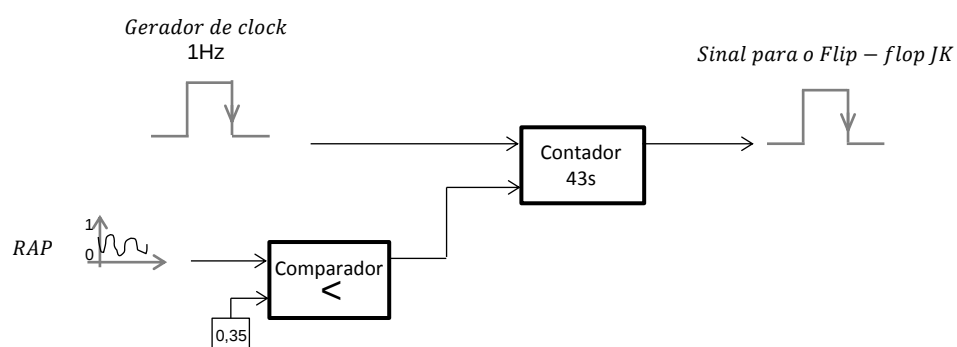


Figura 23 – Diagrama de blocos do circuito detector de estado lógico.

A saída “Q” do Flip-flop precisa ainda acionar uma chave para a inversão da saída dos controladores.

5.8 CHAVE DE INVERSÃO

A chave de inversão para a saída dos controladores é um relé duplo conforme a figura abaixo:

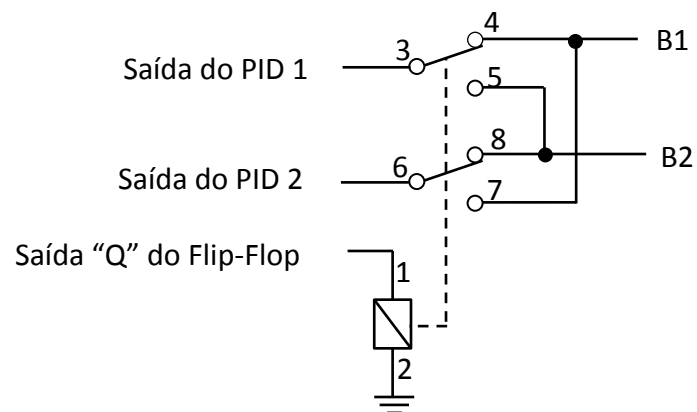


Figura 24 - Símbolo ilustrativo de um relé duplo.

6 CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE QUATRO TANQUES COM SISTEMA INTELIGENTE DE RESTABELECIMENTO DE CONTROLE NO LABVIEW®

Abaixo tem-se o sistema multivariável de quatro tanques de Johansson (2000), com o sistema inteligente de restabelecimento de controle desenvolvido e demonstrado no capítulo 5.

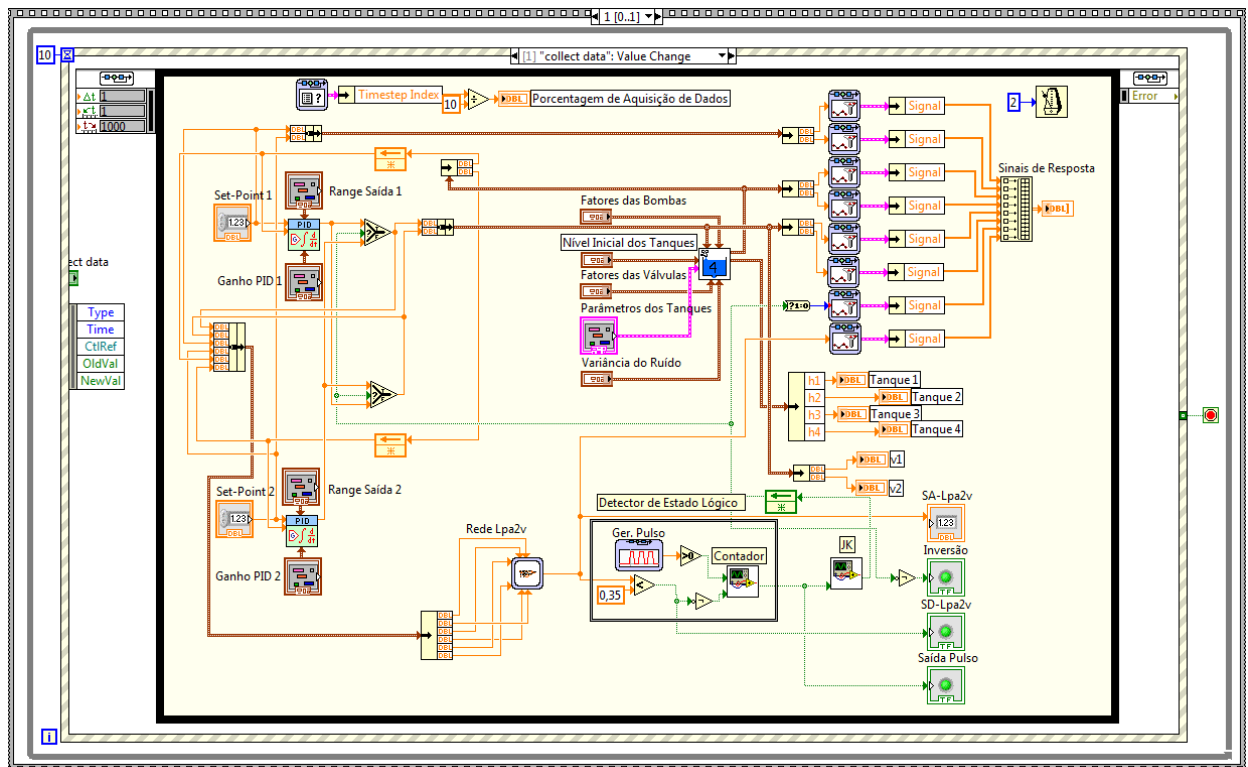


Figura 25 - Planta Multivariável, Sistema Quatro Tanques, Johansson (2000), com sistema inteligente de restabelecimento de controle, reproduzida no LabVIEW®.

No Apêndice D, tem-se o detalhamento de cada item do modelo da figura 25.

6.1 ENSAIOS PARA LEVANTAMENTO DE DADOS COM O SISTEMA MULTIVARIÁVEL DE QUATRO TANQUES COM SISTEMA INTELIGENTE DE RESTABELECIMENTO DE CONTROLE

Para se obter informações sobre a funcionalidade e comportamento do processo multivariável com o sistema inteligente de restabelecimento de controle, foi simulado este processo no LabVIEW® com os mesmos parâmetros utilizados com a

planta original idealizada por Johansson (2000), porém o parâmetro X foi alternado entre $X=0,7$ e $X=0,3$ para checar a funcionalidade do sistema.

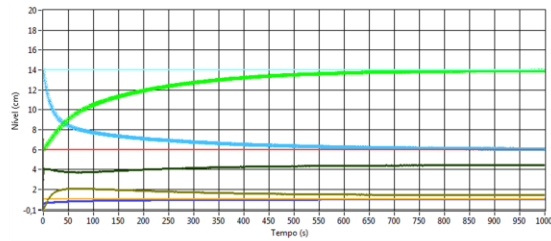
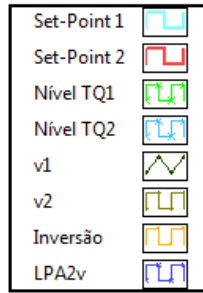
A terceira forma de simulações é apresentada na tabela 3.

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

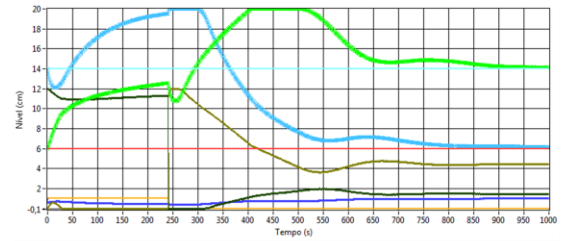
Ensaio	X1	X2	Nível Inicial TQ1	Nível Inicial TQ2	SP1	SP2	Tempo aproximado para Estabilização Nível TQ1	Tempo aproximado para Estabilização Nível TQ2
21	0,7	0,7	6 cm	14 cm	14 cm	6 cm	650s	550s
22	0,3	0,3	6 cm	14 cm	14 cm	6 cm	900s	850s
23	0,7	0,7	6 cm	14 cm	12 cm	8 cm	200s	800s
24	0,7	0,7	6 cm	14 cm	10 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

A seguir tem-se os gráficos com os dados de cada um dos ensaios da tabela 3.

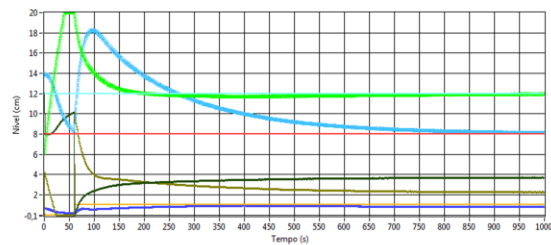
Legenda dos gráficos.



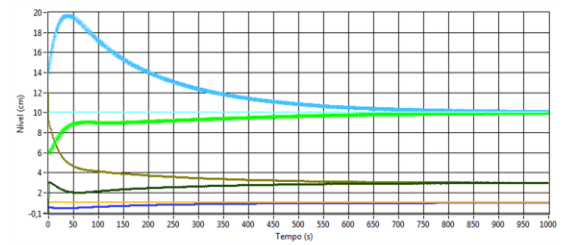
Ensaio 21.



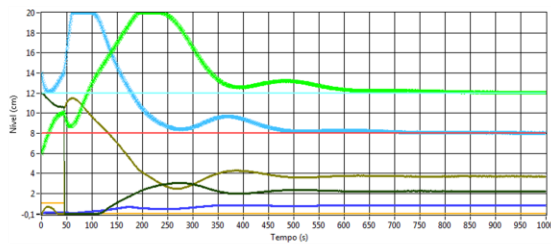
Ensaio 22.



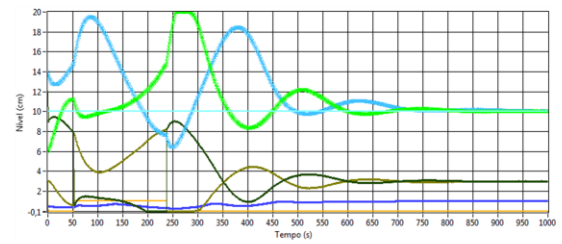
Ensaio 23.



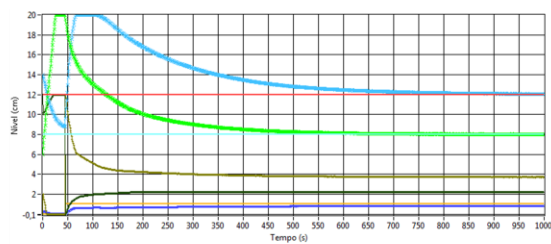
Ensaio 24.



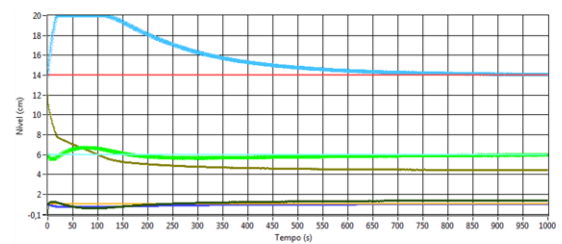
Ensaio 25.



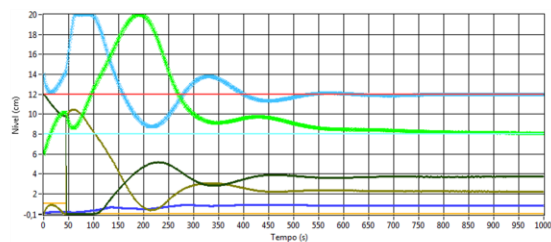
Ensaio 26.



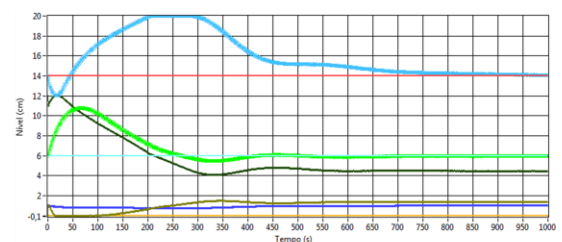
Ensaio 27.



Ensaio 28.



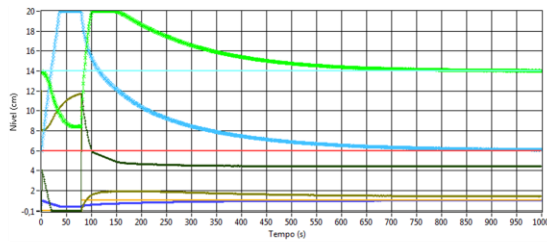
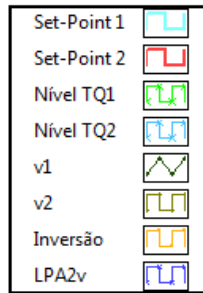
Ensaio 29.



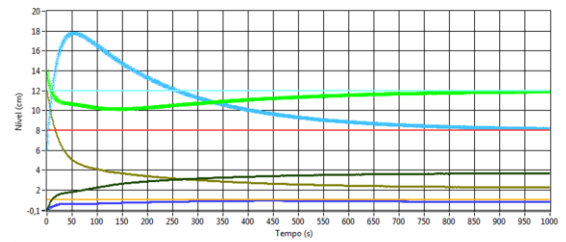
Ensaio 30.

Figura 26 - 3ª forma de simulações, ensaios 21 ao 30, parâmetro “X” alternando 0,3 e 0,7.

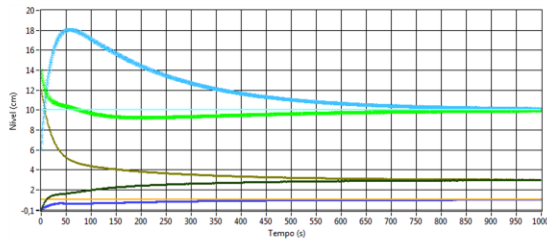
Legenda dos gráficos.



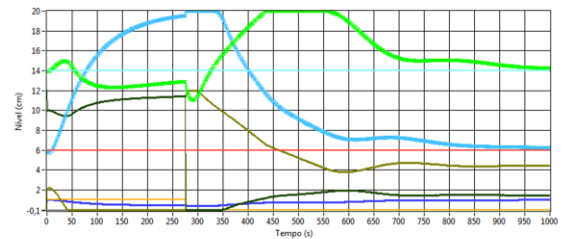
Ensaio 31.



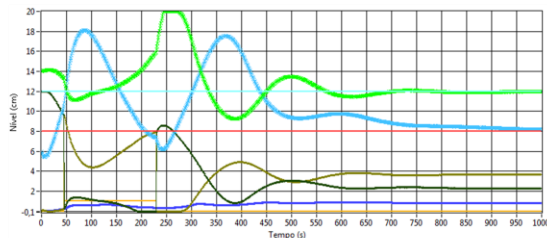
Ensaio 32.



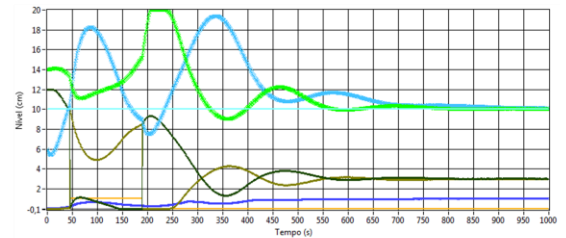
Ensaio 33.



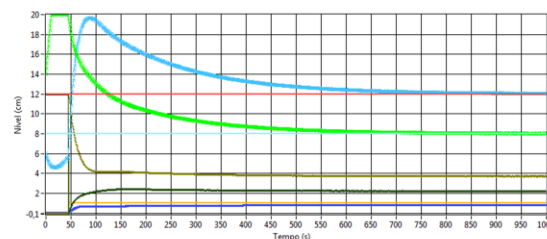
Ensaio 34.



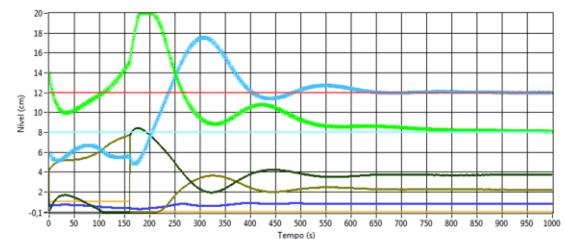
Ensaio 35.



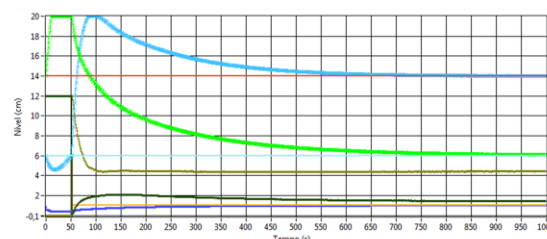
Ensaio 36.



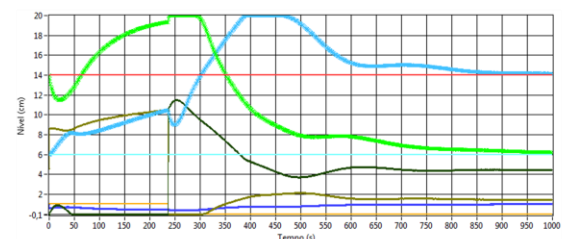
Ensaio 37.



Ensaio 38.



Ensaio 39.



Ensaio 40.

Figura 27 - 3ª forma de simulações, ensaios 31 ao 40, parâmetro "X" alternando 0,3 e 0,7.

6.2 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 integral = 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 26 e 27, 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, nos subcapítulos 4.3 e 4.6, 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 das figuras 26 e 27.

7 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 17 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, subcapítulo 4.3, o par de controles era correto (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 18 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, subcapítulo 4.6, o par de controles não era correto (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 26, 27 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. 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.

7.1 CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO (CEP)

Como forma de visualização gráfica, considerando que aos 1000s⁶ os *set-points* foram atingidos, foi realizada uma análise gráfica da planta e plotado os dados da planta original e da planta com o Sistema inteligente de Restabelecimento em uma carta de controle.

Segundo Juran (1998), princípios de controle de qualidade, incluindo o uso de controles gráficos, foram difundidos principalmente durante a Segunda Guerra Mundial como um meio para manter a qualidade e promover a melhoria contínua. Os gráficos de controle são agora amplamente utilizados em todos os setores. Eles são as principais ferramentas de controle estatístico do processo (CEP).

Ainda segundo Juran (1998), gráficos para atributos, podem ser utilizados em situações em que deseja-se contar o número de itens não conformes ou o número de não conformidades em uma amostra.

Para checar o controle estatístico do processo, foi utilizada a carta de controle para fração de itens não conformes ou defeituosos (gráfico p) para visualizar quando o processo perde o controle.

Foi construída abaixo a tabela 4, com os dados do processo e estatístico, unificando os resultados da planta original e inteligente.

Foi atribuído que a especificação do processo é $LIE = 0 = E < LSE < 1$, ou seja, binomial. A especificação “0” indica que nenhum tanque está fora de controle, um limite “1” indica algum tanque fora de controle.

Sendo,

LIE = Limite Inferior de Especificação do Processo

E = Especificação do Processo

LSE = Limite Superior de Especificação do Processo

Dado o que foi exposto, em condições do processo estar em “Estado de Controle Estatístico” ($pDi = 0$), a variância e desvio padrão serão zero, por isso será plotado no gráfico somente os limites de especificação, a fração de não conformes e a média para a visualização gráfica do comportamento do processo.

⁶ Tempo adotado para se obter uma comparação direta – visual com todos os gráficos.

Na coluna “Processo fora de Controle (Di)” foi atribuído “2” em cada linha em que após o ensaio qualquer tanque ficou fora de controle (o controle deste processo fica inviabilizado quando qualquer um dos tanques não atinge o *set-point*), enquanto que, para os tanques que ficaram sob controle, não lhes foram atribuídos peso algum.

Abaixo temos as fórmulas da carta de controle fração de não conformes “p” (JURAN, 1998):

Cálculo da coluna de proporção de defeitos por amostra “pDi”:

$$pDi = \frac{Di}{ni} \quad (7.1.1)$$

Di = Defeitos na amostra i

ni = Tamanho da Amostra “ i ”

Obs.: Tamanho da Amostra é “2” (2 tanques).

Cálculo da média da proporção de defeitos por amostra “ $\bar{p}$ ”:

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^m Di}{\sum_{i=1}^m ni} \quad (7.1.2)$$

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^{40} Di}{\sum_{i=1}^{40} ni} \quad (7.1.3)$$

$$\bar{p} = \frac{20}{80} \quad (7.1.4)$$

$$\bar{p} = 0,25 \quad (7.1.5)$$

m = Número total de Ensaio realizados

$$\sum_{i=1}^m Di = \text{Total de amostras defeituosas}$$

$$\sum_{i=1}^m ni = \text{Total de amostras}$$

Tabela 4 – Dados gerais e de estatística dos modos de simulações (após 1000s).

ENSAIO	X	PLANTA	SP1	SP2	h1	h2	(Di)	(pDi)
1	0,7	ORIGINAL	14	6	14	6	0	0
2			12	8	12	8	0	0
3			10	10	10	10	0	0
4			8	12	8	12	0	0
5			6	14	6	14	0	0
6			14	6	14	6	0	0
7			12	8	12	8	0	0
8			10	10	10	10	0	0
9			8	12	8	12	0	0
10			6	14	6	14	0	0
11	0,3		14	6	14	20	2	1
12			12	8	12	20	2	1
13			10	10	10	20	2	1
14			8	12	20	12	2	1
15			6	14	20	14	2	1
16			14	6	14	20	2	1
17			12	8	20	8	2	1
18			10	10	20	10	2	1
19			8	12	8	20	2	1
20			6	14	20	14	2	1
21	0,7	INTELIGENTE	14	6	14	6	0	0
22	0,3		14	6	14	6	0	0
23	0,7		12	8	12	8	0	0
24	0,7		10	10	10	10	0	0
25	0,3		12	8	12	8	0	0
26	0,3		10	10	10	10	0	0
27	0,7		8	12	8	12	0	0
28	0,7		6	14	6	14	0	0
29	0,3		8	12	8	12	0	0
30	0,3		6	14	6	14	0	0
31	0,7		14	6	14	6	0	0
32	0,7		12	8	12	8	0	0
33	0,7		10	10	10	10	0	0
34	0,3		14	6	14	6	0	0
35	0,3		12	8	12	8	0	0
36	0,3		10	10	10	10	0	0
37	0,7		8	12	8	12	0	0
38	0,3		8	12	8	12	0	0
39	0,7		6	14	6	14	0	0
40	0,3		6	14	6	14	0	0
							20 SOMA	0,25 MÉDIA

Abaixo se pode plotar o gráfico com os valores calculados.

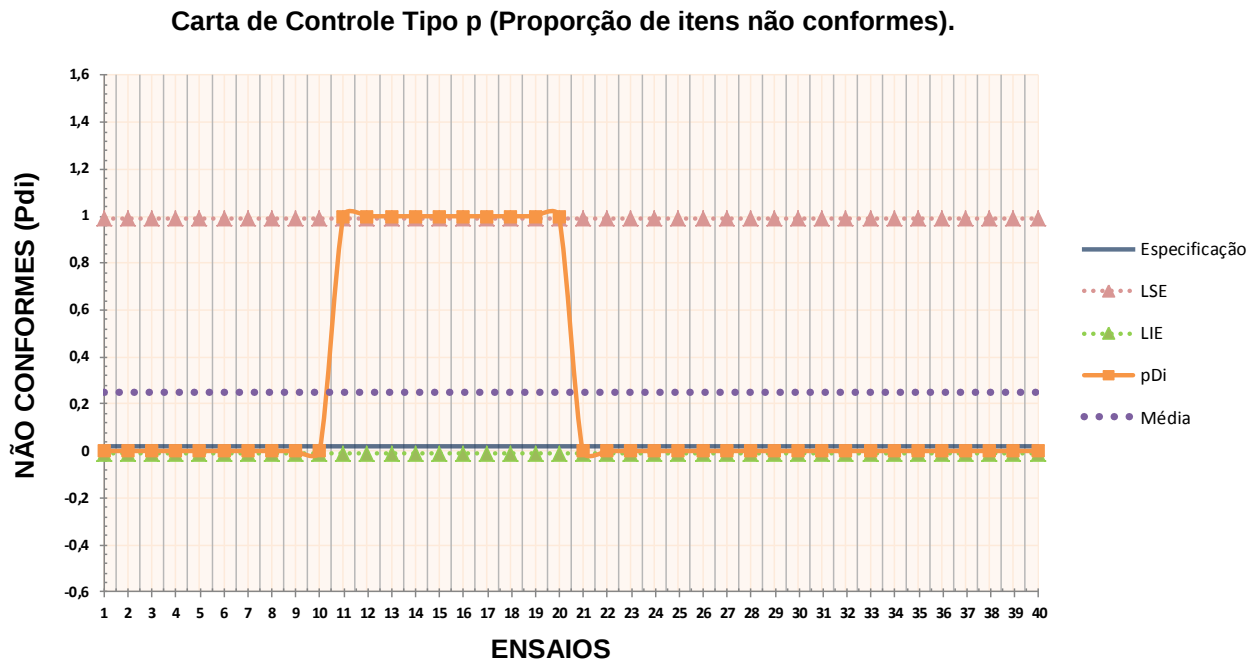


Figura 28 – Carta de Controle para visualização gráfica do comportamento da planta.

7.2 CAPACIDADE DO PROCESSO

No trabalho de Baptista (2014), o controle de níveis em tanque de petróleo foi escolhido devido à necessidade de grande precisão na medição, ou seja, baixíssima tolerância a incertezas, imprecisões e contradições.

Segundo Ginn e Varner (2004), capacidade do processo refere-se à aptidão de um processo para fazer consistentemente um produto que atende a uma dada faixa de especificação (tolerância).

Pode-se notar, na carta da figura 28 que, do ensaio 1 ao 10 (Planta Original, parâmetro $X=0,7$) e do ensaio 21 ao 40 (Planta inteligente, parâmetro X alternando entre 0,3 e 0,7), a planta manteve plena capacidade. Por outro lado, do ensaio 11 ao 20 (Planta Original, parâmetro $X = 0,3$), A planta não foi capaz de atender as especificações do processo.

7.3 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 os 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 demonstrado 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.

8 CONCLUSÃO

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 demonstrou 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.

8.1 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 submetê-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 BIBLIOGRÁFICAS

ABE, J. M. **Fundamentos da Lógica Anotada**. Tese de Doutorado. 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).

ARRUDA, A. Y. N. A. **Vasiliev e a Lógica Paraconsistente**. Unicamp, Coleção CLE, 7, Campinas, 1990.

ÁVILA, B. C. **Uma Abordagem Paraconsistente baseada em lógica evidencial para tratar exceções em sistemas de Frames com Múltipla Herança**. Tese de Doutorado-EPUSP. São Paulo, 1996.

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

BITTENCOURT, G. **Inteligência Artificial: Ferramentas e Teorias**. Campinas: Instituto de Computação, UNICAMP, 1996.

BLAIR, H. A.; SUBRAHAMANIAN, V. S. **Paraconsistent Foundations for Logic Programming**. Journal of Non-Classical Logic, vol 5, NO 2, pp.45-73, 1988.

BRISTOL, E. H. **On a new Measure of Interactions for Multivariable Process Control**. IEEE Trans. Auto. Control AC-11, 1966, pp.133-134.

COELHO, M. S. **Controle PI Híbrido com Lógica Paraconsistente Aplicado em Malha de Controle de Nível em Vaso Pressurizado**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UNISANTA – Universidade Santa Cecília, 2015, 100 p.

DA COSTA, N. C. A. **Sistemas formais inconsistentes**. Tese (Cátedra de Matemática) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1963a, 68p.

DA COSTA, N. C. A. **Calculs propositionnels pour les systèmes formels inconsistants**. Comptes Rendus de l'Académie de Sciences de Paris, t. 257, 1963b, p. 3790-3793.

DA COSTA, N. C. A. **Filtres et Idéaux d'une algebre Cn**. CR Acad. Sc. Paris 264 (1967).

DA COSTA, N. C. A. **On the theory of inconsistent formal systems**. Notre Dame Journal of Formal Logic, v. 15, n. 4, 1974, p. 497-510.

DA COSTA, N. C. A.; ARRUDA, A. I. **Une sémantique pour le calcul C1=**. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, t. 284A, 1977, p. 279-282.

DA COSTA, N. C. A.; ABE, J. M.; DA SILVA FILHO, J. I.; MUROLO, A. C. **Lógica Paraconsistente Aplicada**. 2ª. Ed., 1999, Editora Atlas, 214 p.

DA COSTA, N. C. A.; SUBRAHMANYAN, V. S.; VAGO, C. **The Paraconsistent Logic Pt**. Zeitschrift für Mathematische Logik und Grundlagen der Mathematik, Vol.37, pp.139-148, 1991.

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.

DE ALMEIDA PRADO, J. P. **Uma Arquitetura Baseada em Lógica Paraconsistente Anotada para o Controle de Célula de Manufatura**. São Paulo, SP: Universidade de São Paulo - USP, 1996. Tese.

DELATORE, FABIO. **Controle multivariável em redes de trocadores de calor com by-passes**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3139/tde-13072011-145446/>>. Acesso em: 05-01-2016.

DOTTAVIANO, ITALIA 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.

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.

JĄSKOWSKI, 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).

JURAN, J.M.; GODFREY, A.B. **Juran's Quality Handbook**. 5th.Ed., New York, McGraw-Hill, 1999, pp.45.12-45.14.

MORAES JR.,D.; SILVA, E.L.; MORAES, M.S. **Aplicações Industriais de Estática e Dinâmica dos Flúidos 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.

SOUZA, P. R. S. **Métodos de Apoio a Decisão Médica para Aplicação em Diabetes Mellitus Gestacional utilizando a Probabilidade Pragmática na Lógica Paraconsistente Anotada de Dois Valores para Melhor Precisão de Resposta**. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, USP - Universidade de São Paulo, 2009.

SUBRAHMANIAN, V.S. **On the semantics of quantitative Logic 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.

APÊNDICE A – MODELAMENTO DE UM TANQUE

1. MODELO DE UM TANQUE E CONSIDERAÇÕES SOBRE O FLUÍDO

Abaixo é apresentado um tanque com suas variáveis (figura 29).

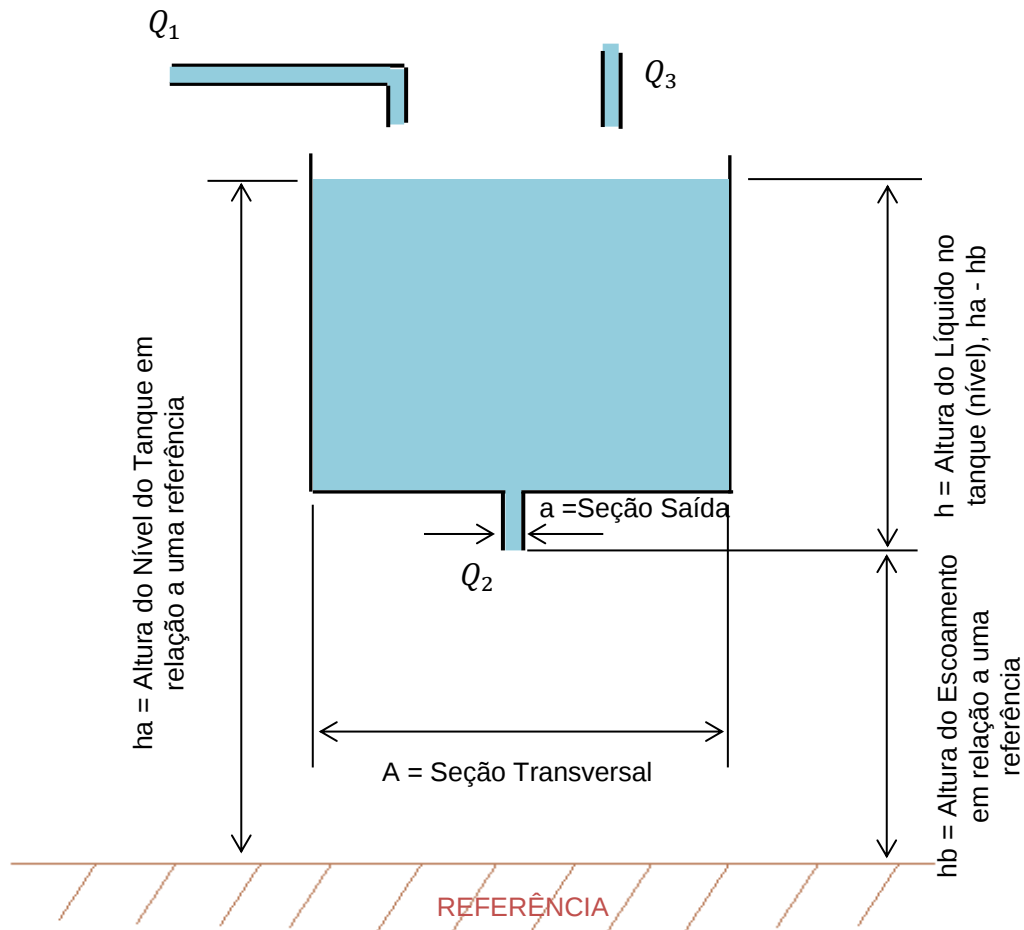


Figura 29 - Modelo de um Tanque com duas entradas (Q_1 e Q_3) e uma saída (Q_2).

Sendo que:

A = Seção transversal do Tanque em " cm^2 ", que por sua vez é constante ao longo da altura do tanque.

a = Seção transversal do tubo de saída em " cm^2 ".

h_a = Altura da coluna de líquido no tanque em relação a uma referência em " cm ".

h_b = Altura do tubo de saída em relação a uma referência em " cm ".

h = Nível do tanque ($h_a - h_b$) em " cm ".

Q_1 = Vazão controlada em cm^3 / s .

Q_2 = Vazão que sai do tanque por gravidade em cm^3 / s .

Q_3 = Variável perturbação (corrente chegando de outra unidade, não se pode controlar essa corrente), em cm^3 / s .

Considerações sobre o fluído:

- Fluído Ideal, não viscoso (será desprezado o atrito existente entre as distintas partes do fluído);
- Estacionário (a velocidade do fluído é constante em cada ponto), incompressível (a densidade do fluído é a mesma em todos os pontos e permanece constante no tempo);
- Irrotacional (não há movimento de rotação em nenhuma parte do fluído, ou seja, não apresenta turbilhões).

2. ACÚMULO NO VOLUME DE CONTROLE

LEI DA CONSERVAÇÃO DA MASSA OU LEI DE LAVOISIER

A equação 2.1 traduz a conservação da massa. A massa acumulada em um tanque por unidade de tempo é igual a massa que entra no tanque por unidade de tempo menos a Massa que sai do tanque por unidade de tempo (MORAES JR., SILVA e MORAES M.,2014).

$$\frac{dM}{dt} = w_{e,vc} - w_{s,vc} \quad (2.1)$$

$\frac{dM}{dt}$ = Massa acumulada por unidade de tempo no volume de controle (vc)

$w_{e,vc}$ = (Vazão mássica) Massa por unidade de tempo que entra no vc

$w_{s,vc}$ = (Vazão mássica) Massa por unidade de tempo que sai do vc

Obs.: Pode-se entender que volume de controle (vc) é o tanque.

Igualando a equação 2.1 a zero:

$$w_{s,vc} - w_{e,vc} + \frac{dM}{dt} = 0 \quad (2.2)$$

Sabendo-se que pela equação da continuidade (MORAES JR., SILVA e MORAES M.,2014):

$$w = \rho \cdot v \cdot A \quad (2.3)$$

e

$$Q = v \cdot A \quad (2.4)$$

w = Vazão mássica (massa por unidade de tempo)

ρ = Massa específica

v = Velocidade do fluido

$\emptyset$ = Diâmetro do tubo ou tanque

Q = Vazão volumétrica

A = Seção transversal do tubo ou tanque

$$A = \frac{\pi \cdot \emptyset^2}{4} \quad (2.5)$$

Substitui-se a equação 2.3 em 2.2 tem-se a equação 2.6:

$$\rho_{s,vc} \cdot v_{s,vc} \cdot A_{s,vc} - \rho_{e,vc} \cdot v_{e,vc} \cdot A_{e,vc} + \frac{dM}{dt} = 0 \quad (2.6)$$

$\rho_{s,vc}$ = Massa específica na saída do vc

$v_{s,vc}$ = Velocidade do fluido que sai do vc

$A_{s,vc}$ = Seção transversal do tubo de saída do tanque

$\rho_{e,vc}$ = Massa específica que entra no vc

$v_{e,vc}$ = Velocidade do fluido que entra no vc

$A_{e,vc}$ = Seção transversal do tubo de entrada do tanque

Substituindo a equação 2.4 em 2.6 tem-se a equação 2.7:

$$\rho_{s,vc} \cdot Q_{s,vc} - \rho_{e,vc} \cdot Q_{e,vc} + \frac{dM}{dt} = 0 \quad (2.7)$$

$Q_{e,vc}$ = Vazão volumétrica por unidade de tempo que entra no vc

Se a massa específica (ρ) do fluido, dentro do volume de controle, puder ser considerada a mesma da saída, “incompressível” (A densidade do fluido é a mesma em todos os pontos e permanece constante no tempo), então:

$$M = V \cdot \rho \quad (2.8)$$

M = Massa

V = Volume

ρ = Massa específica

Substituindo a equação 2.8 em 2.7 tem-se a equação 2.9:

$$\rho_{s,vc} \cdot Q_{s,vc} - \rho_{e,vc} \cdot Q_{e,vc} + \rho_{vc} \cdot \frac{dV}{dt} = 0 \quad (2.9)$$

Se a massa específica (ρ) na entrada e saída e no volume de controle são constantes então:

$$\rho_{s,vc} \cdot Q_{s,vc} - \rho_{e,vc} \cdot Q_{e,vc} + \rho_{vc} \cdot \frac{dV}{dt} = 0 \quad (2.10)$$

$$Q_{s,vc} - Q_{e,vc} + \frac{dV}{dt} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{dV}{dt} = Q_{e,vc} - Q_{s,vc} \quad (2.12)$$

$\frac{dV}{dt}$ = Volume acumulado por unidade de tempo no Tanque ou Volume de Controle (vc)

$Q_{e,vc}$ = Vazão volumétrica por unidade de tempo que entra no vc

$Q_{s,vc}$ = Vazão volumétrica por unidade de tempo que sai no vc

Portanto, tem-se que o volume acumulado por unidade de tempo no Volume de Controle (vc) = Vazão volumétrica por unidade de tempo que entra no (vc) – Vazão volumétrica por unidade de tempo que sai no (vc).

Em aplicações práticas relacionadas com nível de líquido (h) em um determinado tempo em tanque cilíndrico vertical, considerando massa específica (ρ) na entrada, saída e no volume de controle sendo constantes tem-se:

$$V = A \cdot h \quad (2.13)$$

V = Volume

A = Seção transversal

h = Altura do líquido no Tanque (nível)

Substituindo a equação 2.13 em 2.11 temos a equação 2.14:

$$Q_{s,vc} - Q_{e,vc} + A \frac{dh}{dt} = 0 \quad (2.14)$$

A = Seção transversal do Tanque

h = Altura (nível) do fluido no tanque.

$$A \frac{dh}{dt} = Q_{e,vc} - Q_{s,vc} \quad (2.15)$$

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{Q_{s,vc}}{A} + \frac{Q_{e,vc}}{A} \quad (2.16)$$

$\frac{dh}{dt}$ = Nível acumulado por unidade de tempo no Tanque ou Volume de Controle (vc).

Portanto o Nível do tanque é: a Vazão de saída (escoamento) dividida pela área do tanque subtraído da vazão que entra dividido pela área do tanque.

3. SAÍDA DO VOLUME DE CONTROLE (Q_2)

Por meio da equação fundamental da hidrodinâmica de Bernoulli é possível encontrar a relação da velocidade de escoamento da água pela tubulação em função da altura do líquido nos tanques. Assim, para o tanque em relação ao seu tubo de saída, a equação de Bernoulli é dada abaixo.

$$P_1 + \rho \cdot g \cdot h_a + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \rho \cdot g \cdot h_b + \frac{\rho v_2^2}{2} \quad (3.1)$$

P_1 = A pressão na superfície do líquido do tanque (no caso pressão de 1 atm.).

ρ = Massa específica (g/cm^3).

g = Aceleração da gravidade (cm/s^2).

h_a = Altura do nível no tanque, em relação a uma referencia (cm).

v_1 = Velocidade da variação do nível do tanque. (cm/s).

P_2 = Pressão do fluido na saída do tanque (no caso pressão de 1 atm.).

h_b = Altura do orifício de saída da água, em relação a uma referência (cm).

v_2 = Velocidade do líquido no tubo de saída (cm/s).

Como a pressão atmosférica é a mesma nos dois pontos então:

$$P_{\text{atm}} + \rho \cdot g \cdot h_a + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_{\text{atm}} + \rho \cdot g \cdot h_b + \frac{\rho v_2^2}{2} \quad (3.2)$$

Dividindo todos os termos pela massa específica ρ :

$$g \cdot h_a + \frac{v_1^2}{2} = g \cdot h_b + \frac{v_2^2}{2} \quad (3.3)$$

$$g \cdot h_a + \frac{v_1^2}{2} = g \cdot h_b + \frac{v_2^2}{2} \quad (3.4)$$

$$g \cdot h_a - g \cdot h_b = \frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} = \frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} = g \cdot h_a - g \cdot h_b \quad (3.5)$$

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = g(h_a - h_b) \quad (3.6)$$

$$v_2^2 - v_1^2 = 2g(h_a - h_b) \quad (3.7)$$

Utilizou-se a equação da continuidade em um líquido incompressível e isolou-se a velocidade.

$$v_1 \cdot A = a \cdot v_2 \rightarrow v_1 = \frac{a \cdot v_2}{A} \quad (3.8)$$

v_1 = Velocidade da variação do nível do tanque (cm/s)

a = Seção transversal do tubo de saída (cm²).

v_2 = Velocidade do líquido no tubo de saída (cm/s)

A = Seção transversal do Tanque (cm²).

Ao substituir a Equação 3.8 na Equação 3.7 obtém-se a Equação 3.9.

$$v_2^2 - \left(\frac{a \cdot v_2}{A}\right)^2 = 2g(h_a - h_b) \quad (3.9)$$

$$v_2^2 + \frac{a^2 \cdot v_2^2}{A^2} = 2g(h_a - h_b) \quad (3.10)$$

$$mmc \text{ de } A^2 ; 1 ; 1 \rightarrow \frac{A^2 \cdot v_2^2}{A^2} + \frac{a^2 \cdot v_2^2}{A^2} = \frac{2g(h_a - h_b) \cdot A^2}{A^2} \quad (3.11)$$

$$\frac{A^2 \cdot v_2^2 + a^2 \cdot v_2^2}{A^2} = \frac{2g(h_a - h_b) \cdot A^2}{A^2} \quad (3.12)$$

$$v_2^2 \cdot \frac{(A^2 + a^2)}{A^2} = \frac{2g(h_a - h_b) \cdot A^2}{A^2} \quad (3.13)$$

$$v_2^2 = \frac{\frac{2g(h_a - h_b) \cdot A^2}{A^2}}{\frac{(A^2 + a^2)}{A^2}} \quad (3.14)$$

$$v_2^2 = \frac{2g(h_a - h_b) \cdot A^2}{A^2} \cdot \frac{A^2}{A^2 + a^2} \quad (3.15)$$

$$v_2^2 = 2g(h_a - h_b) \cdot \frac{A^2}{A^2 + a^2} \quad (3.16)$$

A Velocidade de saída do fluido do tanque pode ser calculada por:

$$v_2 = \sqrt{2g(h_a - h_b) \cdot \frac{A^2}{A^2 + a^2}} \quad (3.17)$$

Como $A = 30\text{cm}^2$ e $a = 0,06\text{cm}^2$ (em torno destes valores): $\frac{A^2}{A^2 + a^2} = \frac{30^2}{30^2 + 0,06^2} = \frac{900}{900 + 0,0036} = 0,999996000015999936000255998976$

Podemos então considerar a velocidade de escoamento do tanque:

$$v_2 = \sqrt{2g(h_a - h_b)} \quad (3.18)$$

$h = h_a - h_b = \text{Altura do líquido no Tanque (nível)}$

$$v_2 = \sqrt{2gh} \quad (3.19)$$

$h = \text{Altura do líquido no Tanque (nível)}$

Substituindo a equação 3.19 em 2.4, a vazão volumétrica que sai do tanque é:

$$Q_2 = v_2 \cdot a \quad (3.20)$$

$Q_2 = \text{Vazão volumétrica que sai do Tanque}$

$v_2 = \text{Velocidade com que o fluido sai do tanque}$

$a = \text{Seção do tubo de saída do tanque}$

Substituindo a equação 3.19 na equação 3.20 tem-se a equação 3.21, que é a vazão volumétrica que sai do tanque ou escoamento do tanque:

$$Q_2 = a\sqrt{2gh} \quad (3.21)$$

A vazão volumétrica de escoamento de um tanque é igual à seção do tubo de saída do tanque multiplicado pela raiz quadrada do produto de 2, aceleração da gravidade e altura do líquido (nível).

4. ENTRADA NO VOLUME DE CONTROLE ($Q_1 + Q_3$)

Através do modelo da figura 29, Q_1 e Q_3 são as vazões parciais de entrada no volume de controle (tanque).

As vazões Q_1 e Q_3 são vazões volumétricas que podem provir de outros tanques, bombas, unidades e etc...

Se Q_1 e Q_3 são vazões volumétricas que entram no tanque ou Volume de Controle vc , então, tem-se:

$$Q_{e,vc} = Q_1 + Q_3 \quad (4.1)$$

$Q_{e,vc}$ = Vazão volumétrica por unidade de tempo que entra no vc

Q_1 ; Vazão volumétrica parcial 1.

Q_3 = Vazões volumétricas parcial 2.

5. EQUACIONAMENTO DO TANQUE

Pode-se agora equacionar o tanque partindo da equação 2.16 reproduzida em 5.1:

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{Q_{s,vc}}{A} + \frac{Q_{e,vc}}{A} \quad (5.1)$$

Observando que a equação 3.21, reproduzida em 5.2, representa a vazão volumétrica que sai do vc:

$$Q_2 = a\sqrt{2gh} \quad (5.2)$$

E:

$$Q_2 = Q_{s,vc} \quad (5.3)$$

Substituindo a equação 5.2 em 5.1, temos a equação 5.4:

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{a\sqrt{2gh}}{A} + \frac{Q_{e,vc}}{A} \quad (5.4)$$

Substituindo a equação 4.1, reproduzida em 5.5, na equação 5.4, tem-se a equação 5.6:

$$Q_{e,vc} = Q_1 + Q_3 \quad (5.5)$$

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{a\sqrt{2gh}}{A} + \frac{Q_1}{A} + \frac{Q_3}{A} \quad (5.6)$$

Então em 5.6 chega-se ao equacionamento do nível para o tanque da figura 29.

APÊNDICE B - MATRIZ RGA (MATRIZ DE GANHOS RELATIVOS)

Em um processo MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) múltiplas entradas e múltiplas saídas, uma técnica muito útil para se saber qual variável manipulada terá mais influência em determinada variável controlada é a Matriz RGA, já que " ΔM_1 " influencia " ΔC_1 " através de " K_{11} " e " ΔC_2 " através de " K_{21} ", por outro lado " ΔM_2 " influencia " ΔC_1 " através de " K_{12} " e " ΔC_2 " através de " K_{22} ". Ver figura 30.

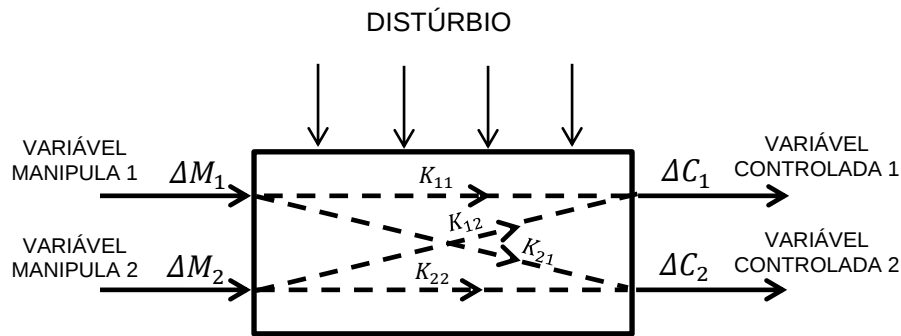


Figura 30 – Processo múltiplas entradas e múltiplas saídas.

A Matriz RGA (Relative Gain Array) ou Matriz de Ganhos Relativos foi introduzida por Bristol (1966) como uma medida do grau de interação entre todos os possíveis pares de sistemas SISO (Single-Input Single-Output), em estado estacionário, ou seja, não variam com o tempo, em uma determinada estratégia de controle.

No trabalho de Johansson (2000) é utilizada a técnica da Matriz RGA, e em Sagaz (2003), foi demonstrado o cálculo na integral para o processo multivariável de quatro tanques.

Segundo Seborg et al. (2004), um sistema RGA é representado por " Λ " e tem o seguinte formato:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \dots & \gamma_{1n} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \dots & \gamma_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \dots & \gamma_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Cada termo de " Λ ", ou seja, " γ_{ij} " da matriz é calculado da seguinte forma (SAGAZ 2003):

$$\gamma_{ij} = \frac{\left(\frac{\Delta C_i}{\Delta M_j}\right)_M}{\left(\frac{\Delta C_i}{\Delta M_j}\right)_C} = \frac{\text{Ganho Relacional de Malha Aberta}}{\text{Ganho Relacional de Malha Fechada}} \quad (2)$$

$$\left(\frac{\Delta C_i}{\Delta M_j}\right)_M = \text{Ganho Relacional de Malha Aberta}$$

$$\left(\frac{\Delta C_i}{\Delta M_j}\right)_C = \text{Ganho Relacional de Malha Fechada}$$

Por exemplo, neste trabalho temos um sistema multivariável 2X2, ou seja, duas entradas e duas saídas, figura 30.

É ilustrado em Sagaz (2003) um sistema 2x2 conforme a figura 31:

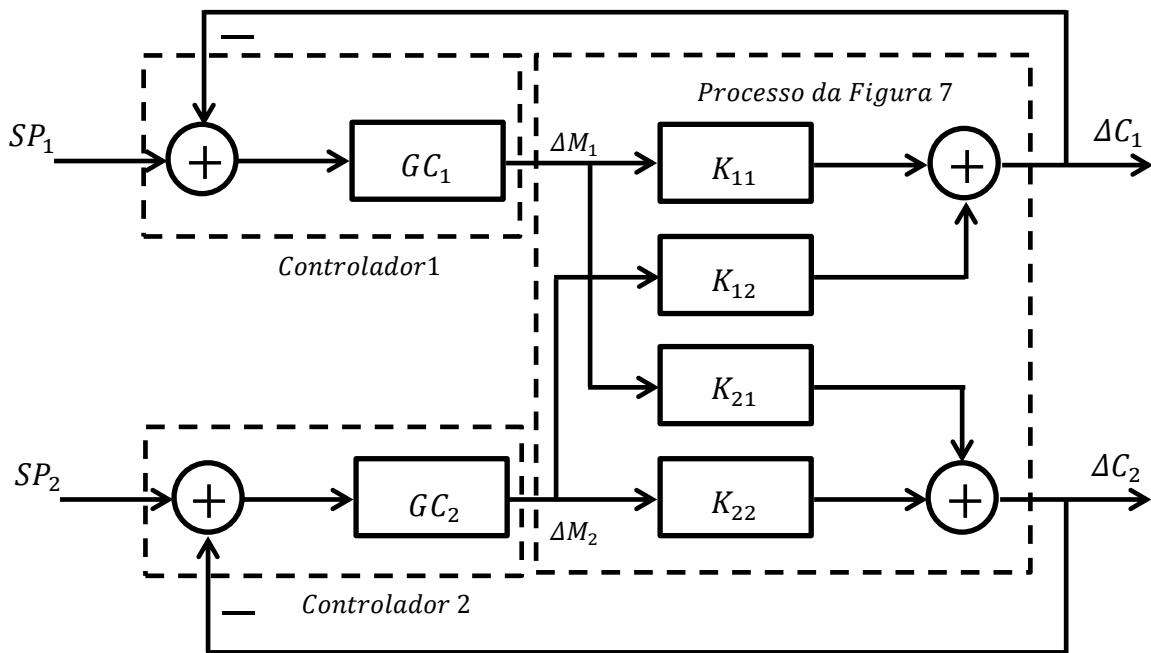


Figura 31 – Sistema 2x2.
(Fonte: adaptado de SAGAZ 2003)

Pode-se concluir observando a figura 30 e 31 que:

$$\Delta C_1 = K_{11} \cdot \Delta M_1 + K_{12} \cdot \Delta M_2 \quad (3)$$

e,

$$\Delta C_2 = K_{21} \cdot \Delta M_1 + K_{22} \cdot \Delta M_2 \quad (4)$$

Para continuar no desenvolvimento da matriz RGA precisa-se calcular

$\left(\frac{\Delta C_i}{\Delta M_j}\right)_M = \text{Ganho Relacional de Malha Aberta}$, para isso mantém-se a variável manipulada " ΔM_n " constante igual a "zero". Ver figura 31 e equações 3 e 4.

$$\left.\frac{\Delta C_1}{\Delta M_1}\right|_{M_2} = K_{11} \quad (5)$$

Para calcular " K_{11} " fazer " ΔC_1 " dividido por " ΔM_1 ", mantendo M_2 constante.

$$\left.\frac{\Delta C_1}{\Delta M_2}\right|_{M_1} = K_{12} \quad (6)$$

Para calcular " K_{12} " fazer " ΔC_1 " dividido por " ΔM_2 ", mantendo M_1 constante.

$$\left.\frac{\Delta C_2}{\Delta M_1}\right|_{M_2} = K_{21} \quad (7)$$

Para calcular " K_{21} " fazer " ΔC_2 " dividido por " ΔM_1 ", mantendo M_2 constante.

$$\left.\frac{\Delta C_2}{\Delta M_2}\right|_{M_1} = K_{22} \quad (8)$$

Para calcular " K_{22} " fazer " ΔC_2 " dividido por " ΔM_2 ", mantendo M_1 constante.

Dando continuidade, serão calculados, $\left(\frac{\Delta C_i}{\Delta M_j}\right)_C = \text{Ganho Relacional de Malha Fechada}$, para isso mantém-se " ΔC_n " constante. Ver figura 31.

Calcula-se " K'_{11} ", que é o ganho em malha fechada mantendo " C_2 " constante:

$$K'_{11} = \left.\frac{\Delta C_1}{\Delta M_1}\right|_{C_2} \quad (9)$$

Substitui-se na equação 4, " ΔC_2 " = 0:

$$0 = K_{21} \cdot \Delta M_1 + K_{22} \cdot \Delta M_2 \quad (10)$$

$$-K_{22} \cdot \Delta M_2 = K_{21} \cdot \Delta M_1 \quad (11)$$

$$\Delta M_2 = \frac{-K_{21}}{K_{22}} \cdot \Delta M_1 \quad (12)$$

Substitui-se a equação 12 na equação 3,

$$\Delta C_1 = K_{11} \cdot \Delta M_1 + K_{12} \cdot \frac{-K_{21}}{K_{22}} \cdot \Delta M_1 \quad (13)$$

Coloca-se " ΔM_1 " em evidência,

$$\Delta C_1 = \Delta M_1 \left(K_{11} + K_{12} \cdot \frac{-K_{21}}{K_{22}} \right) \quad (14)$$

Então,

$$\frac{\Delta C_1}{\Delta M_1} = K_{11} + K_{12} \cdot \frac{-K_{21}}{K_{22}} \quad (15)$$

Portanto " K'_{11} ", que é o ganho em malha fechada mantendo " C_2 " constante é:

$$K'_{11} = \left(\frac{\Delta C_1}{\Delta M_1} \right)_{C_2} = K_{11} + K_{12} \cdot \frac{-K_{21}}{K_{22}} \quad (16)$$

$$K'_{11} = \left(\frac{\Delta C_1}{\Delta M_1} \right)_{C_2} = \frac{K_{22} \cdot K_{11}}{K_{22}} + K_{12} \cdot \frac{-K_{21}}{K_{22}} = \frac{K_{22} \cdot K_{11} + K_{12} \cdot -K_{21}}{K_{22}} \quad (17)$$

Calcula-se " K'_{12} ", que é o ganho em malha fechada mantendo " C_2 " constante:

$$K'_{12} = \frac{\Delta C_1}{\Delta M_2} \Big|_{C_2} \quad (18)$$

Substitui-se na equação 4, " ΔC_2 "=0:

$$0 = K_{21} \cdot \Delta M_1 + K_{22} \cdot \Delta M_2 \quad (19)$$

$$-K_{21} \cdot \Delta M_1 = K_{22} \cdot \Delta M_2 \quad (20)$$

$$K_{21} \cdot \Delta M_1 = -K_{22} \cdot \Delta M_2 \quad (21)$$

$$\Delta M_1 = \frac{-K_{22}}{K_{21}} \cdot \Delta M_2 \quad (22)$$

Substitui-se a equação 22 na equação 3,

$$\Delta C_1 = K_{11} \cdot \frac{-K_{22}}{K_{21}} \cdot \Delta M_2 + K_{12} \cdot \Delta M_2 \quad (23)$$

Colocando " ΔM_2 " em evidência,

$$\Delta C_1 = \Delta M_2 \left(K_{11} \cdot \frac{-K_{22}}{K_{21}} + K_{12} \right) \quad (24)$$

Então,

$$\frac{\Delta C_1}{\Delta M_2} = K_{11} \cdot \frac{-K_{22}}{K_{21}} + K_{12} \quad (25)$$

Portanto " K'_{12} ", que é o ganho em malha fechada mantendo " C_2 " constante é:

$$K'_{12} = \left(\frac{\Delta C_1}{\Delta M_2} \right)_{C_2} = K_{11} \cdot \frac{-K_{22}}{K_{21}} + K_{12} = \frac{K_{11} \cdot -K_{22} + K_{21} \cdot K_{12}}{K_{21}} \quad (26)$$

$$K'_{12} = \frac{-1}{-1} \cdot \frac{K_{11} \cdot -K_{22} + K_{21} \cdot K_{12}}{K_{21}} = \frac{K_{11} \cdot K_{22} - K_{21} \cdot K_{12}}{-K_{21}} \quad (27)$$

Calcula-se " K'_{21} ", que é o ganho em malha fechada mantendo " C_1 " constante:

$$K'_{21} = \left. \frac{\Delta C_2}{\Delta M_1} \right|_{C_1} \quad (28)$$

Substitui-se na equação 3, " ΔC_1 "=0:

$$0 = K_{11} \cdot \Delta M_1 + K_{12} \cdot \Delta M_2 \quad (29)$$

$$-K_{12} \cdot \Delta M_2 = K_{11} \cdot \Delta M_1 \quad (30)$$

$$K_{12} \cdot \Delta M_2 = -K_{11} \cdot \Delta M_1 \quad (31)$$

$$\Delta M_2 = \frac{-K_{11}}{K_{12}} \cdot \Delta M_1 \quad (32)$$

Substitui-se a equação 32 na equação 4,

$$\Delta C_2 = K_{21} \cdot \Delta M_1 + K_{22} \cdot \frac{-K_{11}}{K_{12}} \cdot \Delta M_1 \quad (33)$$

Colocando " ΔM_1 " em evidência,

$$\Delta C_2 = \Delta M_1 \left(K_{21} + K_{22} \cdot \frac{-K_{11}}{K_{12}} \right) \quad (34)$$

Então,

$$\frac{\Delta C_2}{\Delta M_1} = K_{21} + K_{22} \cdot \frac{-K_{11}}{K_{12}} \quad (35)$$

Portanto " K'_{21} ", que é o ganho em malha fechada mantendo " C_1 " constante:

$$K'_{21} = \left(\frac{\Delta C_2}{\Delta M_1} \right)_{C_1} = K_{21} + K_{22} \cdot \frac{-K_{11}}{K_{12}} = \frac{K_{12} \cdot K_{21} + K_{22} \cdot -K_{11}}{K_{12}} \quad (36)$$

$$K'_{21} = \frac{-1}{-1} \cdot \frac{K_{12} \cdot K_{21} + K_{22} \cdot -K_{11}}{K_{12}} = \frac{-K_{12} \cdot K_{21} + K_{22} \cdot K_{11}}{-K_{12}} \quad (37)$$

Para o calculo de " K'_{22} ", que é o ganho em malha fechada mantendo " C_1 " constante:

$$K'_{22} = \left. \frac{\Delta C_2}{\Delta M_2} \right|_{C_1} \quad (38)$$

Substitui-se na equação 3, " ΔC_1 "=0:

$$0 = K_{11} \cdot \Delta M_1 + K_{12} \cdot \Delta M_2 \quad (39)$$

$$-K_{11} \cdot \Delta M_1 = K_{12} \cdot \Delta M_2 \quad (40)$$

$$K_{11} \cdot \Delta M_1 = -K_{12} \cdot \Delta M_2 \quad (41)$$

$$\Delta M_1 = \frac{-K_{12}}{K_{11}} \cdot \Delta M_2 \quad (42)$$

Substitui-se a equação 42 na equação 4:

$$\Delta C_2 = K_{21} \cdot \frac{-K_{12}}{K_{11}} \cdot \Delta M_2 + K_{22} \cdot \Delta M_2 \quad (43)$$

Colocando " ΔM_2 " em evidência,

$$\Delta C_2 = \Delta M_2 \left(K_{21} \cdot \frac{-K_{12}}{K_{11}} + K_{22} \right) \quad (44)$$

Então,

$$\frac{\Delta C_2}{\Delta M_2} = K_{21} \cdot \frac{-K_{12}}{K_{11}} + K_{22} \quad (45)$$

Portanto " K'_{22} ", que é o ganho em malha fechada mantendo " C_1 " constante é:

$$K'_{22} = \left(\frac{\Delta C_2}{\Delta M_2} \right)_{C_1} = K_{21} \cdot \frac{-K_{12}}{K_{11}} + K_{22} \quad (46)$$

$$K'_{22} = \frac{K_{21} \cdot -K_{12} + K_{11} K_{22}}{K_{11}} \quad (47)$$

Agora que já foram calculados os “Ganhos Relacionais de Malha Aberta”, equações: 5; 6; 7; 8 e também os “Ganhos Relacionais de Malha Fechada”, equações: 17; 27; 37; 47, pode-se aplicá-las na equação 2 e obter os termos de Λ , ou seja, $\gamma_{11}, \gamma_{12}, \gamma_{21}, \gamma_{22}$:

Então substituindo 5 e 17 em 2 tem-se:

$$\gamma_{11} = \frac{K_{11}}{K'_{11}} = \frac{K_{11}}{\frac{K_{22} \cdot K_{11} + K_{12} \cdot (-K_{21})}{K_{22}}} = K_{11} \cdot \frac{K_{22}}{K_{22} \cdot K_{11} + K_{12} \cdot (-K_{21})} \quad (48)$$

$$\gamma_{11} = \frac{K_{11} \cdot K_{22}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \quad (49)$$

Substituindo 6 e 7 em 2 tem-se:

$$\gamma_{12} = \frac{K_{12}}{K'_{12}} = \frac{K_{12}}{\frac{K_{11} \cdot K_{22} - K_{21} \cdot K_{12}}{-K_{21}}} = K_{12} \cdot \frac{-K_{21}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{21} \cdot K_{12}} \quad (50)$$

$$\gamma_{12} = \frac{K_{12} \cdot (-K_{21})}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \quad (51)$$

Substituindo 7 e 37 em 2 tem-se:

$$\gamma_{21} = \frac{K_{21}}{K'_{21}} = \frac{K_{21}}{\frac{-K_{12} \cdot K_{21} + K_{22} \cdot K_{11}}{-K_{12}}} = K_{21} \cdot \frac{-K_{12}}{-K_{12} \cdot K_{21} + K_{22} \cdot K_{11}} \quad (52)$$

$$\gamma_{21} = \frac{K_{21} \cdot (-K_{12})}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \quad (53)$$

Substituindo 8 e 47 em 2 tem-se:

$$\gamma_{22} = \frac{K_{22}}{K'_{22}} = \frac{K_{22}}{\frac{K_{21} \cdot (-K_{12}) + K_{11} \cdot K_{22}}{K_{11}}} = K_{22} \cdot \frac{K_{11}}{K_{21} \cdot (-K_{12}) + K_{11} \cdot K_{22}} \quad (54)$$

$$\gamma_{22} = \frac{K_{22} \cdot K_{11}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \quad (55)$$

Substituindo as equações 49; 51; 53; 55 em 1, temos a Matriz RGA:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \frac{K_{11} \cdot K_{22}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} & \frac{K_{12} \cdot (-K_{21})}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \\ \frac{K_{21} \cdot (-K_{12})}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} & \frac{K_{22} \cdot K_{11}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \end{bmatrix} \quad (56)$$

Também se pode calcular a matriz RGA " Λ ", segundo Seborg et al. (2004),

utilizando o produto de Hadamard (elemento por elemento) entre a matriz "K" ($K_{11}, K_{12}, K_{21}, K_{22}$; equações 5; 6; 7; 8; ganhos em malha aberta), pela transposta da matriz inversa da matriz "K", conforme a equação 57.

$$\Lambda = [K] * [K^{-1}]^T \quad (57)$$

Em 58 tem-se a composição da matriz "K":

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad (58)$$

O Determinante da matriz "K" é:

$$\det(K) = \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{vmatrix} \quad (59)$$

$$\det(K) = K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21} \quad (60)$$

Pelo método direto, o inverso de uma matriz 2x2, inverte-se os elementos da diagonal principal e troca-se o sinal dos elementos da diagonal secundária, então se divide todos os elementos pelo determinante da matriz original, equação 60. Na equação 61 temos o descrito acima:

$$[K^{-1}] = \begin{bmatrix} \frac{K_{22}}{\det(K)} & \frac{-K_{12}}{\det(K)} \\ \frac{-K_{21}}{\det(K)} & \frac{K_{11}}{\det(K)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_{22}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} & \frac{-K_{12}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \\ \frac{-K_{21}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} & \frac{K_{11}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \end{bmatrix} \quad (61)$$

Para calcular a transposta matriz " K^{-1} ", troca-se linhas por coluna conforme a equação 62.

$$[K^{-1}]^T = \begin{bmatrix} \frac{K_{22}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} & \frac{-K_{21}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \\ \frac{-K_{12}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} & \frac{K_{11}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \end{bmatrix} \quad (62)$$

Então se pode substituir 58 e 62 em 57:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{K_{22}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} & \frac{-K_{21}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \\ \frac{-K_{12}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} & \frac{K_{11}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \end{bmatrix} \quad (63)$$

Obtendo cada elemento (produto de Hadamard) da matriz RGA:

$$\gamma_{11} = \frac{K_{11} \cdot K_{22}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \quad (64)$$

$$\gamma_{12} = \frac{K_{12} \cdot (-K_{21})}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \quad (65)$$

$$\gamma_{21} = \frac{K_{21} \cdot (-K_{12})}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \quad (66)$$

$$\gamma_{22} = \frac{K_{22} \cdot K_{11}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \quad (67)$$

Substituindo as equações 64; 65; 66; 67 em 1, temos a Matriz RGA:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \frac{K_{11} \cdot K_{22}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} & \frac{K_{12} \cdot (-K_{21})}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \\ \frac{K_{21} \cdot (-K_{12})}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} & \frac{K_{22} \cdot K_{11}}{K_{11} \cdot K_{22} - K_{12} \cdot K_{21}} \end{bmatrix} \quad (68)$$

Pode-se observar que pelos dois métodos obtêm-se a mesma matriz, equações 56 e 68.

Segundo Seborg et al. (2004), como a soma de cada linha ou coluna da matriz " Λ " é igual a 1, a partir de γ_{11} , poder-se-ia ter calculado os demais ganhos relativos da seguinte forma:

$$\gamma_{11} + \gamma_{12} = 1 \quad (69)$$

$$\gamma_{12} = 1 - \gamma_{11} \quad (70)$$

e,

$$\gamma_{11} + \gamma_{21} = 1 \quad (71)$$

$$\gamma_{21} = 1 - \gamma_{11} \quad (72)$$

Portanto,

$$\gamma_{11} = \gamma_{22} \quad (73)$$

$$\gamma_{21} = \gamma_{12} \quad (74)$$

Se γ_{11} for representado simplesmente como γ tem-se:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \gamma & 1 - \gamma \\ 1 - \gamma & \gamma \end{bmatrix} \quad (75)$$

Desta forma, para a determinação da RGA basta encontrar a matriz de ganhos em malha aberta do sistema (SEBORG et al., 2004, p.487).

A interpretação dos elementos da matriz pode ser observada na tabela 5.

Tabela 5 – Interpretação dos valores de γ .

Valor de λ_{ij}	Decisão
$\gamma_{ij} = 1$	É a variável manipulada perfeita para controlar.
$\gamma_{ij} = 0$	Não deve ser usada para controlar.
$0 < \gamma_{ij} < 1$	Haverá interação entre as malhas.
$\gamma_{ij} > 1$	Exigirá um esforço maior da variável manipulada, evitar parear se for muito elevado.
$\gamma_{ij} < 0$	Esse pareamento é indesejável, pode tornar o sistema instável em malha fechada. Portanto, essa configuração deve ser evitada.

Fonte: (SEBORG et al., 2004, p.488).

Portanto observando a tabela 5, chega-se a conclusão que é necessário um valor de γ_{ij} positivo e o mais próximo de 1 possível.

Para simplificar a identificação de qual par de variáveis utilizar, pode-se aplicar a visualização de 76.

$$\Lambda = \begin{matrix} & \begin{matrix} M_1 & M_2 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} \gamma_{ij} & \gamma_{ij} \\ \gamma_{ij} & \gamma_{ij} \end{bmatrix} & \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \end{matrix} \end{matrix} \quad (76)$$

Podemos extrair duas importantes propriedades da matriz RGA (SEBORG et al., 2004):

- É normalizada. A soma dos elementos de cada linha ou coluna é 1.
- É adimensional, já que representa um ganho entre duas grandezas de mesma natureza.

APÊNDICE C - BLOCOS DESACOPLADORES

Os acoplamentos cruzados ou interações, descritas a partir da figura 30 e 31 do Apêndice B, tem um efeito que atrapalha ou impede o controle do processo em questão.

Existe uma técnica que, matematicamente, se propõe a eliminar todas as interações existentes a cada instante, apenas entorno do *set-point* ou apenas nas variáveis com maiores interações (OGUNNAIKE & RAY, 1994).

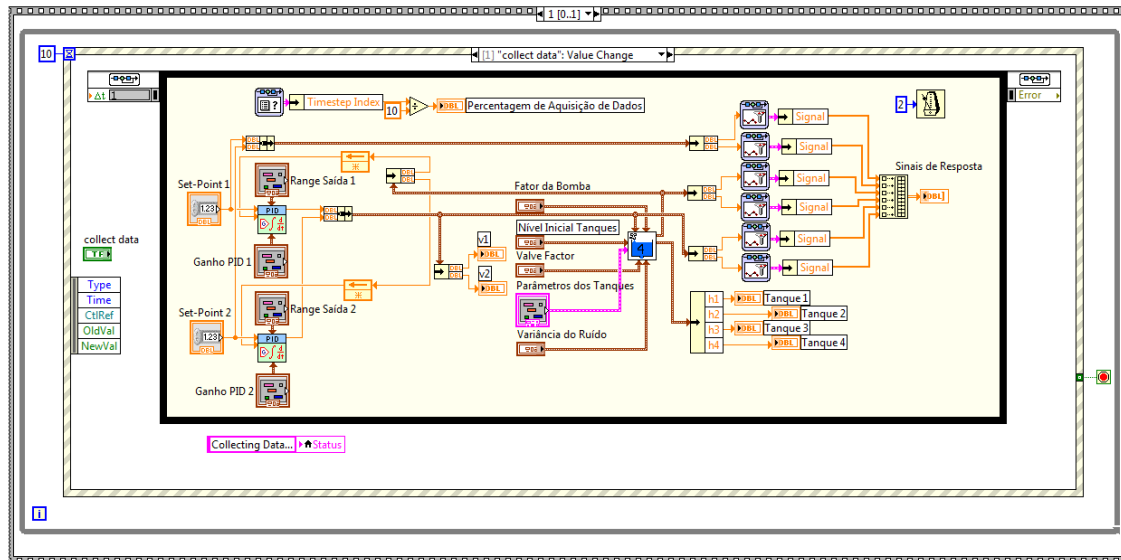
O objetivo da técnica é a de alterar, incluir ou eliminar blocos ou termos das funções de transferência do modelo matemático, para eliminar os efeitos das interações.

A técnica, em tese, seria capaz de eliminar as interações, porém na prática isso pode não ocorrer devido à necessidade de se conhecer o modelo matemático exato da planta.

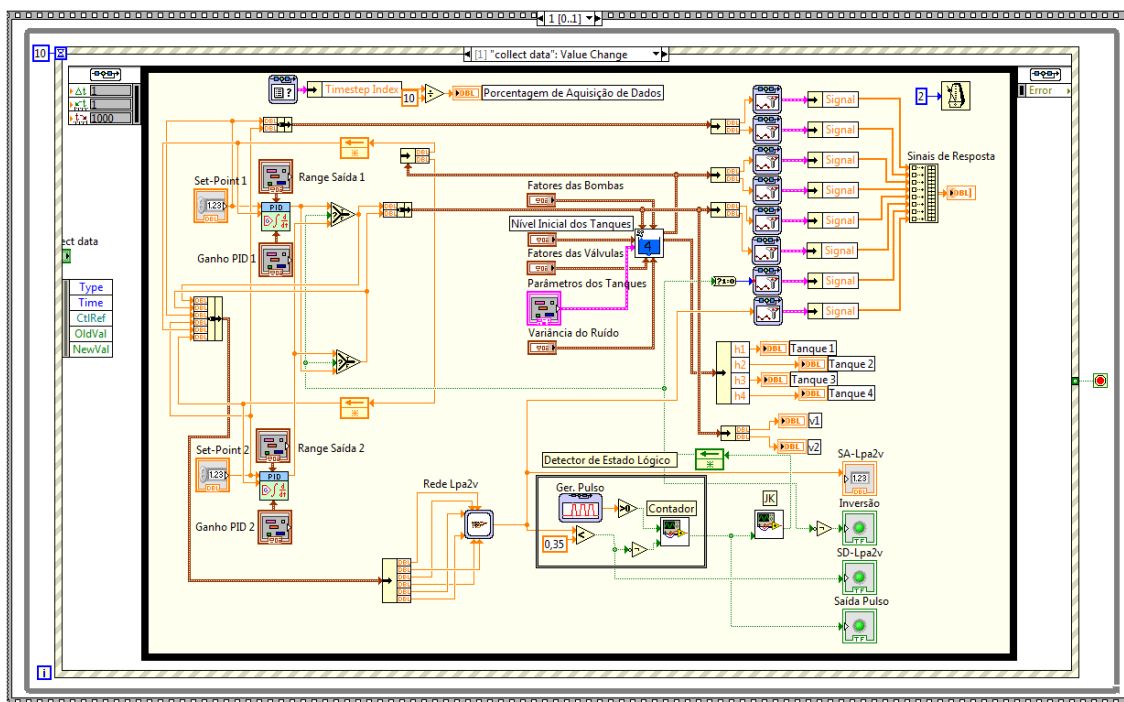
Esta técnica requer um esforço significativo na modelagem do processo, em seu ajuste e manutenção. Por este motivo, não é muito utilizada industrialmente.

APÊNDICE D – DESCRIÇÃO DOS BLOCOS E ESTRUTURAS NO LABVIEW

Temos abaixo o sistema de Johansson (2000) reproduzido no Labview.



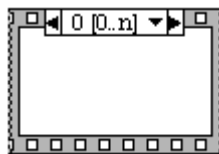
Sistema de Johansson (2000) reproduzido no Labview com a Rede de Restabelecimento.



Cada estrutura empregada neste trabalho será esplanada conforme “Help” do Labview.

STACKED SEQUENCE STRUCTURE (ESTRUTURA DE SEQUENCIA EMPILHADA)

A “Estrutura de Sequencia Empilhada” é usada para garantir um que subdiagrama seja executado antes ou após o outro subdiagrama.



WHILE LOOP (LAÇO ENQUANTO)

Repete o código dentro do seu subdiagrama até que uma condição específica ocorra. O “Laço Enquanto” sempre executa pelo menos uma vez.

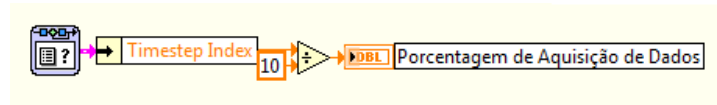
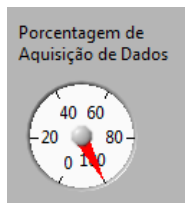


EVENT STRUCTURE (ESTRUTURA EVENTO)

Espera até que ocorra um evento, em seguida, executa o caso adequado para lidar com esse evento. A estrutura do evento tem um ou mais subdiagramas, ou casos de eventos, exatamente um dos quais corresponder com o evento. Esta estrutura pode expirar enquanto espera para a notificação de um evento. É amarrado um valor para o terminal “Timeout” no canto superior esquerdo da estrutura de Evento para especificar o número de milissegundos a estrutura do evento aguarda um evento. O padrão é -1, que indica para nunca expirar.



A estrutura abaixo é utilizada para indicar a porcentagem de aquisição da simulação.



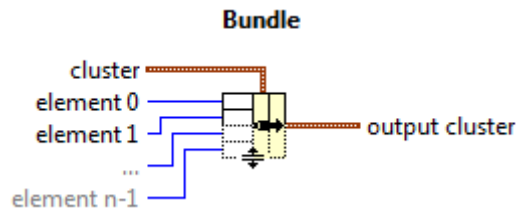
FEEDBACK NODE (NÓ DE REALIMENTAÇÃO)

Esta estrutura é utilizada, como o próprio nome diz, quando se deseja que parte do sinal de saída seja injetada na entrada do mesmo sistema.



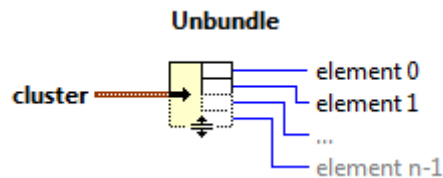
BUNDLE (PACOTE, AGRUPA)

A estrutura abaixo empacota os dados a fim de simplificar a visualização e análise.



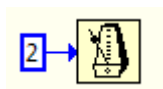
UNBUNDLE (DESEMPACOTA, DESAGRUPA)

A estrutura abaixo desempacota os dados a fim de simplificar a visualização e análise.



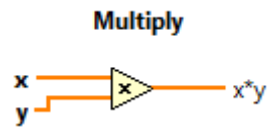
WAIT UNTIL NEXT MS MULTIPLE FUNCTION (ESPERAR ATÉ O PRÓXIMO MILISSEGUNDO MÚLTIPLO DA FUNÇÃO)

A estrutura abaixo executa a simulação a cada 2 milissegundos.



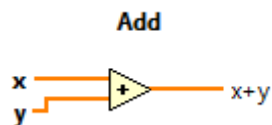
MULTIPLY FUNCTION (FUNÇÃO DE MULTIPLICAÇÃO)

Retorna o produto das entradas.

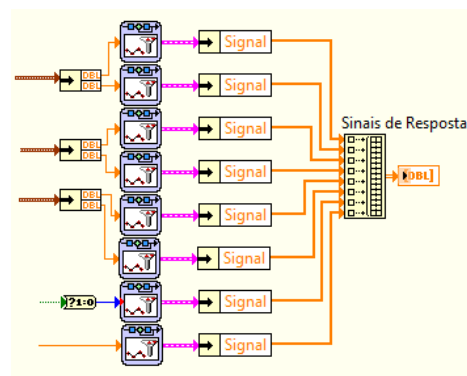


ADD FUNCTION (FUNÇÃO ADIÇÃO)

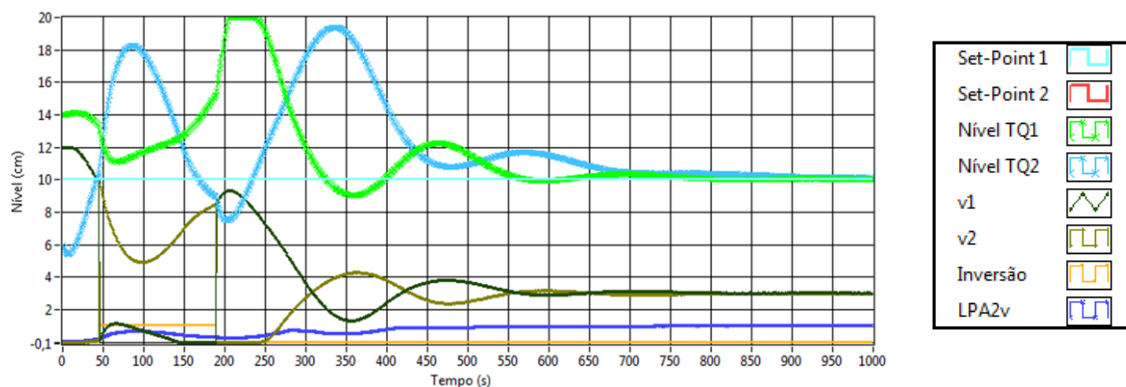
Calcula a soma das entradas.



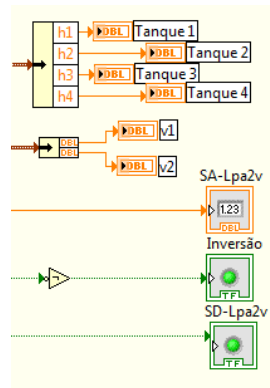
A estrutura abaixo direciona as variáveis para o gráfico (por exemplo: *Set-point 1*, *Set-point 2*, *Nível TQ1*, *Nível TQ2*, *v1*, *v2*, *Inversão* e *LPA2v*).



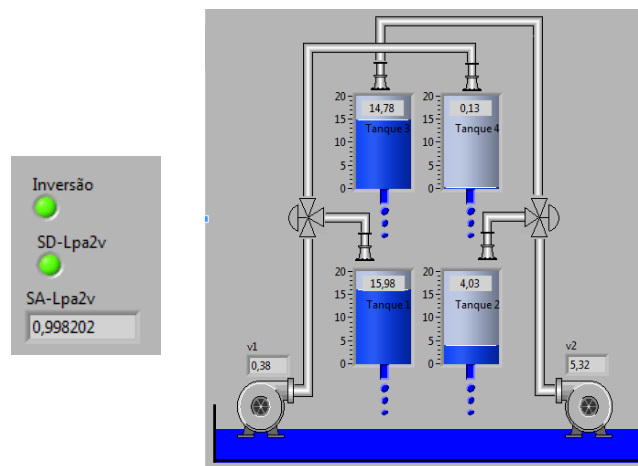
Temos abaixo o gráfico com as variáveis.



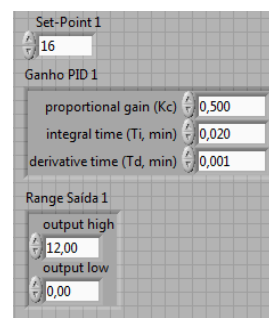
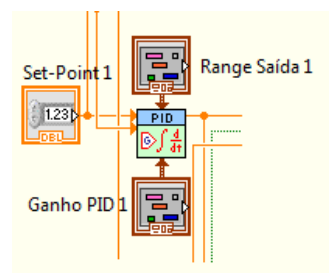
Abaixo temos as estruturas utilizadas para enviar os respectivos sinais para visualização e animação da planta.



Abaixo, visualização de sinais e animação da planta.

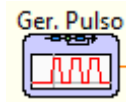


ESTRUTURA DO CONTROLADOR PID.

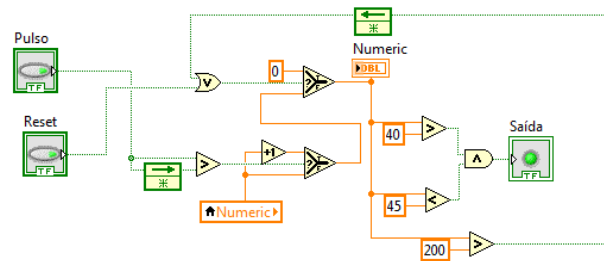
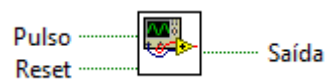


GERADOR DE PULSO DE 1HZ

Permite que se gere um pulso com amplitude e frequência configurável.



CONTADOR 45 SEGUNDOS



MAIOR DO QUE ZERO

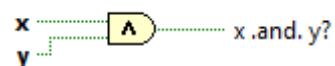
Retorna verdadeiro se $x > 0$ caso contrário retorna falso.



FUNÇÃO PORTA LÓGICA NÃO



FUNÇÃO PORTA LÓGICA E

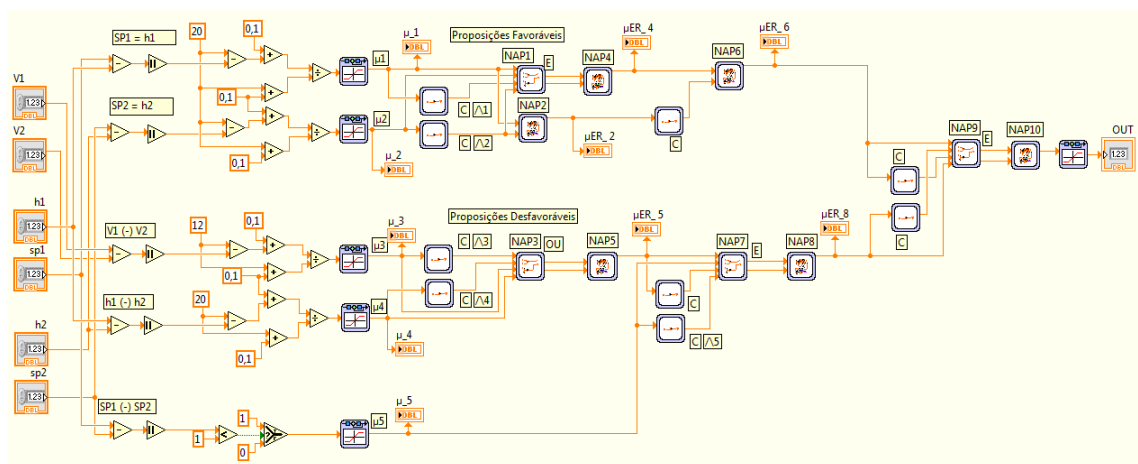
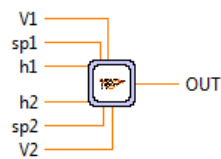


SELECT FUNCTION (FUNÇÃO DE SELEÇÃO).

Retorna o valor ligado à entrada de entrada de “t” ou “f”, de acordo com o valor de “s”. Se “s” for TRUE (VERDADEIRO), esta função retorna o valor ligado a “t”. Se “s” for FALSE (FALSO), esta função retorna o valor ligado a “f”.



REDE LPA2v.

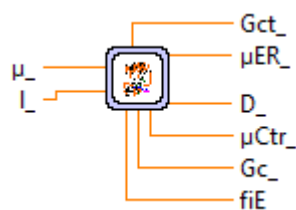


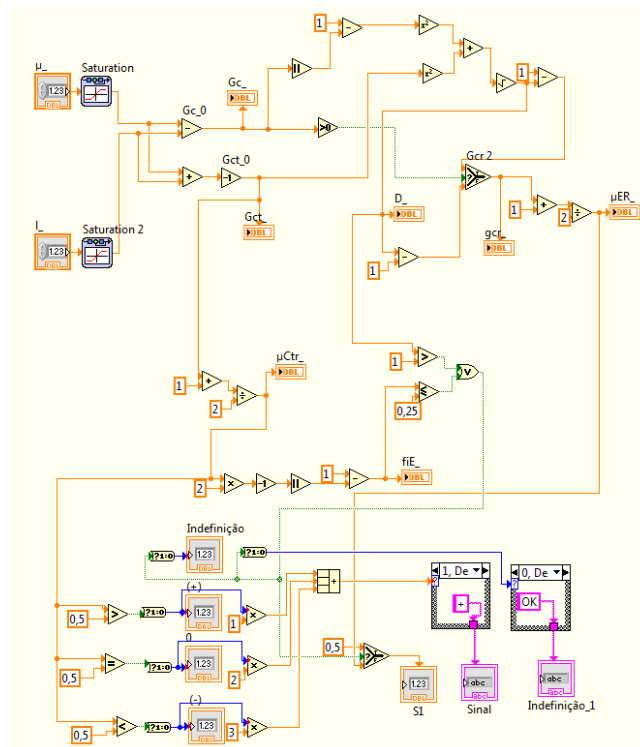
SATURATION FUNCTION (FUNÇÃO SATURAÇÃO).

Limita o intervalo válido de um sinal.

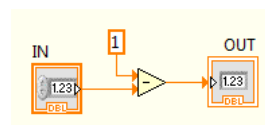


NAP – NÓ DE ANÁLISE PARACONSISTENTE

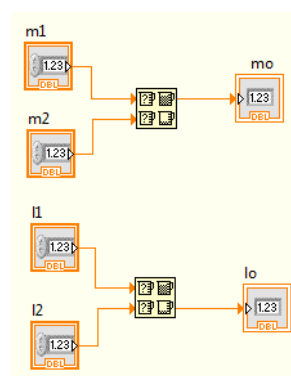
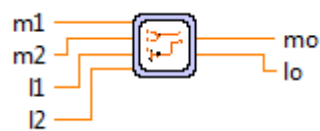




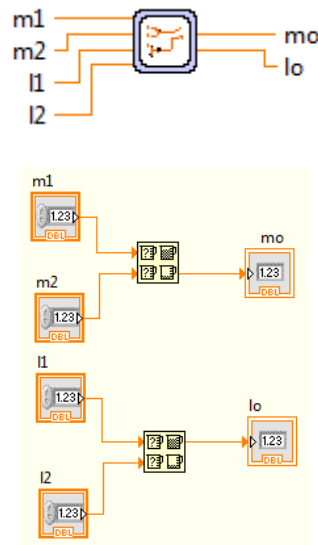
COMPLEMENTO “C”



NAP OU – LÓGICA OU PARACONSISTENTE

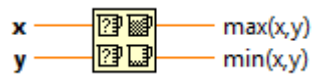


NAP E – LÓGICA E PARACONSISTENTE



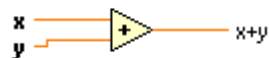
MÁXIMO & MÍNIMO

Compara x e y e retorna em $\max(x,y)$ o maior valor e em $\min(x,y)$ o menor valor.



ADD FUNCTION (FUNÇÃO ADIÇÃO).

Calcula a soma das entradas.



GREATER FUNCTION (FUNÇÃO MAIOR).

Retorna “Verdadeiro” se “ x ” é maior que “ y ”. Caso contrário, esta função retorna “Falso”.



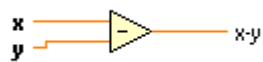
LESS FUNCTION (FUNÇÃO MENOR).

Retorna “Verdadeiro” se “x” é menor que “y”. Caso contrário, esta função retorna “Falso”.



SUBTRACT FUNCTION (FUNÇÃO SUBTRAIR).

Calcula a diferença entre as entradas

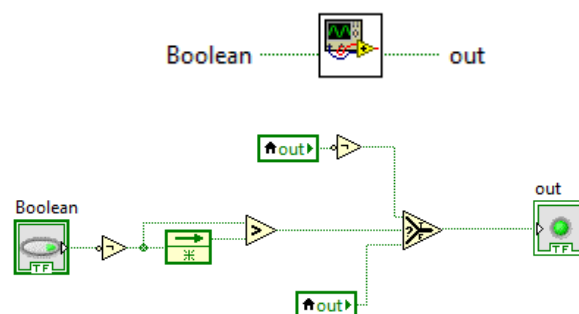


ABSOLUTE VALUE FUNCTION (FUNÇÃO VALOR ABSOLUTO)

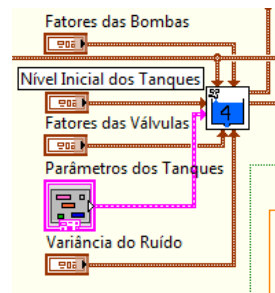
Retorna o valor absoluto da entrada.



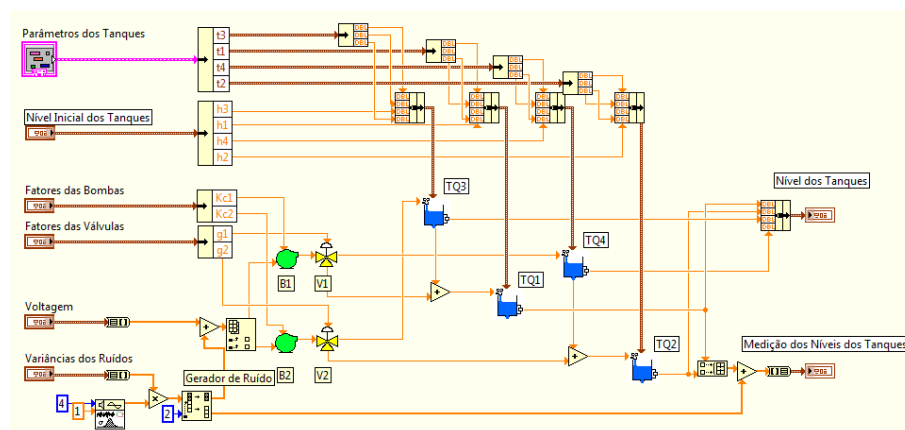
Flip-Flop JK Tipo “T”.



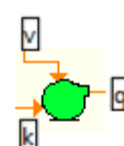
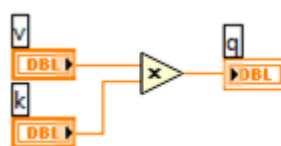
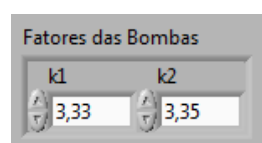
Abaixo temos o sistema de tanques em bloco.



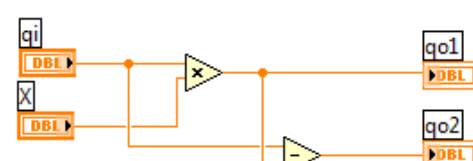
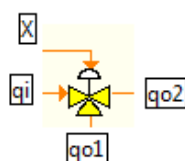
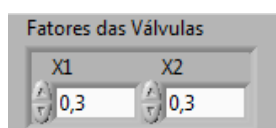
Abaixo temos o sistema de tanques explodido.



Abaixo temos a Bomba e sua respectiva equação.



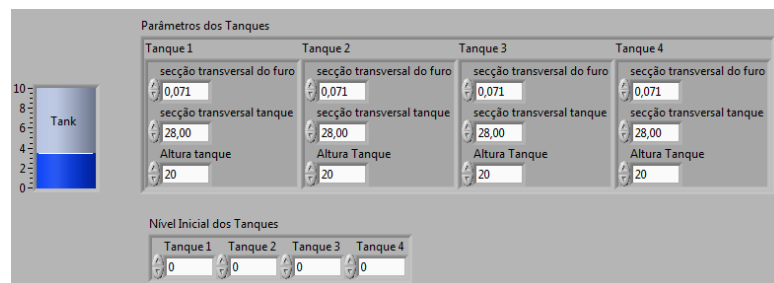
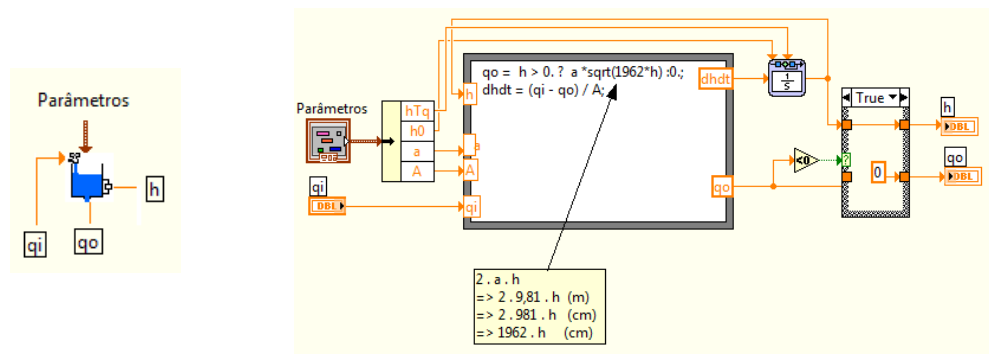
Abaixo temos a Válvula direcional e sua respectiva equação.



Abaixo temos a uma estrutura para geração de ruído que é inserido no sinal de acionamento das bombas e no sinal de medição dos níveis dos tanques 1 e 2.



Abaixo temos o tanque e sua respectiva equação.



APÊNDICE E - CONTROLE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

1. CARACTERÍSTICAS DE PROCESSOS

PROCESSOS DE FABRICAÇÃO CONTÍNUA E DESCONTÍNUA

Nos processos de fabricação contínua, o produto final é obtido sem interrupções, podendo-se inserir matéria prima a qualquer tempo.

Processos de fabricação descontínua o produto final é obtido após um determinado ciclo e quantidade, a matéria prima só poderá ser inserida após este ciclo (GROOVER, 2011).

PROCESSOS MONOVARIÁVEIS E MULTIVARIÁVEIS

Os processos monovariáveis possuem apenas uma variável manipulada influenciando na variável controlada.

Em processos multivariáveis a manipulação de uma variável influencia em mais de uma variável controlada (OGATA, 1970).

PROCESSOS ESTÁVEIS E INSTÁVEIS

Um processo é considerado estável quando está estabilizado e após um degrau, ou seja, uma mudança no seu patamar ou *set-point*, este se estabiliza novamente após um determinado período.

Processos instáveis são assim denominados quando estão estáveis e um degrau é aplicado e este não é capaz de se estabilizar (COELHO, 2015).

TEMPO MORTO OU RETARDO DE TRANSPORTE

É considerado tempo morto o tempo entre a variação na entrada de um sistema e a sua detecção na saída (COELHO, 2015).

CAPACITÂNCIA

A capacitância C de um reservatório é definida como a variação na quantidade de líquido armazenado necessário para causar uma mudança unitária no potencial (altura). O potencial é a grandeza que indica o nível de energia do sistema (OGATA 2010).

RESISTÊNCIA

Segundo Ogata (2010), considerando o fluxo de uma tubulação curta que conecta dois tanques, a resistência R ao fluxo de líquido nessa tubulação ou restrição é definida como a variação na diferença de nível (a diferença de nível de líquido nesses dois tanques) que seria necessária para causar uma variação unitária na vazão.

2. TIPOS DE CONTROLE

CONTROLE MANUAL E CONTROLE AUTOMÁTICO

Um controle é manual quando um operador é quem está efetuando o controle através de sua observação e de sua ação manual.

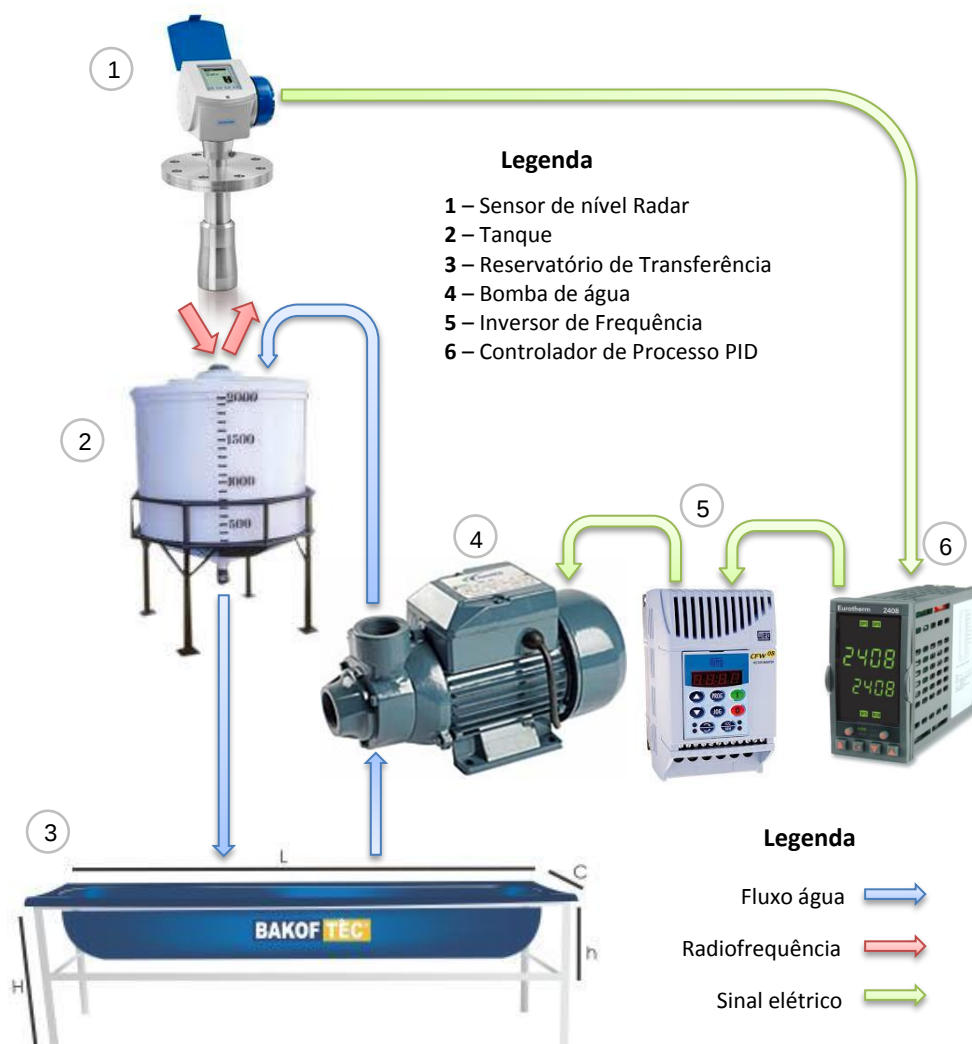
O controle automático de processo é responsável por grande parte da evolução que houve nas indústrias em geral, seja pelos ganhos de produtividade, por questões de segurança material e pessoal, por questões ambientais e militares.

A finalidade do controle automático de processos é manter uma determinada variável num certo valor pré-determinado, sem a interferência humana para isto.

Segundo Ogata (2010), cientistas e engenheiros ao dominarem as técnicas de controle automático, de teoria e prática, dispõem de meios para atingir-se desempenho ótimo de sistemas dinâmicos, bem como melhoria na qualidade e diminuição o custo de produção, aumento da taxa de produção, operações manuais repetitivas, etc.

Um controle automático, figura abaixo, funciona basicamente medindo o valor de uma determinada variável (que deseja-se controlar, no caso o nível) através de um sensor (“1 - sonda de nível radar”), compara-se este valor medido com o valor que deseja-se (valor pré-ajustado ou *set-point*), utiliza-se a diferença entre o sinal medido e o sinal desejado para obter-se o desvio. Utiliza-se o valor do desvio para obter um sinal de correção (realizados no “6 - controlador de processo”), aplica-se o sinal de correção no elemento final de controle (“4 - bomba de água” através do “5 - inversor de frequência”) no sentido de se eliminar ou reduzir o desvio.

Os controladores de processo (6 – figura abaixo) são os instrumentos utilizados para automatizar o controle de processos industriais e podem ser: eletrônicos discretos, computadorizados ou microprocessados, mecânicos, hidráulicos e pneumáticos.



Exemplificação de um controle de nível com todos os seus componentes.

Fonte: Próprio autor.

CONTROLE AUTO-OPERADO

Um controle é considerado auto-operado quando toda a energia necessária para movimentar a sua parte operacional pode ser obtida diretamente, através da região de detecção, do sistema controlado (OLIVEIRA, 1999).

CONTROLE EM MALHA ABERTA E MALHA FECHADA

Segundo Ogata (2010), sistemas de controle de malha aberta são aqueles em que o sinal de saída não interfere na ação de controle do sistema.

Ainda segundo Ogata (2010), um sistema de controle em malha fechada seria como uma variação de um sistema de controle com realimentação, que estabeleceria uma relação de comparação entre a saída e a entrada, obtendo-se o erro e utilizando-o para a correção.

3. AÇÕES DE CONTROLE

MODOS DE ACIONAMENTO (AÇÃO DIRETA OU REVERSA)

O modo de acionamento diz respeito à saída do controlador. Se com um aumento ou diminuição da variável controlada o sinal de saída do controlador se comportar da mesma forma, tem-se a ação direta. Por outro lado se a saída do controlador se comportar de forma contrária tem-se ação reversa (OLIVEIRA, 1999).

AÇÃO DE CONTROLE LIGA-DESLIGA

Neste tipo de ação a saída do controlador possui apenas duas posições: todo o sinal ou sem sinal, ligado ou desligado, contato aberto ou fechado. Esta ação provoca oscilações no processo (OGATA, 2010).

AÇÃO PROPORCIONAL

Na ação proporcional o sinal de correção, ou seja, a saída do controlador varia proporcionalmente em relação ao erro ou desvio. Tem uma ação imediata, elimina as oscilações mais deixa uma diferença entre variável do processo e o desejado (OLIVEIRA, 1999).

AÇÃO INTEGRAL

A ação integral vai atuar ao longo do tempo enquanto existir diferença entre a variável do processo e o desejado no sentido de eliminar esta diferença. Elimina o erro mais sua ação é lenta (OLIVEIRA, 1999).

AÇÃO DERIVATIVA

A ação derivativa tem um efeito antecipatório ao erro ou desvio, ou seja, somente a partir da velocidade do desvio apresenta um sinal de saída no sentido de não deixar que este desvio aumente. Devido a sua característica de atuar na velocidade do desvio, não deve ser utilizada sozinha por causar instabilidade ao processo (OLIVEIRA, 1999).

AÇÃO PID (PROPORCIONAL, INTEGRAL, DERIVATIVO)

Os controladores PID (proporcional, integral, derivativo) são utilizados em mais da metade dos sistemas de controle industriais. O controlador PID possui três parâmetros para ajustes ou para a sua sintonia com o processo: ganho proporcional, tempo integral e tempo derivativo. O desempenho do controlador PID depende da magnitude relativa destes três parâmetros (OGATA, 2010). A figura abaixo ilustra um controlador PID aplicado a uma planta.

A função de transferência do controlador PID (OGATA, 2010).

$$C_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

$C_c(s)$ = Saída do controlador

K_p = Ganho proporcional do controlador

$T_i s$ = Tempo integral do controlador

$T_d s$ = Tempo derivativo do controlador

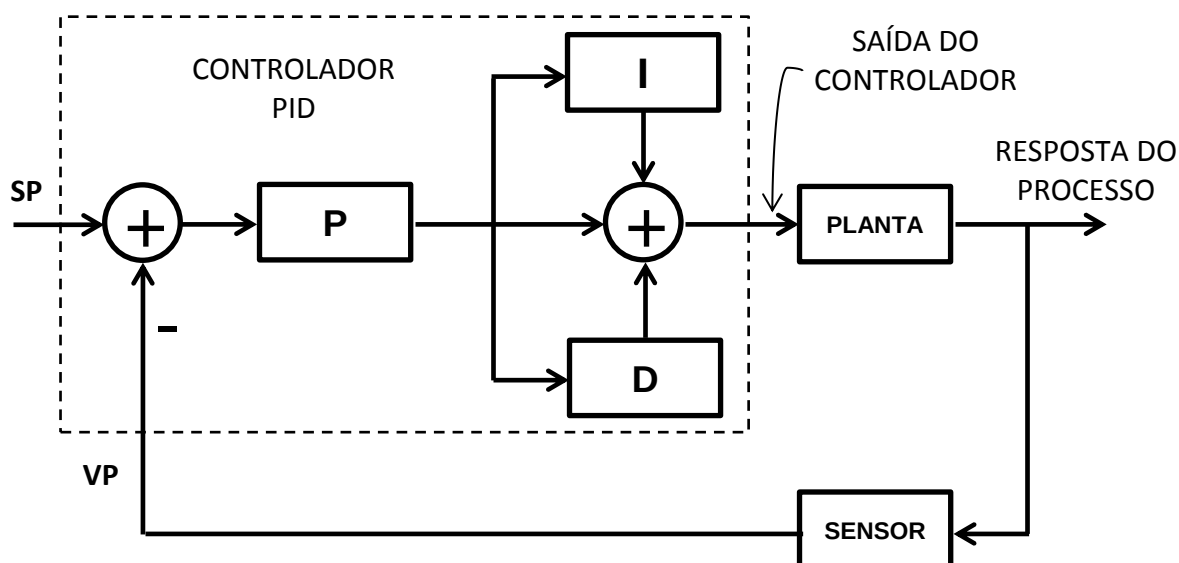


Figura 32 - Controlador PID interligado a uma planta.

4. SENSORES

Os sensores são utilizados para medir determinada grandeza podendo convertê-la em outra mais adequada, conforme o seu tipo (OGATA, 2010). No caso da instrumentação a grandeza de saída mais utilizada é a elétrica. A informação adquirida pode servir para monitoramento, controle de processos ou mesmo proteção.

Alguns exemplos de sensores: sensores de radar, termoeletrônicos, sensor de contato, sensor capacitivo, sensor indutivo, sensor resistivo, sensores fotoelétricos, sensor magnético, sensor de corrente, sensores ultrassônicos, etc.

5. ELEMENTO FINAL DE CONTROLE

O elemento final de controle é o instrumento responsável por interferir na variável medida, por intermédio da variável manipulada, baseado no resultado do cálculo realizado pelo controlador.

Podem ser duas, a atuação do elemento final de controle: normal aberta e normal fechada.

Na atuação normal aberta, quando não há sinal de controle (vindo do controlador), o elemento final de controle permanece aberto, não interferindo, permitindo a livre “passagem” da variável manipulada.

Na atuação normal fechada, quando não há sinal de controle (vindo do controlador), o elemento final de controle permanece fechado, interferindo,

bloqueando a “passagem” da variável manipulada.

O elemento final de controle pode ser proporcional ou liga-desliga. No comportamento proporcional a interferência possui uma proporcionalidade com o sinal de controle e em alguns casos há a necessidade de linearização do sinal para a obtenção deste comportamento. No comportamento liga-desliga, ao receber um determinado nível de sinal do controlador, o elemento final de controle interfere totalmente (interrompe) ou não interfere na variável manipulada, dependendo se é normal aberta ou fechada. Podem ser bombas, válvulas solenoides, posicionadores, inversores de frequência, resistências elétricas, motores, variadores de velocidade, válvulas proporcionais de controle, módulos de potencia, relés, etc. (GONÇALVES, 2003).

Os elementos finais de controle podem ser acionados por meios elétricos, pneumáticos e mecânicos, hidráulicos.