

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

SÉRGIO LUIZ DA CONCEIÇÃO MATOS

**REDE DE ANÁLISE PARACONSISTENTE APLICADA EM MALHA DE
CONTROLE DE RAZÃO PARA UM PROCESSO INDUSTRIAL**

SANTOS/SP

2018

SÉRGIO LUIZ DA CONCEIÇÃO MATOS

**REDE DE ANÁLISE PARACONSISTENTE APLICADA EM MALHA DE
CONTROLE DE RAZÃO PARA UM PROCESSO INDUSTRIAL**

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. João Inácio da Silva Filho.

SANTOS/SP

2018

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

511.31 MATOS, Sérgio Luiz da Conceição
M382r Rede de Análise Paraconsistente Aplicada em malha de
Controle de Razão para um processo industrial/Sérgio Luiz da
Conceição Matos, 2018.
133 p. il.

Orientador: João Inácio da Silva Filho.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos,
SP, 2018.

1. Controle de Razão 2. Processo Multivariável 3. Lógica
Paraconsistente 4. Rede de Análise Paraconsistente 5. Tratamento de
incertezas. Da Silva Filho, João Inácio. Orientador I. Rede de Análise
Paraconsistente Aplicada em malha de Controle de Razão para um processo
industrial.

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Laurindo Vieira (in
Memoriam) e Maria do Carmo.
À minha esposa Matilde Feitoza Matos
pelo apoio e incentivo.*

AGRADECIMENTOS

Nesta oportunidade importante da minha vida profissional, desejo expressar os meus sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. João Inácio da Silva Filho pela sua amizade, apoio e ajuda tão necessária ao desenvolvimento e realização deste trabalho.

À Prof.^a. Me. Dorotéia Vilanova Garcia pelos ensinamentos de programação em MATLAB®, apoio e ajuda nas dificuldades no desenvolvimento deste trabalho.

Quero expressar minha especial gratidão aos professores e secretaria do curso pós-graduação da UNISANTA – Universidade Santa Cecília.

Prof. Dr. Felipe Bertelli

Prof. Dr. Marcos Tadeu Tavares Pacheco

Prof.^a. Dra. Marlene Silva Moraes

Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior

Prof.^a. Dra. Maria Cristina Pereira Matos

Prof. Dr. Cláudio Rodrigues Torres

Secretária Sandra Helena Aparecida de Araújo

Secretária Imaculada Scorza

que durante o programa para obtenção de créditos, contribuíram como seus devidos conhecimentos, disponibilizando-me condições para a realização desta pesquisa.

Aos colegas do mestrado e professores do SENAI-SP em especial Tertuliano Paulo da Silva (in memoriam) e Cláudio Luís Magalhães, amigos que proporcionaram inestimáveis ajuda técnica e o incentivo tão indispensável para a realização desta pesquisa.

E finalmente agradeço a DEUS e seu filho Jesus Cristo, pois sem eles nada é possível.

RESUMO

Nesta dissertação são apresentados os resultados da aplicação da Rede de Análise Paraconsistente (RAP) na estratégia de controle Razão e seguidor de Variável de Processo (PV) através da telemetria digital entre um *OPC CLIENT* com leitura *tool box Simulink* Matlab (leitura de dados do processo) com uma planta piloto de processo (transmissores de vazão e nível). Foram utilizados algoritmos da Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPA2v) como fonte de informação dos parâmetros dinâmicos Proporcional e Integral (PI) no desenvolvimento do sistema de controle de razão vazão e nível na plataforma *Simulink* Matlab. Os algoritmos da LPA2v recebem os sinais provenientes da telemetria digital *OPC CLIENT tool box* e fazem o tratamento lógico paraconsistente nos dados para serem enviados à comunicação *OPC CLIENT* escrita *tool box* (escrita de dados) que atuam no elemento final de controle (inversores de frequência). Para comprovação do controle foi realizada a comparação dos valores de sintonia dinâmica (ganho proporcional e integral), obtidos com a técnica LPA2v e parâmetros estáticos (PI) calculados pelo método Modelo Interno de Controle (IMC). Os resultados estão demonstrados por cálculos e gráficos onde as respostas de controle em função da saída PI(s) revelaram que para pequenas variações de distúrbio na demanda e *Set point* a sintonia dinâmica atribuída ao projeto da estratégia controle de razão entre duas variáveis obteve melhor resultado no controle da variação $\pm 5\%$ da PV se comparado ao método *IMC* em função das constantes de tempo do processo e tempo morto dos sensores utilizados em medição de vazão e nível.

Palavras-Chave: Controle de Razão. Processo Multivariável. Lógica Paraconsistente. Lógica Paraconsistente Anotada. Tratamento de Incertezas.

ABSTRACT

In this dissertation the results of the application of the Paraconsistent Analysis Network (PANnet) in the control strategy and process variable follower (PV) are presented through digital telemetry between a CLIENT OPC with a reading tool box Simulink Matlab (process data reading) with a process pilot plant (flow and level transmitters). Paraconsistent Annotated Logic algorithms with annotation of two values register (PAL2v) were used as source of information of dynamic parameters Proportional and Integral (PI) in the development of flow rate control system and level in the Simulink Matlab platform. The algorithms of the PAL2v receive the signals from the digital telemetry OPC CLIENT tool box and make the logical processing paraconsistent in the data to be sent to OPC communication CLIENT written tool box that act on the final control element (frequency inverters). To verify the control, the values of dynamic tuning (proportional and integral gain) obtained with the PAL2v technique and static parameters (PI) calculated by the Internal Control Model (IMC) method were compared. The results are demonstrated by calculations and graphs where the control responses as a function of the PI (s) output revealed that for small variations in demand and set point the dynamic tuning attributed to the design of the ratio control strategy between two variables obtained better result in the control of the variation $\pm 5\%$ of the PV when compared to the IMC method as a function of the process time constants and dead time of the sensors used in flow and level measurement.

Keyword: Flow Rate Control. Multivariable Process. Paraconsistent Logic. Paraconsistent Analysis Network. Uncertainty Treatment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Representação da medição de vazão pelo transmissor de pressão diferencial (PDT) em relação à equação de Bernoulli.	20
Figura 02 - Representação da medição de vazão pelo PDT (FIT 101) com relação à equação de Bernoulli, TQ101.....	24
Figura 03 - Representação da medição de vazão pelo PDT (FIT 102) transmissor de pressão diferencial com relação à equação de Bernoulli, TQ102.	25
Figura 04 - Representação da medição de nível pelo transmissor de pressão diferencial (PDT) LIT 101 em relação ao TQ101.....	27
Figura 05 - Reticulado associado à lógica paraconsistente anotada de anotação com dois valores LPA2v.....	29
Figura 06 - Representação da análise paraconsistente LPA2v.....	30
Figura 07 - Grau de evidência no quadrado unitário do plano artesiano.	30
Figura 08 - Reticulado associado à LPA2v com valores.	31
Figura 09 - Representação horizontal do grau de contradição Gct.	32
Figura 10 - Representação do grau de certeza Gc.	33
Figura 11 - Ponto de interpolação (Gc, Gct) e distância D.	33
Figura 12 - Grau de certeza de valor resultante real.	34
Figura 13 - Grau de Certeza de valor real Gcr no reticulado da LPA2v quando Gc é negativo e Gct positivo.	34
Figura 14 - Representação em bloco de um NAP- nó de análise paraconsistente. ...	36
Figura 15 - Representação simbólica de um NAP- nó de análise paraconsistente. ...	36
Figura 16 - Equivalência grau de certeza real Gcr e o grau de evidência resultante real (μ_{ER}).....	37
Figura 17 - Conversão do grau de contradição Gct em grau de contradição normalizado μ_{ctr}	38
Figura 18 - Representação do algoritmo de análise paraconsistente da LPA2v com cálculo do grau de evidência resultante e intervalo de evidência.	39
Figura 19 - Algoritmo de análise paraconsistente para determinação do Grau de Certeza real e do Intervalo de Certeza.....	40
Figura 20 - Representação do PID(s) contínuo <i>Matlab Simulink</i>	42
Figura 21 - Representação da estrutura interna do PID(s) contínuo <i>Matlab Simulink</i>	43
Figura 22 - Representação da estrutura interna do PID(s) contínuo <i>Matlab Simulink</i> filtro N – derivativo.....	44
Figura 23 - Representação da estrutura interna do PID(s) ideal contínuo <i>Matlab Simulink</i>	44
Figura 24 - Representação da estrutura interna do PID(s) paralelo contínuo <i>Matlab Simulink</i>	45
Figura 25 - Representação da estratégia de controle razão e seguidor de PV com PI(s).....	46
Figura 26 - Representação da arquitetura OPC tool box.	49
Figura 27 - Representação da arquitetura e configuração OPC tool box cliente.....	50
Figura 28 - Representação da configuração OPC <i>tool box</i> leitura da variável a ser monitorada em tempo real.	51
Figura 29 - Representação da configuração OPC tool box escrita da variável a ser monitorada em tempo real.	52
Figura 30 - Visual geral da planta piloto de processo industrial.	53

Figura 31 - Representação da medição de nível pelo PDT (LIT 102) transmissor de pressão diferencial com relação ao TQ102.	54
Figura 32 - Estratégia de controle razão e seguidor de variável de processo.	55
Figura 33 - Representação da configuração <i>OPC CLIENT tool box Matlab</i> com <i>OPC SERVER</i> CD 600 SMAR.	56
Figura 34 - Representação da configuração <i>OPC CLIENT tool box Matlab</i> com <i>OPC SERVER</i> CD 600 SMAR para medição de vazão FIT-101.	57
Figura 35 - Representação da configuração <i>OPC CLIENT tool box Matlab</i> com <i>OPC SERVER</i> CD 600 SMAR para medição de vazão FIT-102.	58
Figura 36 - Fluxograma e telemetria do <i>OPC CLIENT tool box Matlab Simulink</i> em medição de nível LIT-101.	60
Figura 37 - Representação da configuração <i>OPC CLIENT leitura tool box Matlab</i> com <i>OPC SERVER</i> CD600 SMAR para medição de nível LIT-101.	61
Figura 38 - Fluxograma e telemetria do <i>OPC CLIENT leitura tool box Matlab Simulink</i> em medição de nível com LIT-102.	61
Figura 39 - Representação da configuração <i>OPC CLIENT tool box Matlab</i> com <i>OPC SERVER</i> CD 600 SMAR para medição de nível LIT-102.	62
Figura 40 - Fluxograma e telemetria do <i>OPC CLIENT escrita tool box Matlab Simulink</i> com <i>OPC SERVER</i> CD 600 SMAR FIC 101.	63
Figura 41 - Representação da configuração <i>OPC CLIENT escrita tool box Matlab</i> com <i>OPC SERVER</i> CD 600 SMAR FIC 101.	63
Figura 42 - Fluxograma e telemetria do <i>OPC CLIENT escrita tool box Matlab Simulink</i> com <i>OPC SERVER</i> CD 600 SMAR FIC-102.	64
Figura 43 - Representação da configuração <i>OPC CLIENT escrita tool box Matlab</i> com <i>OPC SERVER</i> CD 600 SMAR FIC-102.	65
Figura 44 - Subsistema <i>OPC CLIENT escrita tool box Matlab Simulink</i> com <i>OPC SERVER</i> CD 600 SMAR FIC-101, FIC-102 , telemetria FY-101 IF e FY-102 IF.	66
Figura 45 - Parametrização <i>OPC CLIENT escrita tool box Matlab Simulink</i> com <i>OPC SERVER</i> CD 600 SMAR PI.	66
Figura 46 - Parametrização <i>OPC CLIENT escrita tool box Matlab Simulink</i> com <i>OPC SERVER</i> CD 600 SMAR PI(s) FIC-102 e FY-102 IF.	67
Figura 47 - Gráfico <i>OPC CLIENT</i> leitura FIT-101 C(s) vazão TQ-101.	67
Figura 48 - Levantamento do tempo morto t FIT-101 C(s) <i>OPC CLIENT</i> com <i>OPC SERVER</i> CD600 SMAR.	69
Figura 49 - Levantamento da constante de tempo τ FIT-101 C(s) <i>OPC CLIENT</i> com <i>OPC SERVER</i> CD600 SMAR.	70
Figura 50 - Levantamento do tempo morto t FIT-102 J(s) <i>OPC CLIENT</i> com <i>OPC SERVER</i> CD600 SMAR.	70
Figura 51 - Levantamento da constante de tempo τ FIT-102 J(s) <i>OPC CLIENT</i> com <i>OPC SERVER</i> CD600 SMAR.	71
Figura 52 - SPL(s) e SPR(s) <i>Matlab Simulink</i> controle razão de vazão produto TQ-101 e 102.	73
Figura 53 - <i>OPC Matlab Simulink</i> paraconsistente em estratégia de controle razão PI(s) FIC-101 A(s) e FIC-102 G(s).	74
Figura 54 - Representação do bloco paraconsistente <i>Matlab Simulink OPC tool box</i>	75
Figura 55 - Rede de Análise Paraconsistente (RPA) PI(s) FIC-101 A(s) e FIC-102 G(s).	77

Figura 56 - Comunicação paraconsistente PI(s) FIC-101 A(s) e FIC-102 G(s) Matlab <i>Simulink OPC tool box</i> rede ethernet e 485 OPC SERVER CD600 SMAR.....	79
Figura 57 - Instalação do FIT-101 C(s).	80
Figura 58 - Instalação do FIT-102 J(s).	80
Figura 59 - Grau de evidência μ_1 , μ_3 em função da vazão FIT-101 e FIT-102.....	81
Figura 60 - . Instalação do LIT-101.	82
Figura 61 - Instalação do LIT-102.	82
Figura 62 - Grau de evidência μ_2 , μ_4 em função do nível LIT-101 e LIT-102.	83
Figura 63 - NAPRATECONTROL 1.....	84
Figura 64 - Comunicação HDA paraconsistente PI(s) FIC-101 A(s), FIC-102 G(S). .	85
Figura 65 - Grau de evidência desfavorável λ_4 SPL PI A(s).	87
Figura 66 - Gráfico grau de contradição normalizado μ_{ctr1} NAPRATECONTROL 1.	87
Figura 67 - Gráfico grau de evidência resultante real μ_{ER3} NAPRATECONTROL 3.	90
Figura 68 - Gráfico grau de evidência resultante real μ_{ER4} NAPRATECONTROL 4.	91
Figura 69 - Gráfico grau de contradição normalizado μ_{ctr4} NAPRATECONTROL 4.	92
Figura 70 - Gráfico grau de evidência resultante μ_{ER5} NAPRATECONTROL 5.	93
Figura 71 - Gráfico grau de contradição normalizado μ_{ctr5} NAPRATECONTROL 5.	93
Figura 72 - Levantamento da constante de tempo τ e tempo morto t LIT-101 E LIT- 102 OPC CLIENT com OPC SERVER CD600 SMAR.	95
Figura 73 - Curva de amortecimento posição hidrostática nível LIT-101 e LIT-102. .	98
Figura 74 - Gráfico λ_1 grau de evidência desfavorável LIT-101.....	98
Figura 75 - Gráfico λ_2 grau de evidência desfavorável LIT-102.....	99
Figura 76 - Grau de evidência desfavorável λ_5 SPR PI G(s).	99
Figura 77 - Gráfico ganho proporcional (P) PI(s) A(s) FIC-101.	102
Figura 78 - Gráfico ganho proporcional (P) PI(s) G(s) FIC-102.....	102
Figura 79 - Gráfico ganho integral (I) PI(s) A(s) FIC-101.	103
Figura 80 - Gráfico ganho integral (I) PI(s) G(s) FIC-102.	103
Figura 81 - Gráfico resposta PI(s) A(s) FIC-101.....	104
Figura 82 - Gráfico resposta (+/-5%) PI(s) A(s) FIC-101.....	104
Figura 83 - Gráfico resposta PI(s) G(s) FIC-102,	106
Figura 84 - Gráfico resposta (+/-5%) PI(s) G(s) FIC-102.....	106
Figura 85 - Ensaio 2 grau de evidência resultante μ_{ER4} NAPRATECONTROL 4 .	107
Figura 86 - Ensaio 2 grau de contradição normalizado μ_{ctr4} NAPRATECONTROL 4.	107
Figura 87 - Ensaio 2 grau de evidência resultante μ_{ER5} NAPRATECONTROL 5....	108
Figura 88 - Ensaio 2 grau de contradição normalizado μ_{ctr5} NAPRATECONTROL 5.	108
Figura 89 - Ensaio 2 gráfico P ganho proporcional PI(s) A(s) FIC-101.	109
Figura 90 - Ensaio 2 gráfico I ganho integral PI(s) A(s) FIC-101.....	109
Figura 91 - Ensaio 2 gráfico P ganho proporcional PI(s) G(s) FIC-102.	110
Figura 92 - Ensaio 2 gráfico I ganho integral PI(s) G(s) FIC-102.	110
Figura 93 - Ensaio 2 gráfico resposta PI(s) A(s) FIC-101.....	111
Figura 94 - Ensaio 2 gráfico resposta (+/-5%) PI(s) A(s) FIC-101.....	111
Figura 95 - Ensaio 2 gráfico resposta PI(s) G(s) FIC-102.	112
Figura 96 - Ensaio 2 gráfico resposta (+/-5%) PI(s) G(s) FIC-102.	112

Figura 097 - Parametrização método IMC PI(s) A(s) FIC-101.....	113
Figura 098 - Parametrização método IMC PI(s) G(s) FIC-102.	114
Figura 099 - Ensaio 3 gráfico resposta IMC (+/-5%) PI(s) A(s) FIC-101.	115
Figura 100 - Ensaio 3 gráfico resposta IMC (+/-5%) PI(s) G(s) FIC-102.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Linearização da Vazão Volumétrica em função do ΔP	24
Tabela 2 - HDA- Histórico do Banco de Dados OPC tool box Matlab Simulink SPL(s).	86
Tabela 3 - Histórico banco de dados <i>OPC tool box Matlab Simulink</i> μ_{ctr1} grau de contradição normalizado <i>NAPRATECONTROL 1</i>	88
Tabela 4- HDA- Histórico banco de dados OPC tool box Matlab Simulink μ_1 grau de evidência favorável FIT-101 C(s).	101
 Tabela A1 - Comportamento do μ_{ER1} grau de evidência do <i>NAPRATECONTROL 1</i>	121
Tabela A2 - Comportamento do μ_{ER2} grau de evidência do <i>NAPRATECONTROL 2</i>	122
Tabela A3 - Comportamento do μ_{ER3} grau de evidência do <i>NAPRATECONTROL 3</i>	123
Tabela A4 - Comportamento do μ_{ER4} grau de evidência do <i>NAPRATECONTROL 4</i>	124
Tabela A5 - Comportamento do μ_{ctr4} grau de evidência do <i>NAPRATECONTROL 4</i>	125
Tabela A6 - Comportamento do μ_{ER5} grau de evidência do <i>NAPRATECONTROL 5</i>	126
Tabela A7 - Comportamento do μ_{ctr5} grau de evidência do <i>NAPRATECONTROL 5</i>	127
Tabela A8 - Comportamento do λ_5 grau de evidência do <i>NAPRATECONTROL 5</i>	128
Tabela A9 - Comportamento do ϕ_{E4} grau de evidência do <i>NAPRATECONTROL 4</i>	129
Tabela A10 - Comportamento do ϕ_{E5} grau de evidência do <i>NAPRATECONTROL 5</i>	130

LISTA DE SIGLAS

CP	Controlador Programável.
CLP	Controlador Lógico Programável.
I	Integrador contínuo <i>Matlab Simulink OPC tool box</i> .
IMC	Modelamento Interno do Controlador.
LP	Lógica Paraconsistente.
LPA	Lógica Paraconsistente Anotada.
LPA2v	Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores.
NAP	Nó de Análise Paraconsistente.
NAPRATECONTROL	Bloco de controle <i>Matlab Simulink Paraconsistente OPC tool box</i> .
OPC	Ligação e incorporação de leitura, escrita de variáveis e objetos para controle de processo.
PID	Proporcional-Integral-Derivativo contínuo <i>Matlab Simulink OPC tool box</i> .
PI	Proporcional-Integral contínuo <i>Matlab Simulink OPC tool box</i> .
PD	Proporcional-Derivativa contínuo <i>Matlab Simulink OPC tool box</i> .
PDT	Transmissor de pressão diferencial.
PV	Variável de processo.
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído.
SPL	<i>Set point</i> local.
SPR	<i>Set point</i> remoto.
OPC HDA	Ligação e incorporação de leitura, escrita de variáveis e objetos para controle de processo, histórico e armazenamento de variáveis.

LISTA DE SÍMBOLOS

μ_1	Grau de crença ou grau de evidência favorável FIT-101
μ_2	Grau de descrença ou grau de evidência desfavorável LIT-101
μ_3	Grau de descrença ou grau de evidência desfavorável FIT-102
μ_4	Grau de descrença ou grau de evidência desfavorável LIT-102
μ	Grau de evidência favorável
λ	Grau de evidência desfavorável
T	Inconsistente
$\perp$	Paracompleto ou indeterminado
Gct	Grau de Contradição
Gc	Grau de Certeza
Gcr	Grau de Certeza Real
$\mathbb{R}$	Conjunto dos números reais
V	Verdadeiro
F	Falso
PT	Sentença proposicional Inconsistente
Pv	Sentença proposicional Verdadeira
PF	Sentença proposicional Falsa
$P\perp$	Sentença proposicional Indeterminada
φ	Intervalo de certeza
$\varphi(\pm)$	Intervalo de Certeza sinalizado
φE	Intervalo De Evidência Resultante
$\varphi E(\pm)$	Intervalo De Evidência Resultante Sinalizado
μ_{ctr}	Grau de Contradição Normalizado
μ_{ER}	Grau de Evidência Resultante Real
K	Ganho do Processo
τ	Constante de tempo do processo
t	Tempo morto do processo
$E(s)$	Erro (SP-PV) entrada PI (s) contínuo paralelo Matlab <i>Simulink</i> (A(s))
$B(s)$	Função de transferência planta processo A (vazão produto tanque A)
$C(s)$	Transmissor de vazão tanque A
$J(s)$	Transmissor de vazão tanque B
$F(s)$	Erro (SP-PV) entrada PI (s) contínuo paralelo Matlab <i>Simulink</i> (G(s))

$H(s)$	Função de transferência planta processo B (vazão produto tanque B)
$I(s)$	Valor da saída do controlador PI(s) contínuo paralelo Matlab <i>Simulink</i> A(s) vazão do produto tanque A no instante “t”
$y(s)$	Valor da saída do controlador PI(s) contínuo paralelo Matlab <i>Simulink</i> G(s) vazão do produto tanque B no instante “t”
P	Ganho proporcional do controlador
I	Ganho integral do controlador
D	Ganho derivativo do controlador ;
y_0	Valor inicial da saída do controlador
I_0	Valor inicial da saída do controlador
N	Coeficiente de Filtro derivativo
$mv(t)$	Valor da saída do controlador no instante “t”
$e(t)$	Erro do controlador
K_C	Ganho proporcional do controlador
K_d	Ganho derivativo
T_r	Tempo integral do controlador
T_d	Tempo derivativo do controlador
mv_0	Valor inicial da saída do controlador

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Justificativa.....	15
1.2 Relevância do tema.....	16
1.3 Objetivo do trabalho.....	16
1.4 Organização da dissertação	17
2. CONCEITOS DE MEDIÇÕES DE VAZÃO, NÍVEL E LÓGICA PARACONSISTENTE...	19
2.1 Medição de vazão.....	19
2.1.1 Linearização da vazão.....	23
2.1.2 Medição de nível	25
2.2 Lógica paraconsistente	27
2.2.1 Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de 2 valores-LPA2v	28
2.2.2 Representação no Quadrado Unitário do Plano Cartesiano (QUPC).....	30
2.2.3 O grau de contradição Gct.....	30
2.2.4 O grau de certeza Gc	32
2.2.5 Grau de Certeza de valor real Gcr.....	33
2.2.6 Nó de análise paraconsistente (NAP).....	35
2.2.7 Grau de evidência resultante real (μ_{ER})	36
2.2.8 Grau de contradição normalizado (μ_{ctr})	37
2.3 Nó de análise paraconsistente da LPA2v com saída de grau de evidência resultante real	38
3. SISTEMA DE CONTROLE MATLAB SIMULINK.....	41
3.1 Controle PI (s) <i>Matlab Simulink</i>	41
3.2 Controle de razão	46
3.3 OPC tool box e Matlab Simulink	48
3.4 OPC <i>tool box</i> e o Bloco <i>Simulink</i>	49
4 PLANTA PILOTO DE PROCESSO INDUSTRIAL	53
4.1 Controle de nível do vaso TQ-103	53
4.2 Controle de vazão do vaso TQ-101 e TQ-102	55
4.3 Levantamento da característica do processo vazão e nível TQ-101 e TQ-102	65
5. ESTRATÉGIA DE CONTROLE RAZÃO E SEGUIDOR DE PV PARACONSISTENTE DE VAZÃO EM PLANTA PILOTO TQ-101 E TQ-102	73
5.1 Bloco Paraconsistente Matlab Simulink OPC tool box	75
5.2 Algoritmo de análise paraconsistente da LPA2v com saída de grau de evidência resultante real μ_{ER} , $\phi E1$, μ_{ctr} , Gct com Matlab OPC tool box	76

5.3	Arquitetura do controlador paraconsistente <i>Matlab Simulink OPC tool box</i>	76
6	LINEARIZAÇÃO DOS SINAIS PARACONSISTENTES: <i>NAPRATECONTROL OPC TOOL BOX MATLAB SIMULINK</i>	80
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	95
7.1	ESTUDO COMPARATIVO DOS RESULTADOS COM MÉTODO DE SINTONIA MODELAGEM INTERNA DO CONTROLADOR (IMC)	113
8	CONCLUSÕES.....	117
	REFERÊNCIAS	119
	ANEXO I – Histórico de Banco de Dados (HDA) <i>OPC Tool Box Matlab Simulink</i> μ ER1 <i>NAPRATECONTROL 1</i>	121
	ANEXO II – Histórico de Banco de Dados (HDA) <i>OPC Tool Box Matlab Simulink</i> μ ER2 <i>NAPRATECONTROL 2</i>	122
	ANEXO III – Histórico de Banco de Dados (HDA) <i>OPC Tool Box Matlab Simulink</i> μ ER3 <i>NAPRATECONTROL 3</i>	123
	ANEXO IV – Histórico de Banco de Dados (HDA) <i>OPC Tool Box Matlab Simulink</i> μ ER4 <i>NAPRATECONTROL 4</i>	124
	ANEXO V – Histórico de Banco de Dados (HDA) <i>OPC Tool Box Matlab Simulink</i> μ ctr4 <i>NAPRATECONTROL 4</i>	125
	ANEXO VI – Histórico de Banco de Dados (HDA) <i>OPC Tool Box Matlab Simulink</i> μ ER5 <i>NAPRATECONTROL 5</i>	126
	ANEXO VII – Histórico de Banco de Dados (HDA) <i>OPC Tool Box Matlab Simulink</i> μ ctr5 <i>NAPRATECONTROL 5</i>	127
	ANEXO VIII – Histórico de Banco de Dados (HDA) <i>OPC Tool Box Matlab Simulink</i> SPR λ 5 <i>NAPRATECONTROL 5</i>	128
	ANEXO IX – Histórico de Banco de Dados (HDA) <i>OPC Tool Box Matlab Simulink</i> φ E4 <i>NAPRATECONTROL 4</i>	129
	ANEXO X – Histórico de Banco de Dados (HDA) <i>OPC Tool Box Matlab Simulink</i> φ E5 <i>NAPRATECONTROL 5</i>	130

1. INTRODUÇÃO

O avanço da informática tem trazido muitos benefícios às atividades do dia-a-dia e, ao que tudo indica, mudanças inimagináveis e muito maiores estão por vir. Como exemplo, podemos citar as mudanças observadas nos últimos anos nos meios de comunicação e na Internet, que não poderiam ter sido imaginadas antes de ocorrerem (ABE, 2013).

O estreitamento de diferentes áreas de conhecimentos influencia muito esta evolução e impulsiona o caminhar no desenvolvimento do “novo”, alcançando as fronteiras do conhecimento humano. Todo este desenvolvimento tecnológico foi fundamentado na lógica clássica, ou aristotélica, que é binária em sua essência. No entanto, devido às exigências das tecnologias, em algumas áreas, tais como a automação, que envolve sistemas complexos, a lógica clássica começa a dar espaço para outros tipos de lógicas denominadas não clássicas (DE MORAES, 2013).

Os computadores dedicados aos processos de automação são denominados de controladores industriais e utilizam a lógica clássica em seus algoritmos. No início surgiram dois tipos de controladores, o Controlador Lógico Programável (CLP), que é mais dedicado ao sistema de manufatura, e o Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD).

O SDCD é o mais utilizado na indústria de processos contínuos. A rápida evolução da informática permitiu uma interação das duas tecnologias, CLP e SDCD, onde um mesmo computador pode ser configurado para reunir as mesmas funcionalidades, interagindo com outros *softwares* de desenvolvimentos (FERNANDES, 2012).

Atualmente há muitos tipos de lógicas não clássicas no campo de pesquisa, envolvendo controle e automação, tal como muitas aplicações que estão sendo desenvolvidas e implementadas em várias áreas com *softwares* de simulação, monitoração e controle de plantas industriais.

Com o advento de novas tecnologias, verificou-se a necessidade de buscar respostas eficientes para um controle de processos, onde os intervalos entre os limites que expressam a qualidade do produto ficassem cada vez menores.

Neste caminho, considerou-se a implementação, nos sistemas operacionais, de Controladores Programáveis de algoritmos capazes de apresentar resultados mais eficientes com baixo custo computacional.

O grande desafio na implementação de algoritmos baseados em lógica não clássica reside em lidar com a contradição, pois até então se falava que o contraditório não poderia coexistir sem problema algum. No entanto, o processo lógico racional não pode ignorar as contradições, pois procura extrair delas informações que possam ser relevantes para a tomada de decisão. Dessa forma, a Lógica Paraconsistente, que suporta a contradição em seus fundamentos, pode ser uma boa ferramenta para tratar dados originários do Conhecimento Incerto (DA SILVA FILHO *et al.*, 2008).

Segundo Nunes (2015), o conceito da lógica paraconsistente apareceu quando, de modo independente ao estudo do Polonês Jaskowski, que tratava de uma lógica discursiva considerada contraditória, o lógico brasileiro Newton C. A. da Costa, por volta de 1950, apresentou um trabalho que considerava a contradição na estrutura da lógica. Tal estudo foi denominado pelo filósofo peruano Francisco Miró Quesada como “Paraconsistentes” (“para”, que significa “ao lado de”).

A denominação de Quesada foi aceita pela comunidade científica mundial e estes estudos foram cada vez mais sendo aprofundados por diversos pesquisadores. Nesta linha, Nunes (2015) destaca que Da Costa publicou vários trabalhos no campo de pesquisa da lógica paraconsistente com outros pesquisadores, onde, se destacam: *Paraconsistent Logics as a Formalism for Reasoning About Inconsistent Knowledge Base* (1989); *The Paraconsistent Logics Pt* (1989); *Automatic Theorem Proving in Paraconsistent Logics: Teory and Implementation* (1990) e *Remarks on Annotated Logic* (2000).

Em Da Silva Filho (1999) foi proposta uma das primeiras aplicações práticas da lógica paraconsistente em circuitos eletrônicos. A teoria começou a ganhar “vida” por meio desta aplicação inicial que culminou na construção do Controlador Lógico Paraconsistente (ParaControl) (DA SILVA FILHO, 2000), colocado em funcionamento para controlar o robô Emmy I. Em Torres (2004) foi proposta a construção do robô Emmy II.

Outro trabalho de grande relevância é encontrado em Martins (2003), onde se aplicou a Lógica Paraconsistente em sistema de supervisão de distribuição de energia elétrica aplicando-se uma Lógica Paraconsistente Anotada de quatro valores

(LPA4v) em sistema de raciocínio baseado em casos para o restabelecimento de subestações elétricas.

No ambiente industrial muitas tecnologias de controle são utilizadas e, para Campos e Teixeira (2010), um dos controles mais importantes é o dos níveis, pois, para manter o nível de um tanque ou vaso constante é necessário que a vazão de entrada seja igual à de saída. O controle de nível deve aumentar ou diminuir a vazão de entrada ou saída para manter a estabilidade do sistema. A técnica de controle é o monitoramento por meio de sensores, onde um algoritmo controlador executa a ação mais apropriada ao sistema a ser controlado. Fazer uso da realimentação através de um sistema de malha fechada é muito importante para a estratégia de controle.

Neste trabalho apresenta-se um método de utilização da Lógica Paraconsistente Anotada atuando como a principal ferramenta de controle para a tomada de decisão na estratégia de controle de razão entre dois produtos, na automação de um sistema com variáveis de processo industrial, tais como vazão e nível.

1.1 Justificativa

Segundo Campos e Teixeira (2010), a medição de nível é a medida da altura do conteúdo de um reservatório que pode conter líquido ou sólido. Neste processo de medição, por meio de transdutores interligados a conversores microprocessados, ocorre a detecção da presença do conteúdo dentro dos recipientes industriais. A vazão é uma variável muito importante nos processos industriais para o cálculo de custos, controle de demandas e como fator de segurança na qualidade do produto final acabado. É importante, para evitar acidentes de grandes proporções e danos à qualidade do produto acabado. Além de permitir o controle e a calibração dos sistemas de medição de variáveis de vazão e de nível na determinação da presença ou ausência de conteúdo.

Neste trabalho pretende-se aplicar a estratégia de controle de Razão em medição de vazão e nível entre dois produtos contidos nos tanques, que possam interligar transmissores de vazão e nível em automação, aprimorando os sistemas multivariáveis com três tanques.

Para isso as investigações serão feitas com verificações dos comportamentos da estratégia em controle de Razão utilizando a Lógica Paraconsistente Anotada

(LPA), mais precisamente em sua forma especial denominada de Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPA2v). Nestes conceitos serão utilizados os algoritmos denominados de nós de análises paraconsistentes (NAP) interligados em redes de análises paraconsistentes (RAP).

O controle de Razão PI(s) de vazão e nível (dois produtos) em sistema de três tanques foi escolhido para este trabalho devido à necessidade de grande precisão na medição, ou seja, baixíssima tolerância quanto a incertezas, imprecisões e contradições.

1.2 Relevância do tema

Nos processos industriais em que se busca a máxima capacidade de produção e a melhor qualidade dos produtos, se faz necessário o controle das variáveis críticas, com o melhor grau de variabilidade e robustez. O controle PID, estratégia mais utilizada nos sistemas industriais, vem sendo amplamente empregado na maioria das técnicas avançadas neste controle de processos. Porém, apesar de consolidado, em projetos relacionados à engenharia de processo, ainda apresentam problemas em algumas situações. Situações estas em que é primordial o tratamento das incertezas das variáveis do processo.

A utilização de algoritmos fundamentados na Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPA2v) em controle de processo apresenta-se como inovação para os *softwares* bloqueados utilizados como simulação e controle no tempo real sobre as variáveis a serem controladas quando se almeja uma melhor confiabilidade.

1.3 Objetivo do trabalho

O principal objetivo deste trabalho é mostrar uma forma de aplicação da Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPA2v) em Sistemas de Automação e Controle através da telemetria com o *OPC tool box Matlab Simulink* interligado a estratégias de controle PI(s) de razão em malha fechada conectado ao *Hardware* do controlador de processo.

Os objetivos secundários são:

- a) Encontrar formas de aplicações em automação e controle para os algoritmos subsidiados por Lógica Paraconsistente (LP) de modo que sejam capazes de oferecer maior grau de precisão aos controladores que atuam diretamente na produção;
- b) Estabelecer novas técnicas de tratamento de dados provenientes de transmissores de campo, proporcionando um instrumento de apoio com capacidade de oferecer resultados sob incertezas;
- c) Comparar os valores de sintonia dinâmica (ganho proporcional e integral), obtidos com a técnica LPA2v com parâmetros estáticos (PI) calculados pelo método IMC (Modelo Interno de Controle).

1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

Neste capítulo 1, apresenta-se a introdução do trabalho, e a justificativa da pesquisa em conjunto com a relevância do tema.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre processo multivariável com três tanques, modelagem matemática (vazão, nível), uma visão geral da esquematização do processo para os três tanques, *Matlab Simulink* e também a fundamentação sobre lógica Paraconsistente Anotada, Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois Valores (LPA2v) com as simulações iniciais com o *software* MATLAB®, NAP e RAP.

O capítulo 3 aborda as características da planta piloto de processo para controle de vazão, nível e resultados obtidos durante a simulação da estratégia de Controle em Razão no *Matlab Simulink*, interagindo com a Lógica Paraconsistente anotada de dois valores, intervalos resultantes das evidências reais, tratamento das contradições normalizadas e os resultados dos graus de evidências provenientes do RAP na definição dos Valores proporcional e integral do controlador de razão desenvolvido no *Matlab*.

No capítulo 4 são apresentados os resultados dos cinco NAPs obtidos através da Rede de Análise Paraconsistente (RAP) com o Controlador de Razão desenvolvido no *Matlab Simulink* com *OPC tool box* conectado à planta piloto em malha fechada.

No capítulo 5 explica-se como foi desenvolvido o controlador paraconsistente de Razão utilizando o *OPC tool box* implementado no controle de vazão e nível da planta piloto, abordando em detalhes a construção do bloco de Controle Paraconsistente com sua programação no *Matlab Simulink*, utilizando linguagem normalizada.

No capítulo 6, são reunidos os resultados dos testes do controlador paraconsistente desenvolvido, considerando variações em degrau no *Set point* local do produto no tanque principal e o *Set point* remoto obtido, comparando os resultados da Parametrização do PI no controlador desenvolvido e os obtidos na simulação e interação do *OPC tool box* no *Matlab Simulink* conectado à Planta piloto de processo. Finalizando, o capítulo 7, apresenta a conclusão e a perspectiva de evolução da pesquisa.

2. CONCEITOS DE MEDIÇÕES DE VAZÃO, NÍVEL E LÓGICA PARACONSISTENTE

Neste capítulo são apresentadas algumas considerações sobre medição de vazão, nível, *Matlab Simulink* e os principais fundamentos da Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois Valores (LPA2v). Tais considerações são necessárias para um entendimento completo sobre a pesquisa desenvolvida utilizando conceitos da LPA2v para controle de vazão e *Matlab Simulink* para o controle de nível.

2.1 Medição de vazão

A medição da vazão entre variáveis requer recursos distintos no tocante a medidores e transmissores. A definição de vazão volumétrica é a quantidade de fluido que passa através da seção reta de um duto numa certa unidade de tempo (DELMÉE, 2003). No presente trabalho foi utilizada uma placa de orifício como elemento primário de vazão.

O princípio de funcionamento baseia-se no uso de uma mudança de área de escoamento, através de uma redução de diâmetro ou de um obstáculo, ou ainda através de uma mudança na direção do escoamento. Estas mudanças de área ou de direção provocam uma aceleração local do escoamento, alterando a velocidade e, em consequência, a pressão local. A variação de pressão é proporcional ao quadrado da vazão.

Os medidores de vazão, além de bastante conhecidos, normalizados e apresentam baixo custo, e são, em sua maioria, compostos por um elemento primário e um secundário. O elemento primário está associado à própria tubulação, interferindo no escoamento e fornecendo o diferencial de pressão. Já o elemento secundário é responsável pela leitura deste diferencial, podendo ser um simples manômetro de coluna líquida, em suas diferentes versões, ou um transdutor mais complexo, com aquisição e tratamento eletrônico do valor de pressão lido.

Neste trabalho, para a medição de vazão nos dois tanques, são utilizados dois transmissores de pressão diferencial. Medindo valores tais como o grau de evidências favoráveis referente à vazão dos produtos com faixa de saída de 4 a 20mA.

Segundo Delmée (2003), a teoria da medição de vazão por pressão diferencial é fundamentada em leis físicas conhecidas. Assim como as equações teóricas devem ser complementadas por coeficientes práticos, para que a vazão possa ser medida com precisão. Teoria esta que considera a equação da continuidade e de Bernoulli.

A figura 1 mostra uma representação da medição de vazão pelo transmissor de pressão diferencial (PDT) em relação à equação de Bernoulli.

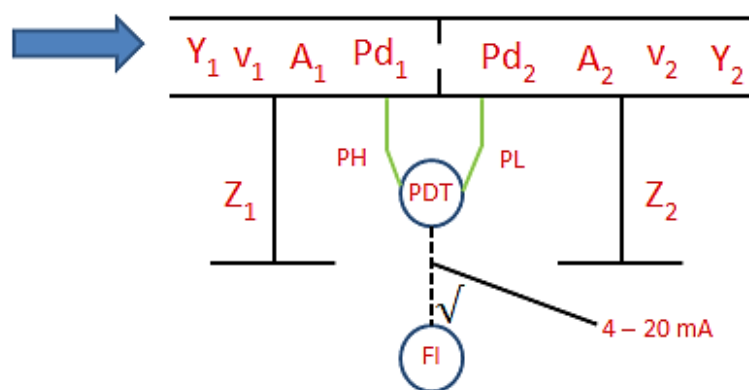


Figura 1 - Representação da medição de vazão pelo transmissor de pressão diferencial (PDT) em relação à equação de Bernoulli.

Fonte: Delmée, 2003.

Considerando que o sinal de saída do PDT será em função da equação de Bernoulli, observou-se que o trabalho das forças presentes e o acréscimo de energia são calculados com base nas equações (1), (2), (3) e (4) (DELMÉE, 2003):

$$Pd_1 = \frac{\gamma_1 V_1^2}{2g} \quad (1)$$

Em que:

Pd_1 é a pressão dinâmica à montante da placa de orifício (kgf/m²);

γ_1 é o peso específico da entrada à montante (kgf/m³);

V_1 é a velocidade (m/s);

g é a aceleração da gravidade (m/s²).

$$Pd_2 = \frac{\gamma_2 V_2^2}{2g} \quad (2)$$

Em que:

Pd_2 é a pressão dinâmica à montante da placa de orifício (kgf/m²);

γ_2 é o peso específico de saída à jusante (kgf/m³);

V_2 é a velocidade (m/s);

g é a aceleração da gravidade (m/s²).

$$\frac{Pd_1}{\gamma_1} = \frac{\gamma_1 V_1^2}{2g} \quad (3)$$

$$\frac{Pd_2}{\gamma_2} = \frac{V_2^2}{2g} \quad (4)$$

A equação (5), chamada equação da continuidade, relaciona a velocidade de escoamento de um fluido com a área disponível para tal escoamento.

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (5)$$

Em que:

V_1 e V_2 representam a velocidade de escoamento (m/s);

A_1 é a seção transversal à montante indicada pelo sentido de fluxo (m²);

A_2 é a seção transversal à jusante (m²).

A energia potencial estática de pressão à tomada de alta pressão é obtida pela equação (6).

$$PH = h_1 \gamma_1 \quad (6)$$

Em que:

PH é a pressão estática elevada aplicada à tomada de impulso do PDT transmissor à montante (Kgf/m²);

h_1 é a altura hidrostática referente à energia potencial existente;

γ_1 é o peso específico entrada à montante (kgf/m³).

A energia potencial estática de pressão à tomada de baixa pressão é obtida a partir da equação (7).

$$PL = h_2 \gamma_2 \quad (7)$$

Em que:

PL Pressão estática baixa aplicada a tomada de impulso do PDT transmissor à jusante (Kgf/m²);

h₂ é a altura hidrostática referente à energia potencial existente;

γ_2 é o peso específico entrada à montante (kgf/m³).

Considerando que a Equação de Bernoulli descreve o comportamento de um fluido ao longo de uma corrente, relacionando as variações de pressão com a velocidade média de um fluido e o desnível entre os pontos de análise ao longo do escoamento, pode ser expressa pela equação (8):

$$\frac{P_H}{\gamma_1} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_L}{\gamma_2} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (8)$$

Em que:

Z₁ e Z₂ são as alturas em relação a um nível de referência.

Considerando que Z₁ = Z₂, ao simplificarmos a equação (8), obteremos a equação (9):

$$\frac{P_H}{\gamma_1} + \frac{\gamma_1 v_1^2}{2g} = \frac{P_L}{\gamma_2} + \frac{\gamma_2 v_2^2}{2g} \quad (9)$$

Se isolarmos as medidas de pressão na equação (9), obteremos a equação (10):

$$\frac{P_H}{\gamma_1} - \frac{P_L}{\gamma_2} = \frac{\gamma_2 v_2^2}{2g} - \frac{\gamma_1 v_1^2}{2g} \quad (10)$$

Ao considerarmos que $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ chegaremos à equação (11):

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{\gamma}{2g} (v_2^2 - v_1^2) \quad (11)$$

Se Q₁ = v₁A₁; Q₂ = v₂A₂, através das equações (12) a (20) concluiremos que K√ΔP=Q:

$$\frac{\Delta P}{\gamma^2} 2g = \left(\frac{Q_2}{A_2} \right)^2 - \left(\frac{Q_1}{A_1} \right)^2 \quad (12)$$

$$\frac{\Delta P 2g}{\gamma^2} = \frac{Q_2^2}{A_2^2} - \frac{Q_1^2}{A_1^2} \quad (13)$$

$$\frac{\Delta P 2g A_2^2 A_1^2}{A_2^2 A_1^2 \gamma^2} = \frac{Q_2^2 A_1^2 \gamma^2}{A_2^2 A_1^2 \gamma^2} - \frac{Q_1^2 A_2^2 \gamma^2}{A_2^2 A_1^2 \gamma^2} \quad (14)$$

$$\Delta P 2g A_2^2 A_1^2 = Q_2^2 A_1^2 \gamma^2 - Q_1^2 A_2^2 \gamma^2 \quad (15)$$

$$\Delta P (2g A_2^2 A_1^2) = (Q_2^2 A_1^2 - Q_1^2 A_2^2) \gamma^2 \quad (16)$$

$$\frac{\Delta P (2g A_2^2 A_1^2)}{\gamma^2} = Q_2^2 A_1^2 - Q_1^2 A_2^2 \quad (17)$$

$$\frac{\Delta P (2g A_2^2 A_1^2)}{\gamma^2} = Q^2 (A_1^2 - A_2^2) \quad (18)$$

$$\frac{\Delta P 2g A_2^2 A_1^2}{\gamma^2 (A_1^2 - A_2^2)} = Q^2 \quad (19)$$

$$\Delta P K^2 = Q^2 \quad (20)$$

2.1.1 Linearização da vazão

Neste trabalho, os sinais de saída dos transmissores de vazão por pressão diferencial variam linearmente em função do ΔP e quadraticamente em função da vazão, conforme equação (21).

$$K\sqrt{\Delta P} = Q \quad (21)$$

Em que:

K é o ganho do processo;

ΔP é a variação do ganho proporcional do controlador;

Q é a Vazão.

Os sinais de saída dos transmissores de vazão por pressão diferencial foram parametrizados em 0 a 2,5m³/h e $\Delta P = 0$ à 1492 mm H₂O.

Visando linearizar o sinal de saída do transmissor em função de vazão, foi necessário o uso de um EXTRATOR DE RAIZ QUADRADA, conforme demonstra-se na tabela 1

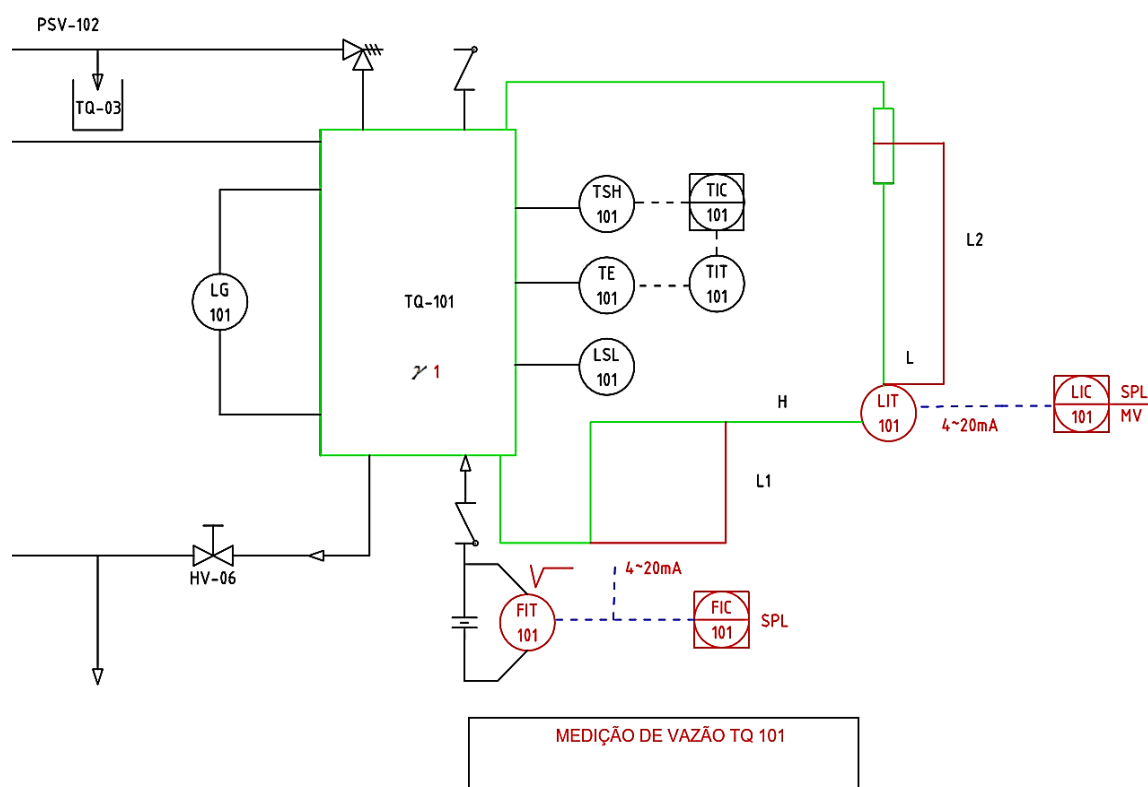
Tabela 1 - Linearização da Vazão Volumétrica em função do ΔP .

ΔP (%)	Vazão (%)
0,0	0,0
25,0	50,0
50,0	70,70
75,0	86,60
100,00	100,00

O padrão mais comum de sinais elétricos é em corrente 4 a 20 mA (mili Amperes) (FRANCHI, 2011).

O sinal de saída 4 à 20mA linearizado em função da equação $K\sqrt{\Delta P} = Q$, parametrizada nos transmissores de vazão, será utilizado nesse trabalho como grau de evidência favorável para a lógica paraconsistente.

Tal função será desenvolvida a partir dos transmissores de pressão diferencial FIT101 e FIT102, conforme observa-se nas figuras 2 e 3.

**Figura 2 - Representação da medição de vazão pelo PDT (FIT 101) com relação à equação de Bernoulli, TQ101.**

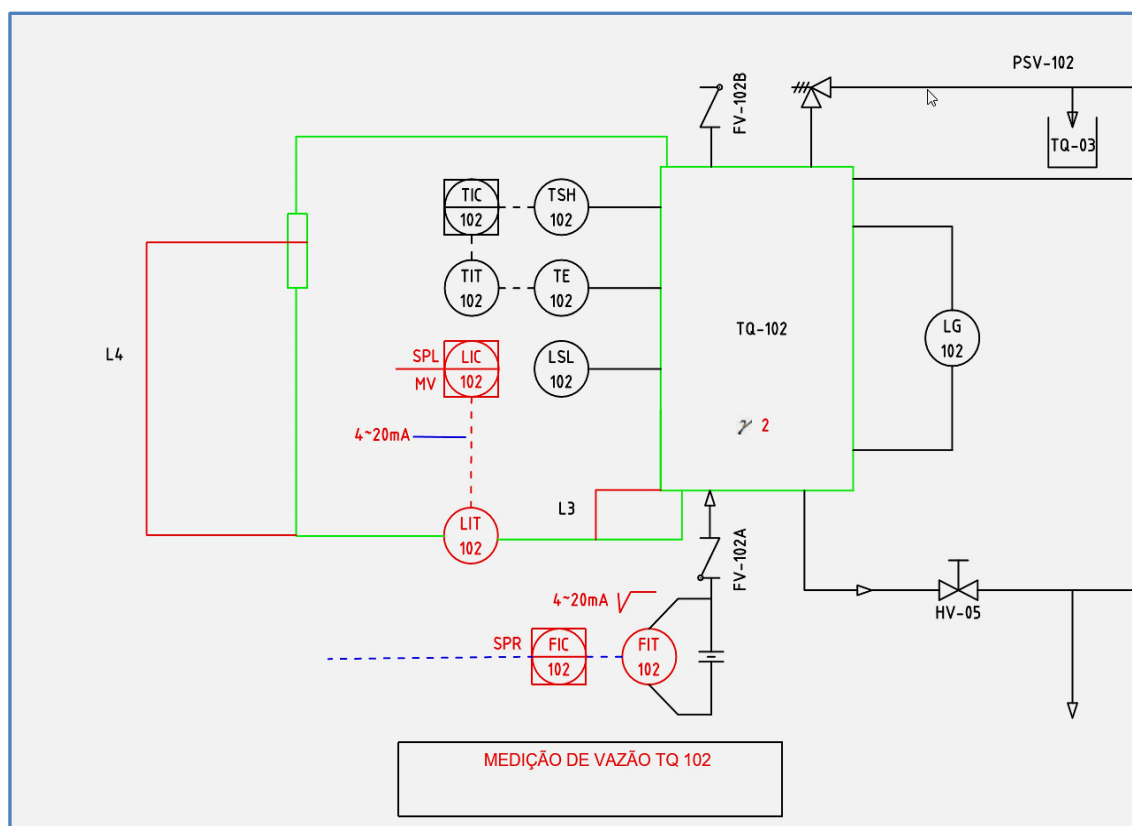


Figura 3 - Representação da medição de vazão pelo PDT (FIT 102) transmissor de pressão diferencial com relação à equação de Bernoulli, TQ102.

Na indústria de petróleo as variáveis mais importantes de processo e transferência de custódia (base para compra e venda) são a vazão e o nível (RIBEIRO, 2010). Portanto, nesta pesquisa as variáveis de nível e de vazão, linearizadas na faixa de 4 a 20 mA, ganham fundamental importância na análise paraconsistente (detalhada no capítulo 5).

2.1.2 Medição de nível

Neste trabalho serão utilizados os sinais dos transmissores de nível dos tanques 101 e 102, conforme se observa nas representações das malhas (figuras 2 e 3).

Conforme afirma Webster (1999), considera-se que a pressão hidrostática causada pelo peso do líquido armazenado em um reservatório seja representada pela equação (22):

$$P = g \times PL \times h + P_{\text{topo}} \quad (22)$$

Em que:

- P é a pressão hidrostática causada pelo peso do líquido no reservatório;
- g é a aceleração da gravidade (m/s^2);
- PL é a pressão estática baixa aplicada à tomada de impulso do PDT transmissor à jusante (Kgf/m^2);
- h é a altura hidrostática referente à energia potencial existente;
- P_{Topo} é a pressão no topo do tanque.

O modelo é composto por um reservatório fechado, e o ΔP medido pelo transmissor LIT 101 será a pressão diferencial entre PH e PL.

A pressão no topo do tanque TQ-101 não é igual a pressão atmosférica, portanto a tomada de impulso PL de baixa pressão do transmissor deverá estar conectada à parte superior do tanque, para compensar as variações da pressão no topo.

Para evitar que aconteça a condensação de líquido na tubulação que conecta a pressão do topo do tanque à tomada de impulso L do transmissor, fato que provocaria erros na medição, considera-se que esteja totalmente preenchida com o mesmo líquido do interior do tanque.

Como PL é igual a pressão no topo do tanque na superfície do líquido, e PH é a pressão da coluna formada pelas alturas L1 e L2, serão utilizadas as equações para parametrização dos transmissores LIT 101 e LIT 102 dispostos conforme demonstrado na Figura 4.

A figura 4 apresenta a representação da medição de nível pelo transmissor de pressão diferencial (PDT) LIT 101 em relação ao TQ101.

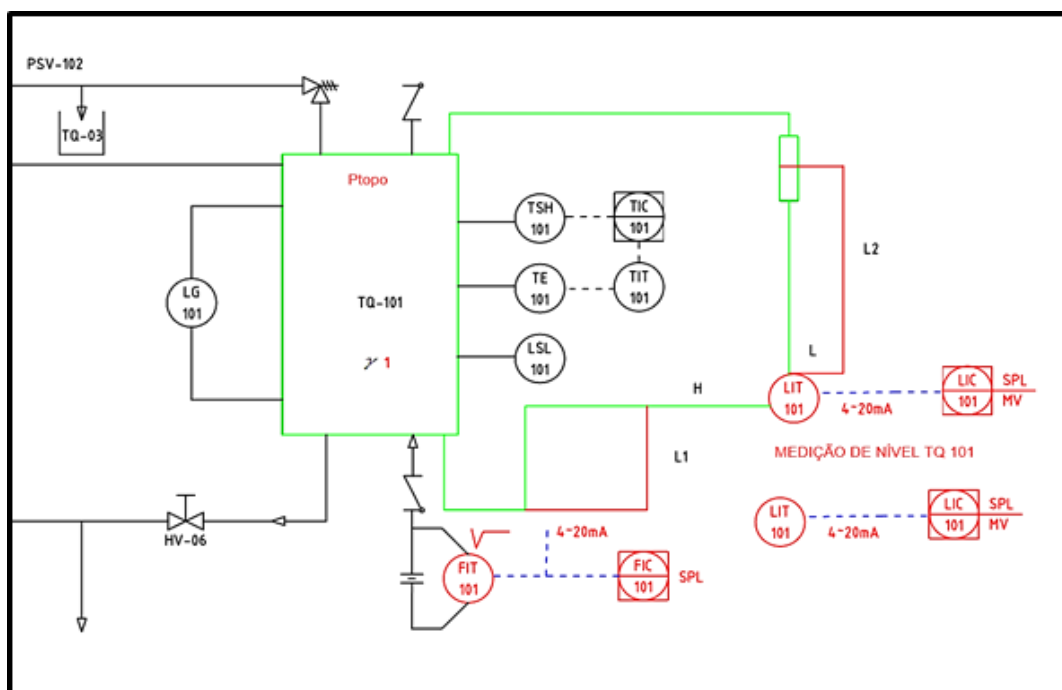


Figura 4 - Representação da medição de nível pelo transmissor de pressão diferencial (PDT) LIT 101 em relação ao TQ101.

2.2 Lógica paraconsistente

De modo geral pode-se considerar uma lógica não-clássica como sendo toda aquela que apresenta fundamentos que possam contrariar ou ignorar algum princípio da lógica clássica, incluindo-se aquelas que a complementam. Recentemente, com a ocorrência de novas demandas para a automação de processos, os CLPs e SDCDs trazem condições de configuração a partir de algoritmos baseados em lógicas não-clássicas.

Entre as lógicas denominadas não-clássicas destaca-se a Lógica Paraconsistente (LP), caracterizada por sua principal propriedade: a capacidade de considerar a contradição sem que o conflito de informações invalide suas conclusões.

Segundo Abe (1992) uma teoria é consistente quando entre seus teoremas não houver contradição, caso contrário, ela será denominada inconsistente. Uma teoria é denominada como trivial se todas as sentenças (ou fórmulas) de sua linguagem forem teoremas; se ocorrer o contrário, será classificada como não-trivial. Uma lógica é definida como Paraconsistente quando for capaz de tratar de inconsistências de forma não trivial.

Na área de tratamento de incertezas, a lógica paraconsistente, na sua forma especial denominada Lógica Paraconsistente Anotada (LPA), tem se destacado pela eficiência de seus métodos ao tratar informações contraditórias, valorizando-as, eis que podem trazer evidências para estruturar resultados que retratem melhor a realidade (DA SILVA FILHO, 2006).

A aplicação da LPA se dá por meio de seus algoritmos e, os aplicados neste trabalho se basearão em Lógica Paraconsistente na sua forma denominada Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPA2v) (DA SILVA FILHO, 1999).

A LPA2v será utilizada como base para a construção da estratégia de controle de Razão e Nível. Entre os algoritmos da LPA2v destaca-se o Nó de Análise Paraconsistente (NAP). Segundo os autores Da Silva Filho, Abe e Lambert-Torres (2008), NAP é a denominação dada a um algoritmo extraído da LPA2v para análise de uma proposição por meio da entrada na forma de anotação composta por: um Grau de Evidência Favorável (μ) e um Grau de Evidência Desfavorável (λ).

Nas aplicações com NAP pode-se relacionar o (μ) e o (λ) aos sistemas de controle de variáveis de processos onde, após tratamento paraconsistente, obtêm-se como saída do sistema: o grau de Evidência Resultante Real (μ_{ER}) e um Intervalo de certeza (ϕE).

2.2.1 Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de 2 valores-LPA2v

A Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de dois valores (LPA2v) é composta por dois sinais de informação, ou seja, cada proposição é acompanhada de dois valores de graus de evidência denominados: grau de crença (evidência favorável) e grau de descrença (evidência desfavorável). O primeiro valor da anotação representa a evidência favorável à proposição P ou o grau de crença dessa proposição (denominado μ). Ao passo que o segundo valor da anotação representa a evidência contrária à proposição P ou o grau de descrença dessa proposição (denominado λ).

A LPA2v é representada por um reticulado associado que geralmente utiliza o Reticulado de 4 Vértices. Os estados lógicos paraconsistentes são representados nos vértices e, através de uma interpretação algébrica, também são representados nas regiões internas do reticulado.

Os estados lógicos Paraconsistentes são as saídas resultantes correspondentes à análise da proposição P .

Visando uma melhor interpretação das evidências na LPA2v, é utilizada uma representação onde associa-se um reticulado finito formado por pares ordenados de valores (μ, λ) , onde a letra grega μ significa o grau de evidência favorável da proposição $V(1,0)$ ao passo que λ corresponde ao grau de evidência desfavorável $F(0,1)$.

Conforme afirmam Da Silva Filho, Abe e Lambert-Torres (2008), pode-se relacionar os estados lógicos extremos representados nos quatro vértices do reticulado, onde a anotação, composta pelos Graus de Evidência favorável e desfavorável, atribui à proposição P uma leitura intuitiva:

- Se $PT = P(1, 1) \Rightarrow P$ é inconsistente;
- Se $Pv = P(1, 0) \Rightarrow P$ é verdadeira;
- Se $PF = P(0, 1) \Rightarrow P$ é falsa;
- Se $P\perp = P(0, 0) \Rightarrow P$ é indeterminada.

Considerando valores nos sinais que agora compõem as anotações, através de uma análise pode-se chegar ao valor do estado lógico resultante.

O reticulado de valores da LPA2v é visto na Figura 5.

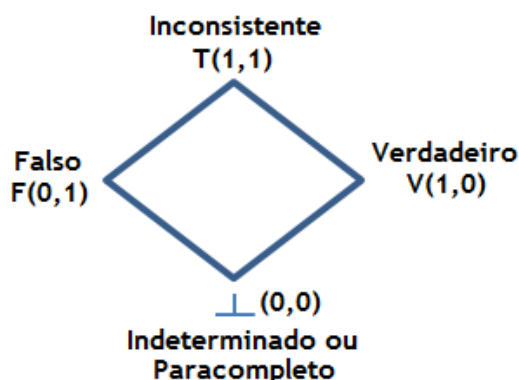


Figura 5 - Reticulado associado à lógica paraconsistente anotada de anotação com dois valores LPA2v.

Em várias situações reais onde se utiliza a LPA2v, os graus de evidência favorável (crença) e desfavorável (descrença) são considerados informações de entrada do sistema (exemplo: sinais analógicos em corrente e tensão referentes a medidas de variáveis de processos, leituras de protocolos em redes industriais, etc.).

Na figura 6 é apresentado o diagrama de um sistema de controle típico utilizando a LPA2v.

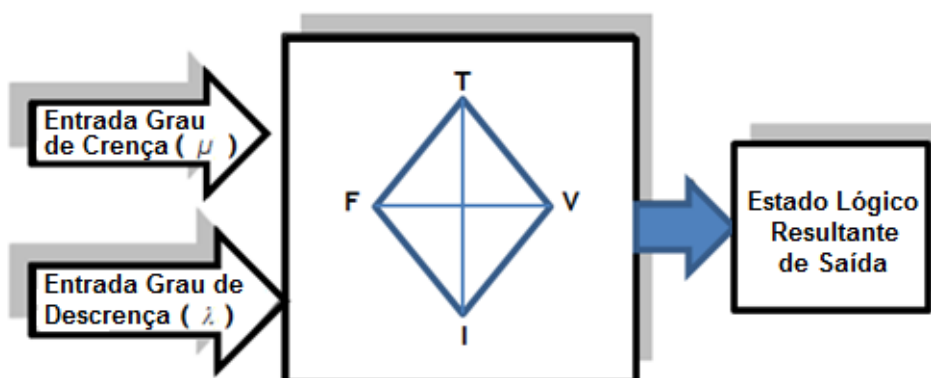


Figura 6 - Representação da análise paraconsistente LPA2v.

Fonte: Da Silva Filho, Abe & Lambert Torres, 2008.

2.2.2 Representação no Quadrado Unitário do Plano Cartesiano (QUPC)

A LPA pode ser estudada em um Quadrado unitário no Plano Cartesiano (QUPC), conforme visto na Figura 7, onde são inseridos os graus de evidência favorável (crença) μ e graus de evidência desfavorável (descrença) λ .

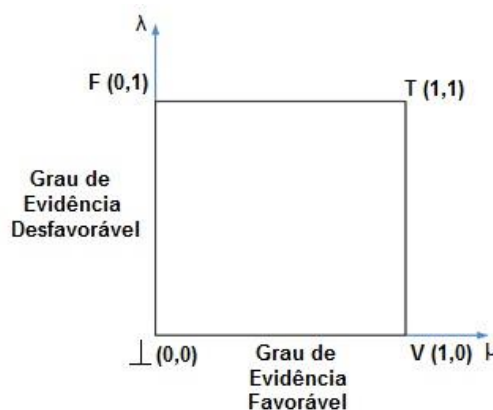


Figura 7 - Grau de evidência no quadrado unitário do plano cartesiano.

Fonte: Da Silva Filho & Abe, 2001.

2.2.3 O grau de contradição Gct

Conforme Da Silva Filho (2008), a partir do quadrado unitário são elaboradas transformações lineares por meio das quais são obtidos os valores dos graus de contradição (Gct) e de certeza (Gc), referentes aos cálculos que envolvem ambos.

Pode-se observar na figura 8 que o estado lógico inconsistente (1,1) está representado no ponto C, tal como o estado lógico indeterminado (0,0) está representado pelo ponto A.

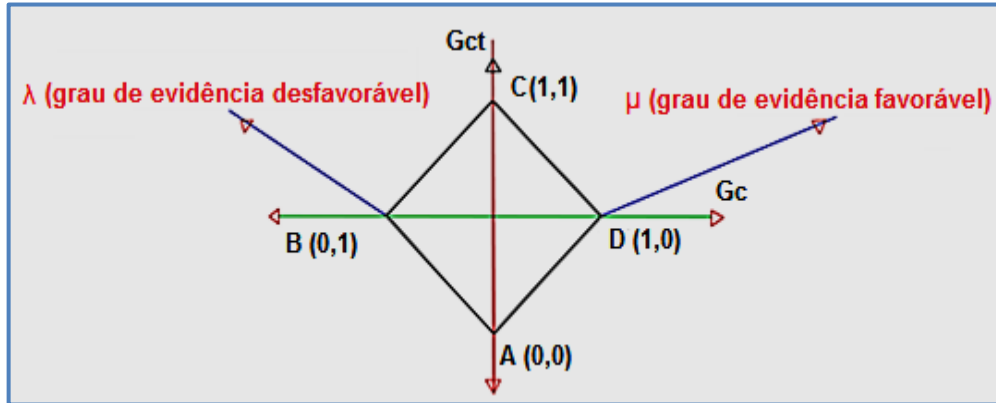


Figura 8 - Reticulado associado à LPA2v com valores.

Fonte: Da Silva Filho & Abe, 2001.

No sistema de análise paraconsistente, quando o estado lógico de uma proposição estiver mais próximo do segmento de reta formado pelos pontos BD (figura 8), significa que o nível de contradição das fontes de evidência é baixo.

Portanto, quanto mais o estado lógico estiver distante dessa reta, o valor do grau de contradição será $G_{ct} = +1$, uma situação inconsistente e $G_{ct} = -1$ para uma situação indeterminada, representando alta contradição a ser normalizada.

Pode-se representar o grau de contradição na equação (23):

$$G_{ct} = (\mu + \lambda - 1) \quad (23)$$

Em que:

G_{ct} é o grau de contradição;

μ é o grau de evidência favorável;

λ é o grau de evidência desfavorável.

O G_{ct} é o valor representado no reticulado à distância entre os dois estados extremos denominados Totalmente Paracompleto (ou Indeterminado) e Totalmente Inconsistente.

A Figura 9 mostra o eixo dos graus de contradição com os seus valores no intervalo fechado de -1 a + 1 e pertencente ao conjunto $\mathfrak{R}$, sendo representados horizontalmente para melhor compreensão.

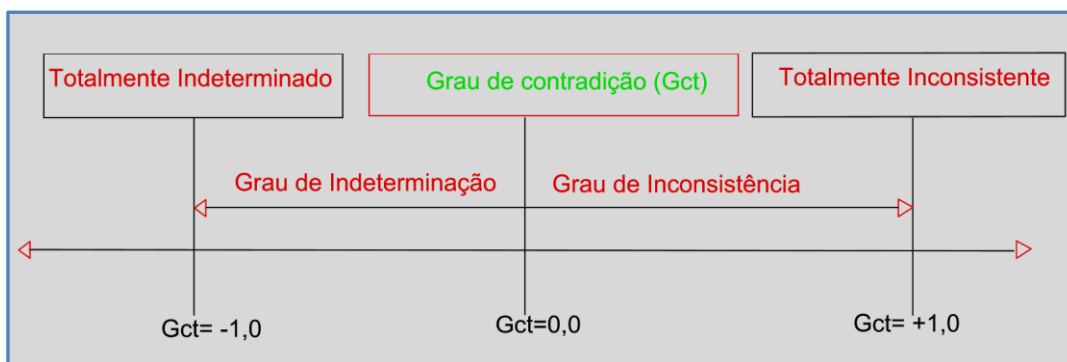


Figura 9 - Representação horizontal do grau de contradição Gct.

Fonte: Da Silva Filho (2006).

2.2.4 O grau de certeza Gc

Os valores do grau de certeza (Gc) são expressos no eixo das abcissas, estruturando o eixo dos graus de certeza. De igual modo, os valores do grau de contradição (Gct) são expressos no eixo das ordenadas, formando o eixo dos graus de contradição.

Na figura 8, o estado lógico paraconsistente verdadeiro (1,0) e o lógico paraconsistente falso (0,1) estão representados pelos pontos D e B, respectivamente.

Se $Gc = 0$ e $Gct = 0$, o estado lógico é Indefinido I.

Pode-se dizer que quando uma proposição apresentar estado lógico paraconsistente verdadeiro, Gc será +1. Do mesmo modo, quando uma proposição apresentar estado lógico paraconsistente falso, o valor de GC será -1.

Portanto o Gc pode ser representado conforme demonstra a equação (24):

$$Gc = (\mu - \lambda) \quad (24)$$

Em que:

Gc é o grau de certeza;

μ é o grau de evidência favorável;

λ é o grau de evidência desfavorável.

O Gc é o valor que representa no reticulado a distância entre os dois estados extremos denominados de Totalmente Falso e Totalmente Verdadeiro (figura 10).

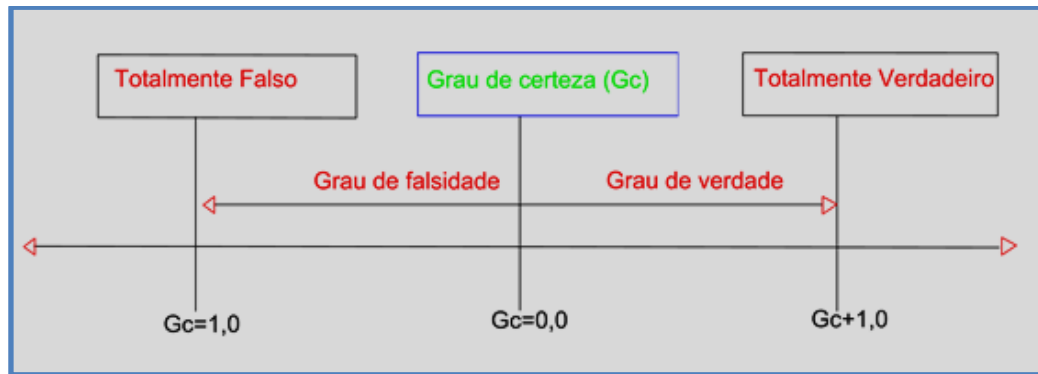


Figura 10 - Representação do grau de certeza Gc.

Fonte: Da Silva Filho (2006).

2.2.5 Grau de Certeza de valor real Gcr

O grau de certeza real Gcr tem por finalidade otimizar o tratamento das incertezas das fontes de evidência favorável (μ) e desfavorável (λ) juntamente com os graus de certeza Gc e o contradição Gct. Este parâmetro pode ser equacionado conforme as equações do grau de contradição (23) e do Grau de certeza (24) obtendo-se valores positivos que serão interpolados internamente no reticulado (DA SILVA FILHO, 2006), conforme demonstra a figura 11.

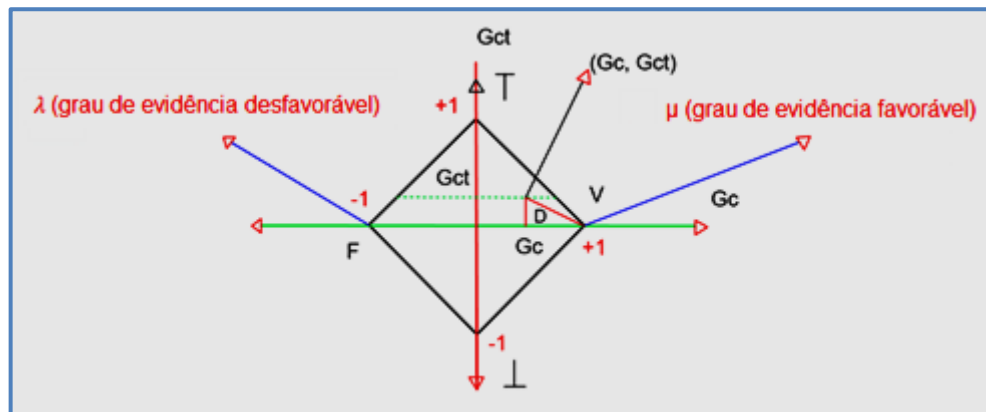


Figura 11 - Ponto de interpolação (Gc, Gct) e distância D.

Fonte: Da Silva Filho et al., 2008.

A distância D da reta da figura 11, que inicia da interpolação interna no reticulado entre (Gc, Gct), representada no vértice direito do reticulado, é calculada pela equação (25):

$$D = \sqrt{(1 - |Gc|)^2 + (Gct)^2} \quad (25)$$

Em que:

D é a distância da reta;

G_c é o grau de certeza;

G_{ct} é o grau de contradição.

O valor de D será necessário para otimizar a contradição ao valor mais próximo da realidade considerando a evidência no eixo horizontal F ou V , assim como a contradição no eixo vertical. Neste caso, o Grau de Certeza de valor real G_{cr} será a projeção da distância D no eixo de valores de certeza, conforme se demonstra na figura 12.

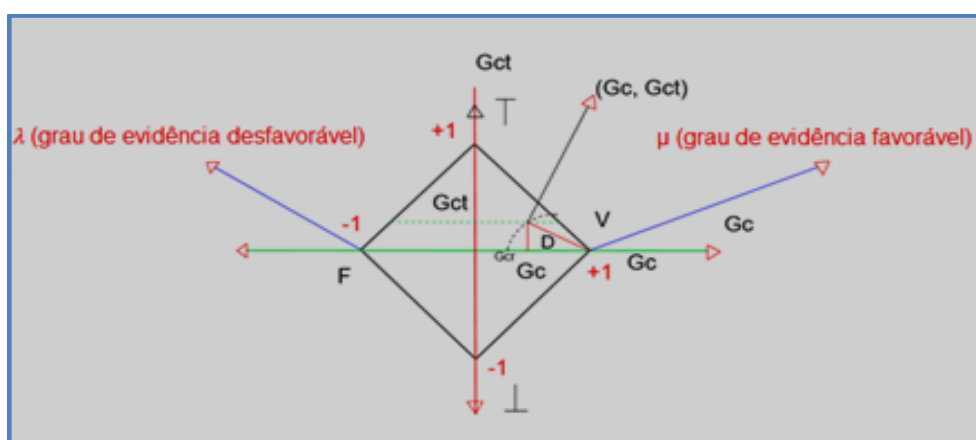


Figura 12 - Grau de certeza de valor resultante real.

Fonte: Da Silva Filho *et al.*, 2008.

Se o valor do grau de certeza (G_c) obtido for negativo, a distância D será obtida a partir do ponto de certeza Falso, localizado no vértice esquerdo do reticulado, até ao ponto de interpolação $(-G_c, G_{ct})$, conforme **figura 13**.

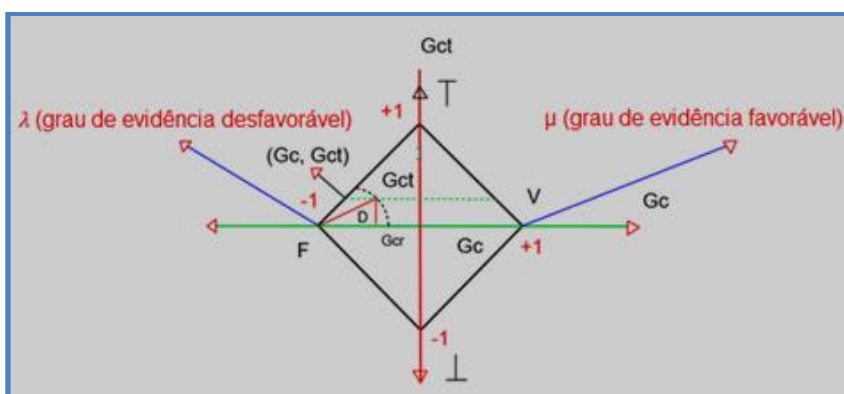


Figura 13 - Grau de Certeza de valor real G_{cr} no reticulado da LPA2v quando G_c é negativo e G_{ct} positivo.

Fonte: Da Silva Filho *et al.*, 2008.

Portanto, o valor do Grau de Certeza real G_{cr} é obtido a partir da determinação da distância D , conforme equação (26) e (27) :

$$\text{Se } G_c > 0: \quad G_{cr} = (1 - D)$$

$$G_{cr} = 1 - \sqrt{(1 - |G_c|)^2 + (G_{ct})^2} \quad (26)$$

$$\text{Se } G_c < 0: \quad G_{cr} = (D - 1)$$

$$G_{cr} = \sqrt{(1 - |G_c|)^2 + (G_{ct})^2} - 1 \quad (27)$$

As equações obtidas pela metodologia LPA2v irão estabelecer os algoritmos NAP para tomada de decisão e tratamento de incertezas.

2.2.6 Nó de análise paraconsistente (NAP)

O Nó de Análise Paraconsistente (NAP) é o algoritmo de tratamento de incertezas, fundamentado em Lógica Paraconsistente Anotada LPA2v, utilizando as equações (25), (26) e (27).

Nas redes de análise paraconsistente (RAP), os NAPs fazem tratamento de sinais de informação conforme os fundamentos da Lógica Paraconsistente. As entradas são alimentadas pelos Graus de Evidências retirados da base de dados de Conhecimento Incerto. Os NAPs utilizam as equações obtidas da metodologia da LPA2v e vão obtendo os Graus de Certeza real (G_{cr}) acompanhados de seus respectivos Intervalos de Certeza ϕ . Tal processo possibilita a obtenção de conclusões a respeito de determinadas proposições (DA SILVA FILHO, ABE e LAMBERT-TORRES, 2008).

O NAP apresenta duas entradas, uma de Grau de Evidência favorável μ e outra do grau de evidência desfavorável λ , a respeito da proposição P analisada. Apresenta também duas saídas de resultados: o Grau de Certeza real (G_{cr}) e o Intervalo de Certeza (ϕ), conforme mostra as figuras 14 e 15.

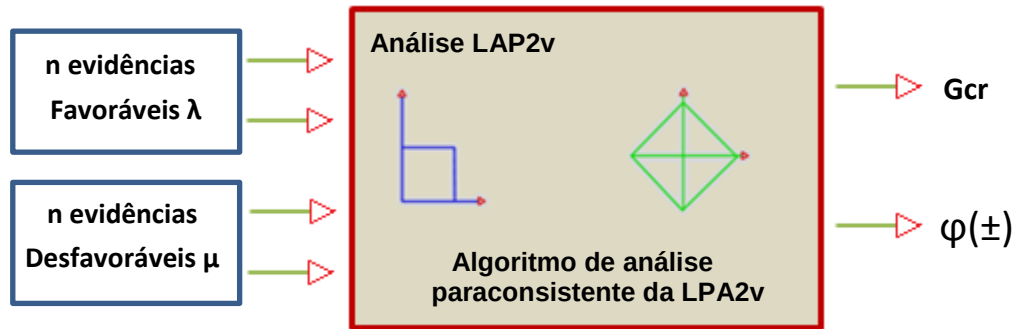


Figura 14 - Representação em bloco de um NAP- nó de análise paraconsistente.
Fonte: Da Silva Filho et al., 2008.

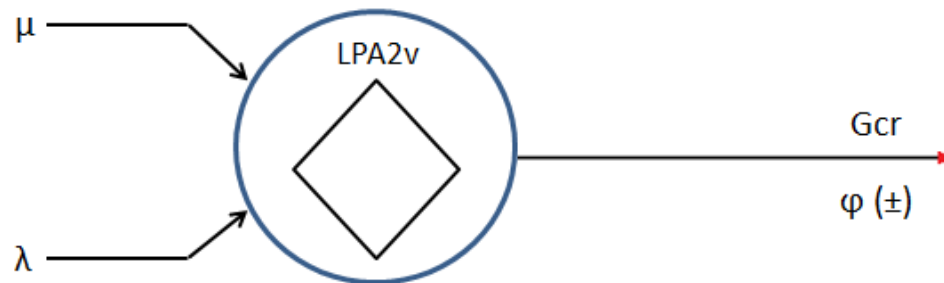


Figura 15 - Representação simbólica de um NAP- nó de análise paraconsistente.
Fonte: Da Silva Filho et al., 2008.

2.2.7 Grau de evidência resultante real (μ_{ER})

Conforme foi visto, uma análise Paraconsistente fornece valores de Grau de Certeza real em faixa de trabalho entre -1 e +1. Para transformar o Grau de Certeza real resultante da análise de uma proposição em Grau de Evidência resultante real (μ_{ER}), de modo que possa ser utilizado como entrada para outro NAP é realizada uma normalização nos seus valores. Assim sendo, se apresentará como grau de evidência resultante real (μ_{ER}) com valores no intervalo entre 0 e 1.

Em um sistema de análise paraconsistente, conforme se fortalece a contradição entre os valores das evidências da entrada, que é representada pelo valor do Grau de Contradição (G_{ct}), ocorre uma diminuição no Grau de Certeza resultante real G_{CR} . Portanto, para um valor de Grau de Contradição alto o Grau de Certeza real se aproximará de zero (DA SILVA FILHO, ABE E LAMBERT-TORRES, 2008).

A figura 16 mostra a equivalência entre os valores dos Graus de Certeza real G_{cr} e os Graus de Evidência resultante real (μ_{ER}).

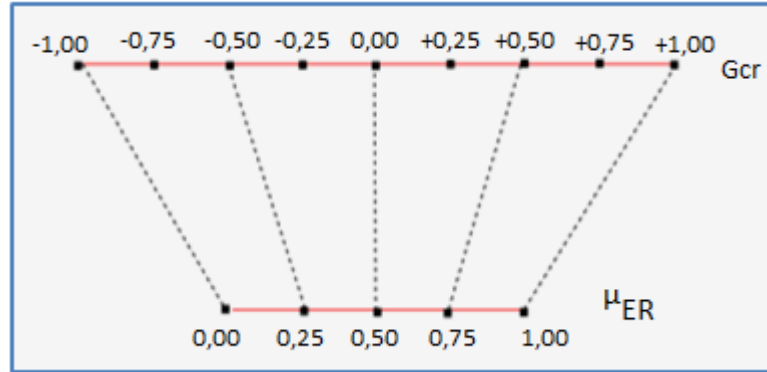


Figura 16 - Equivalência grau de certeza real G_{cr} e o grau de evidência resultante real (μ_{ER}).

Fonte: Da Silva Filho *et al.*, 2008.

O Grau de Evidência resultante real (μ_{ER}) é calculado a partir das equações (26) e (27) e obtido pela equação (28):

$$\mu_{ER} = \frac{G_{cr} + 1}{2} \quad (28)$$

2.2.8 Grau de contradição normalizado (μ_{ctr})

Para se obter uma resposta padronizada em um NAP, é feita uma normalização no Grau de Contradição, assim seus valores resultantes ficarão no intervalo real fechado entre 0 e 1. Desse modo, tendo como base a equação (29), a normalização do Grau de Contradição será realizada pelas equações (30) ou (31):

$$G_{ct} = (\mu + \lambda - 1) \quad (29)$$

$$\mu_{ctr} = \frac{G_{ct} + 1}{2} \quad (30)$$

$$\mu_{ctr} = \frac{\mu + \lambda}{2} \quad (31)$$

Verifica-se a relação entre os valores do Grau de Contradição (Gct) e os valores do Grau de Contradição normalizado (μ_{ctr}) na figura 17.

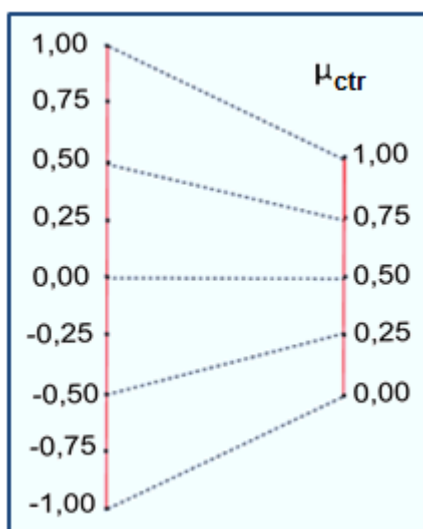


Figura 17 - Conversão do grau de contradição Gct em grau de contradição normalizado μ_{ctr} .

Fonte: Da Silva Filho *et al.*, 2008

Se o valor do Grau de Contradição normalizado (μ_{ctr}) estiver maior que 0,5, quer dizer que existe uma contradição entre os graus de Evidência das variáveis de entrada. Se o valor aumenta, indica que está sendo estabelecido um estado lógico Inconsistente à Proposição analisada. Quando o valor do Grau de Contradição Normalizado for igual a 1,0 ocorre uma contradição total à proposição, portanto o estado lógico será o totalmente Inconsistente.

Quando o valor do Grau de Contradição Normalizado estiver abaixo de 0,5 indica que há uma contradição à proposição analisada. Se os valores de Graus de Contradição Normalizados abaixo de 0,5 estiverem tendendo a zero indicam as evidências contraditórias no sentido de estabelecer um estado lógico de Indeterminação. Quando o valor do Grau de Contradição Normalizado for igual à zero, existe total contradição e o estado lógico é totalmente Indeterminado.

2.3 Nó de análise paraconsistente da LPA2v com saída de grau de evidência resultante real

Segundo Da Silva Filho *et al.* (2008) o sistema ou algoritmo denominado Nó de Análise Paraconsistente (NAP) pode ser obtido nas várias formas de configurações capazes de formar redes para tratamento de incertezas.

Os resultados obtidos nas equações indicam que um NAP pode ser utilizado como gerador de Graus de Evidências para outras proposições que estejam sendo analisadas por outros NAPs, formando assim uma rede de NAPs interligados.

A figura18 apresenta uma representação da análise LPA2v com cálculo do grau de evidência resultante e intervalo de evidência na qual se encontrará no desenvolvimento desse trabalho.

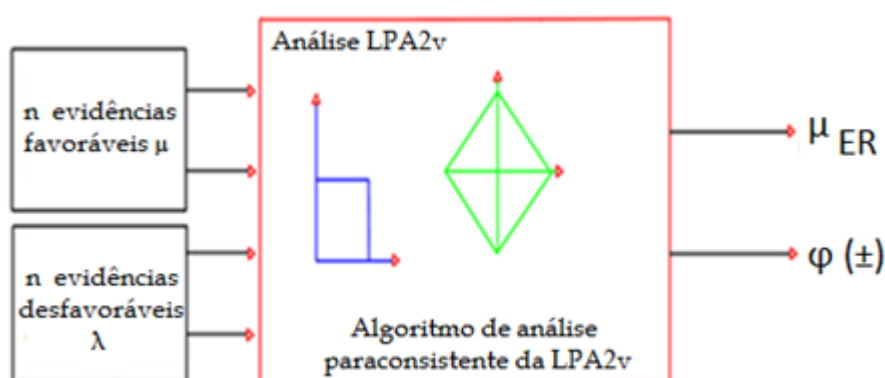


Figura 18 - Representação do algoritmo de análise paraconsistente da LPA2v com cálculo do grau de evidência resultante e intervalo de evidência.

Fonte: Da Silva Filho *et al.*, 2008

Com tal processo de normalização obtém-se na saída de cada NAP um valor de Grau de Evidência resultante real acompanhado de um valor de Intervalo de Evidência resultante.

Assim sendo, a Rede de Análise Paraconsistente (RAP) irá informar um valor de grau de certeza em relação à proposição, controlando e analisando os resultados por meio de realimentação.

O algoritmo de análise paraconsistente para determinação do Grau de Certeza real e do Intervalo de Certeza é exposto na figura 19.

Entre com os valores de Entrada.

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

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

Calcule o grau de Contradição normalizado

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

Calcule o Intervalo de Evidência resultante

$$\varphi E = 1 - |2\mu_{ctr} - 1|$$

Calcule o Grau de Certeza

$$Gc = \mu - \lambda$$

Calcule o Grau de Contradição

$$Gct = ((\mu + \lambda) - 1)$$

Calcule a distância D

$$D = \sqrt{(1 - |Gc|^2) + (Gct)^2}$$

Determine o Grau de Certeza real

Se $Gc > 0$, $Gcr = (1 - D)$

Se $Gc < 0$, $Gcr = (D - 1)$

Determine o sinal de saída

Se $\varphi E < 0,25$ ou $D > 1$, então, faça

$S1 = 0,5$ e $S2 = \varphi E(\pm)$: Indefinição e vá para o item 12.

Senão vá para o próximo item.

Calcule o Grau de Evidência resultante real

$$\mu_{ER} = \frac{Gcr + 1}{2}$$

Determine a sinalização do Intervalo de Evidência resultante

Se $\mu_{ctr} < 0,5$, sinalize negativo $\varphi = \varphi E(-)$

Se $\mu_{ctr} > 0,5$, sinalize positivo $\varphi = \varphi E(+)$

Se $\mu_{ctr} = 0,5$, sinalize negativo $\varphi = \varphi E(0)$

Apresente os resultados na saída

Faça $S1 = \mu_{ER}$ e $S2 = \varphi E(\pm)$

Fim.

Figura 19 - Algoritmo de análise paraconsistente para determinação do Grau de Certeza real e do Intervalo de Certeza.

3. SISTEMA DE CONTROLE MATLAB SIMULINK

3.1 Controle PI (s) *Matlab Simulink*

Segundo Campos e Teixeira (2010) o controlador do tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é, certamente, o mais usado em estratégias de controle convencionais e avançadas na área industrial.

No *software Matlab* encontra-se recursos de algoritmos para implementar um controlador de tempo contínuo ou discreto (PID, PI, PD, P ou I) no seu modelo *Simulink* e funções na qual pode-se simular estratégias de controle simples e avançadas em malha aberta e fechada, ou seja, não somente simular uma malha simples de controle, mas controlar em regime contínuo (t) estratégias avançadas e simples de controle (NORMAN, 2012).

As opções configuráveis no bloco PID do *Matlab Simulink* incluem:

- (a) Tipo de controlador (PID, PI, PD, P ou I)
- (b) Forma do controlador (Paralelo ou Ideal)
- (c) Domínio de tempo (contínuo ou discreto)
- (d) Condições iniciais e reset trigger
- (e) Limites de saturação de saída
- (f) Rastreamento de sinal para transferência de controle sem *bumpless* e controle *multiloop*.

Na implementação comum, utilizando a plataforma *Simulink Matlab*, principalmente versões atuais, consegue-se implementar as formas principais do Algoritmos PID, conforme as equações (32), (33) e (34), em diversas estratégias de controle.

Forma Ideal (padrão ISA)

$$mv(t) = KC \left[e(t) + \frac{1}{Tr} \int e(t) + Td \frac{de}{dt} \right] + mv0 \quad (32)$$

Forma Série (Interagente)

$$mv(t) = KC \left[e(t) + \frac{1}{Tr} \int e(t) \right] \left[1 + Td \frac{de}{dt} \right] + mv0 \quad (33)$$

Forma Paralela

$$mv(t) = KC e(t) + Ki \int e(t)dt + Kd \frac{de}{dt} + mv0 \quad (34)$$

Em que:

$mv(t)$ é o Valor da saída do controlador no instante “t”;

$e(t)$ é o erro do controlador;

KC é o ganho proporcional do controlador;

Kd é o ganho derivativo;

Tr é o tempo integral do controlador;

Td é o tempo derivativo do controlador;

$mv0$ é o Valor inicial da saída do controlador.

Segundo GARCIA (2013), o software trabalha com uma linguagem de programação de alto-nível, em um ambiente interativo, para o desenvolvimento de algoritmos, análise e visualização de dados e computação numérica. Próprio para as áreas técnicas e científicas, o software tem funções de tratamento numérico de alto desempenho, capazes de resolver problemas computacionais técnicos de forma mais eficiente do que as tradicionais linguagens de programação.

Conforme demonstram as figuras 20 e 21, o bloco PID(s) contínuo do *Matlab Simulink* pode ser parametrizado para as equações (35), (36) e (37) em diversas estratégias avançadas de controle utilizadas em processos industriais.

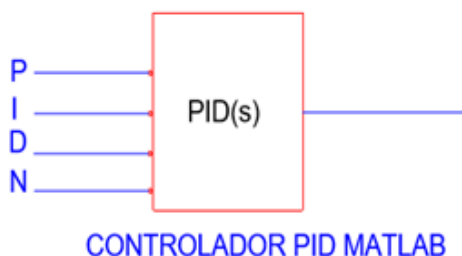


Figura 20 - Representação do PID(s) contínuo *Matlab Simulink*.

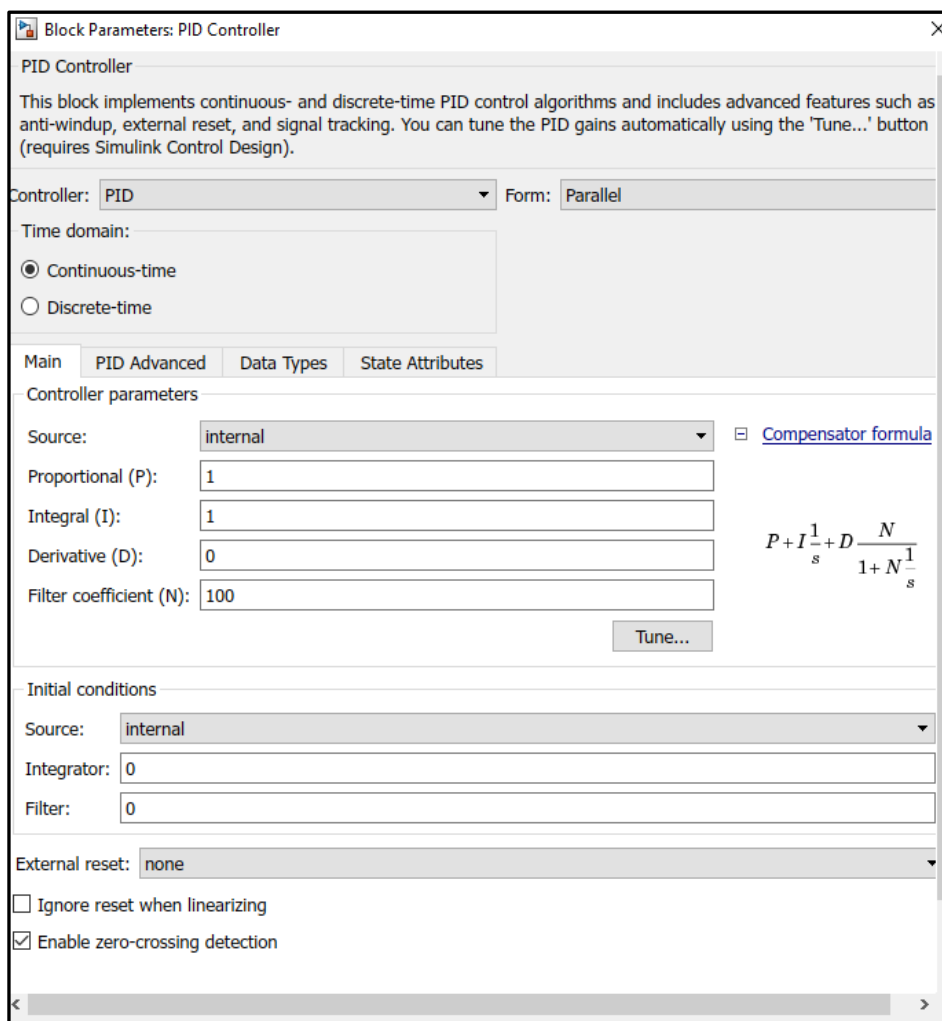


Figura 21 - Representação da estrutura interna do PID(s) contínuo Matlab Simulink.

No Matlab *Simulink* a estrutura do PID tem opção de ação proporcional e/ou derivativa no erro ou somente na PV (variável de processo), com isso evita o “overshoot” (variação superior ao SPL(s) e SPR(s)) em mudança de *Set point* inserido pelo especialista do processo sem que ultrapasse os limites da variação da variável de 3 a 5% (OGATA, 2011).

Normalmente os algoritmos PID comerciais apresentam um filtro na ação derivativa com a finalidade de reduzir o efeito do ruído externo que irá interagir sobre a controlabilidade do *Matlab* no processo industrial, tal parâmetro (N- Filtro derivativo) é representado nas figuras 21 e 22, que demonstram a estrutura de parametrização do PDI(s) contínuo.

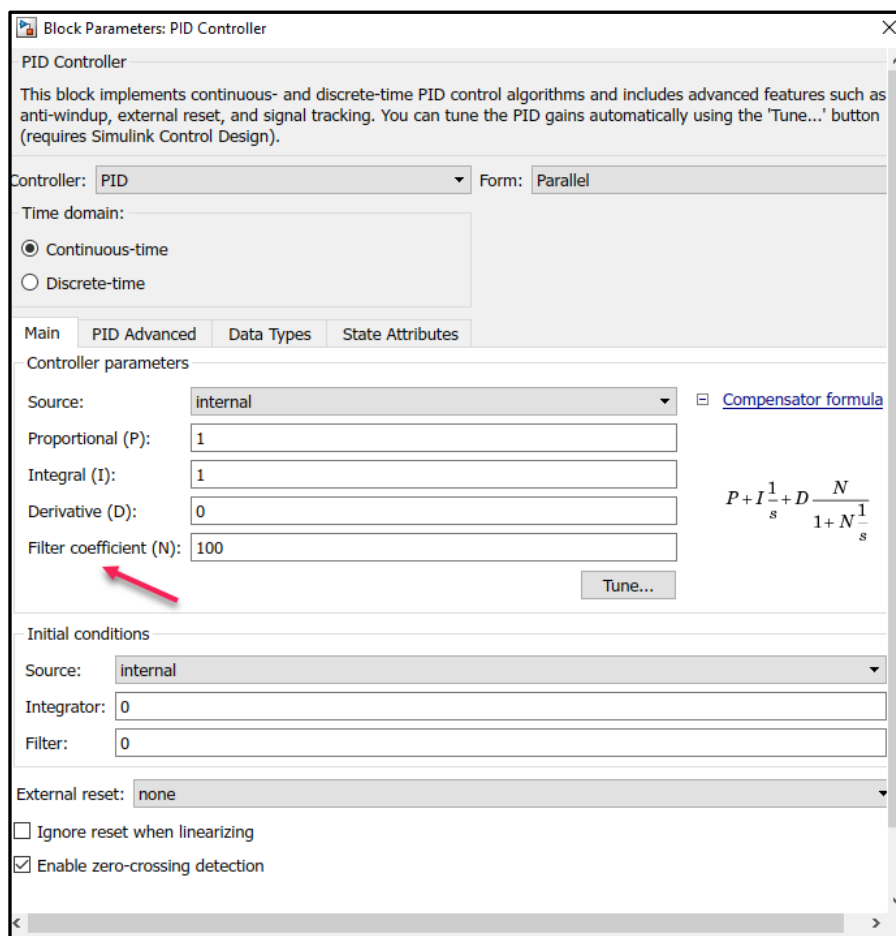


Figura 22 - Representação da estrutura interna do PID(s) contínuo Matlab Simulink filtro N – derivativo.

O diagrama de blocos demonstrado na figura 23 representa um controlador PID(s) ideal dependente, também conhecido como PID do tipo ISA. É possível perceber que no termo responsável pelo ganho proporcional atuará no componente integrale e na derivativa.

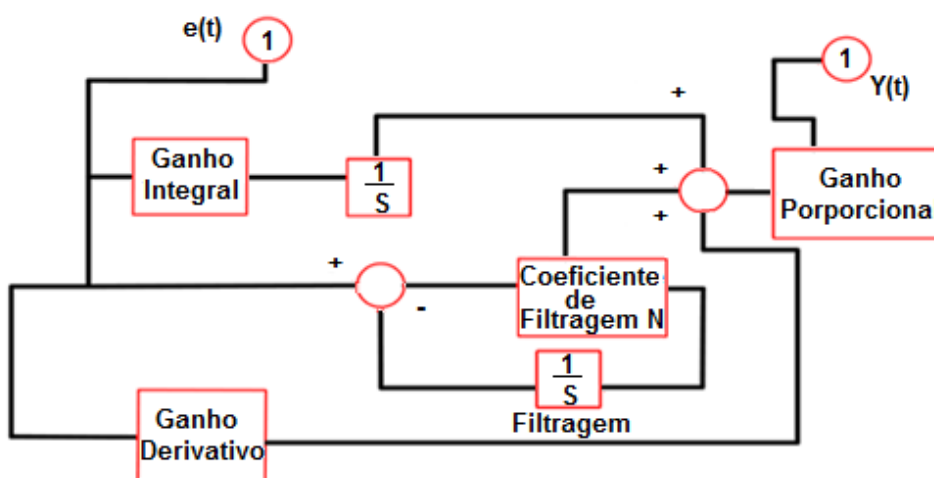


Figura 23 - Representação da estrutura interna do PID(s) ideal contínuo Matlab Simulink.

O Controlador PID Ideal *Matlab Simulink* seleciona uma forma de controlador na qual o ganho proporcional P atua na soma de todas as ações. As funções de transferência são as mesmas usadas na forma paralela, exceto P, pois multiplica todos os termos. Para um controlador PID ideal de tempo contínuo, a função de transferência é apresentada na equação (35).

$$y(s) = Pe(s) \left[1 + I \left(\frac{1}{s} \right) + D \left(\frac{Ns}{s+N} \right) \right] + y_0 \quad (35)$$

Onde:

$y(s)$ é o valor da saída do controlador no instante “s”;

$e(s)$ é o erro do controlador ;

P é o ganho proporcional do controlador;

I é o ganho integral do controlador;

D é o ganho derivativo do controlador;

y_0 é o valor inicial da saída do controlador;

N é o coeficiente de Filtro disponível para controladores PID e PD, quando se verifica o uso da derivada filtrada.

No diagrama de blocos da figura 23 é representado um controlador com estrutura PID(s) contínuo *Matlab Simulink* paralelo. Nesse controlador, o efeito das ações proporcional, integral e derivativa atuam diretamente sobre o erro de forma independente, portanto, nesse caso o ganho proporcional não interfere sobre as componentes da integral e derivativa.

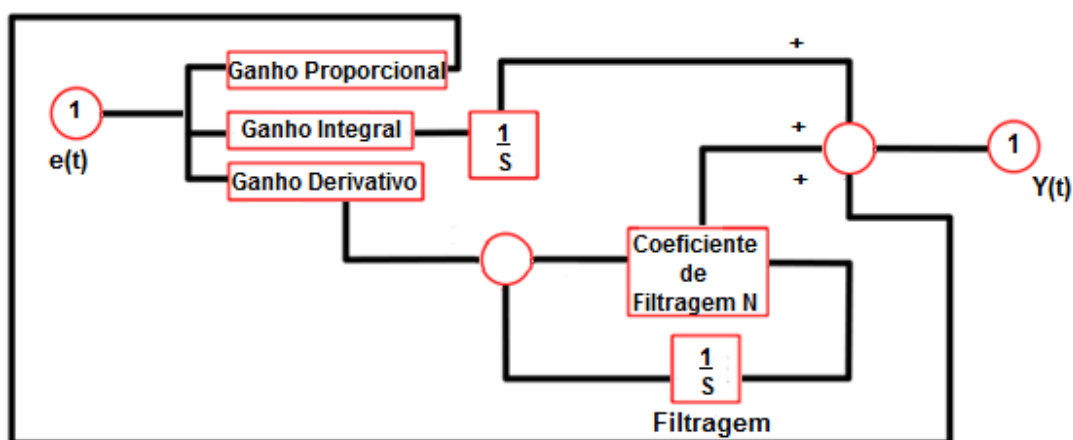


Figura 24 - Representação da estrutura interna do PID(s) paralelo contínuo *Matlab Simulink*.

Para um controlador PID paralelo em tempo contínuo, a função de transferência é apresentada na equação (36):

$$y(s) = \left[P e(s) + I \left(\frac{1}{s} \right) e(s) + D e(s) \left(\frac{Ns}{s} + N \right) \right] + y_0 \quad (36)$$

Em que:

$y(s)$ é o valor da saída do controlador no instante “t”;

$e(s)$ é o erro do controlador;

P é o ganho proporcional do controlador;

I é o ganho integral do controlador;

D é o ganho derivativo do controlador;

$y_0 = I_0$ é o valor inicial da saída do controlador ;

N é o Coeficiente de Filtro disponível para controladores PID e PD.

3.2 Controle de razão

Controle de Relação ou Razão é definido como uma estratégia de controle PI(s) na qual uma variável é manipulada para mantê-la a uma razão de outra. Este tipo de controle é comumente utilizado para a manutenção de dois ou mais fluxos em uma determinada proporção. Isso ocorre, por exemplo, em sistemas de combustão, onde a relação entre fluxos de ar e combustível devem respeitar a proporção estequiométrica. Outra finalidade para a aplicação da estratégia de controle de Razão e seguidor de PV é em processos onde uma proporção exata de ingredientes ou insumos deve ser adicionada a um tanque de produto. Ou ainda, na adição de reagentes em reatores, conforme o diagrama de blocos da figura 25.

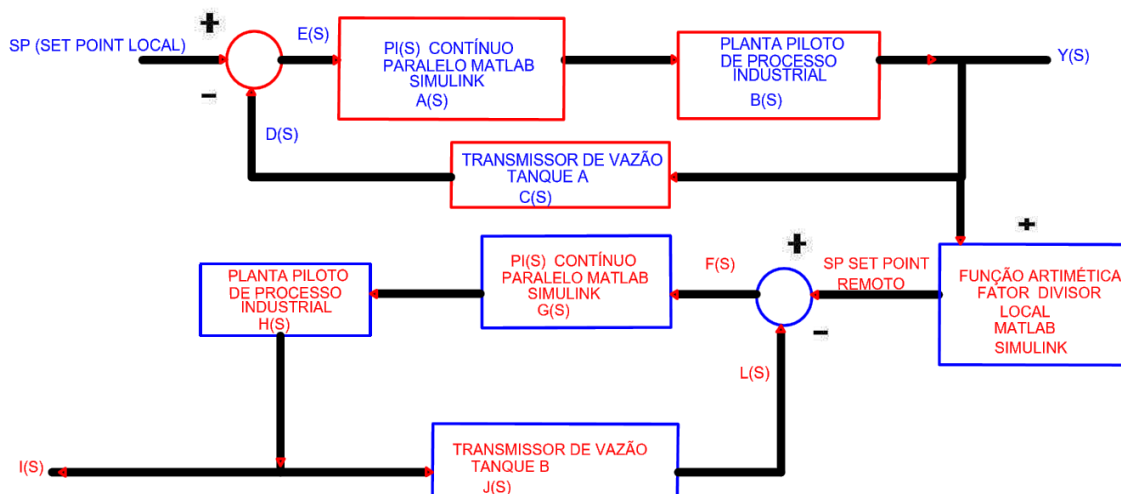


Figura 25 - Representação da estratégia de controle razão e seguidor de PV com PI(s).

Nesse trabalho o controle de razão será implementado com a utilização da Plataforma *Matlab Simulink* e será utilizado para a manutenção da proporção entre duas ou mais variáveis em um processo de nível. Para isto será desenvolvida a estratégia de controle de Razão e seguidor de PV utilizando o controlador PI(s) contínuo paralelo *Matlab Simulink*.

Devido à interação independente do ganho proporcional, integral e derivativo com relação ao erro $E(s)$ e a função de transferência $F(s)$ referente à figura 25 é apresentada nas equações (37) a (44):

$$y(s) = L(s) - F(s) \quad (37)$$

$$I(s) = F(s)G(s)H(s) \quad (38)$$

$$L(s) = J(s)I(s) \quad (39)$$

$$F(s) = y(s) - I(s)J(s) \quad (40)$$

$$F(s) = y(s) - F(s)G(s)H(s) \quad (41)$$

$$y(s) = F(s)G(s)H(s) + F(s) \quad (42)$$

$$y(s) = F(s)(G(s)H(s) + 1) \quad (43)$$

$$F(s) = \frac{Y(s)}{G(s)H(s)+1} \quad (44)$$

Em que:

$E(s)$ é o erro(SP-PV) entrada PI(s) contínuo paralelo *Matlab Simulink* (A(s));

$B(s)$ é a função de transferência planta processo A (vazão produto tanque A);

$C(s)$ é o transmissor de vazão tanque A ;

$J(s)$ é o transmissor de vazão tanque B ;

$F(s)$ é o erro (SP-PV) entrada PI (s) contínuo paralelo *Matlab Simulink* (G(s));

$H(s)$ é a função de transferência planta processo B (vazão produto tanque B);

$I(s)$ é o valor da saída do controlador PI(s) contínuo paralelo *Matlab Simulink* A(s) vazão do produto tanque A no instante “t”;

$y(s)$ é o valor da saída do controlador PI(s) contínuo paralelo Matlab Simulink G(s) vazão do produto tanque B no instante “t”.

O presente trabalho foi elaborado em função da equação (44) com a finalidade de utilizar o PI(s) contínuo paralelo em função de $Y(s)$ e $G(s)$ e a constante de tempo $H(s) + 1$ para estabelecer o erro $F(s)$ nulo para o SP (*Set point* local) estabelecido pelo especialista do processo.

No PI(s) contínuo paralelo Matlab *Simulink* a fonte do ganho do controlador pode ser inserido na caixa de diálogo do bloco ou permitir entradas de sinais externos para ativar a função de transferência e os cálculos do PI(s) contínuo ideal ou paralelo.

Para este trabalho, o ganho proporcional P e integral I serão parâmetros externos utilizados como entrada de ganho externo para implementar o controle PI(s) contínuo paralelo, no qual os valores dos ganhos do controlador são determinados por lógica ou outro cálculo no modelo *Simulink* e passados para o sistema bloqueado de controle para estabelecer a função $F(s) = \frac{Y(s)}{G(s)H(s)+1}$ ao valor desejado.

3.3 OPC tool box e Matlab Simulink

Os OPCs são classificados em duas categorias: Clientes e Servidores.

Cliente OPC é tipicamente um usuário dos dados, tais como uma *Interface* de Operação ou um Sistema supervisório (SCADA – sistema de controle e aquisição de dados).

O Servidor OPC é uma fonte de dados coletados ou gerados a partir de um processo, disponibilizando-os aos Clientes OPC.

Para as aplicações o Cliente OPC sempre interage com o Servidor OPC usando *interface* e rede bem definida.

Os Clientes OPC's podem se comunicar com qualquer Servidor OPC, independentemente do tipo de instrumento e fabricante.

Há diferentes tecnologias OPC. O OPC tool box Matlab *Simulink* utiliza a comunicação *Data Access* (OPC-DA), e tem como função ler, escrever e registrar dados OPC de dispositivos, tais como sistemas de controle distribuído, controle de supervisão e sistemas de aquisição de dados e controladores lógicos programáveis. Interage com dados de servidores ativos e historiadores de dados que estejam em acordo com o Padrões: *Data Access* (OPC-DA), Acesso Histórico de Dados (OPC-HDA) e Arquitetura Unificada (OPC-UA).

3.4 OPC tool box e o Bloco Simulink

O *OPC tool box* que contém blocos *Simulink* permite modelar um controle de supervisão *on-line* e executar testes de controle de *hardware-em-loop*, verificando a qualidade de funcionamento *on-line* dos instrumentos para aquisição de dados e escrita em elementos finais de controle.

A arquitetura *OPC tool box* é formada por três objetos básicos: servidor, grupo e item, conforme demonstra-se na figura 26.

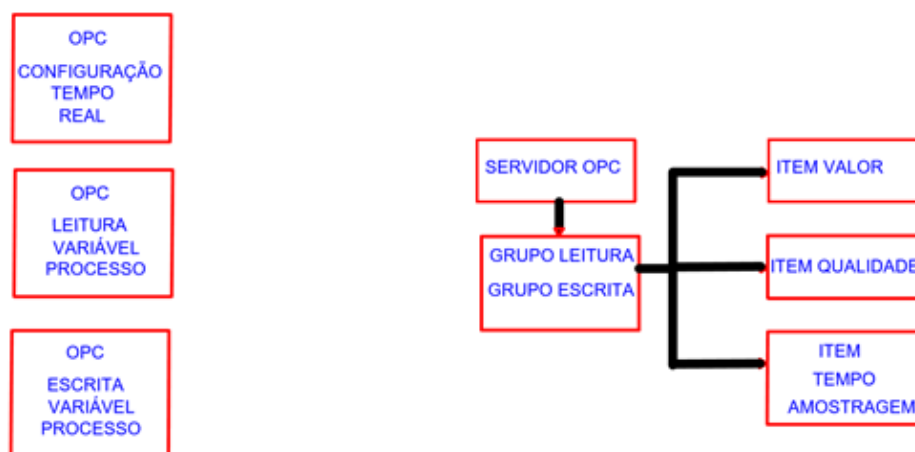


Figura 26 - Representação da arquitetura OPC tool box.

Os servidores *OPC* dos fabricantes tem por responsabilidade a implementação de uma estrutura de endereçamento capaz de associar itens com variáveis reais.

O item é uma estrutura associada a três propriedades:

- 1) Value: Último valor armazenado pelo servidor no cache de memória do item. É atualizado sempre que o servidor faz uma leitura no dispositivo;
- 2) Quality: Informação de estado que define a qualidade do dado. Pode ser: *Good* – Dado válido; *Bad* – perda do *link* de comunicação com o dispositivo de campo e *Uncertain* – no caso de existir o *link* e o dispositivo de campo estar fora de comunicação;
- 3) Time Stamp: Tempo de amostragem.

Para acessar os dados do servidor *OPC*, de diversos fabricantes, é disponibilizado o bloco de configuração *OPC* em tempo real (figura 27) onde é exibida a estrutura de parametrização do *OPC cliente*.

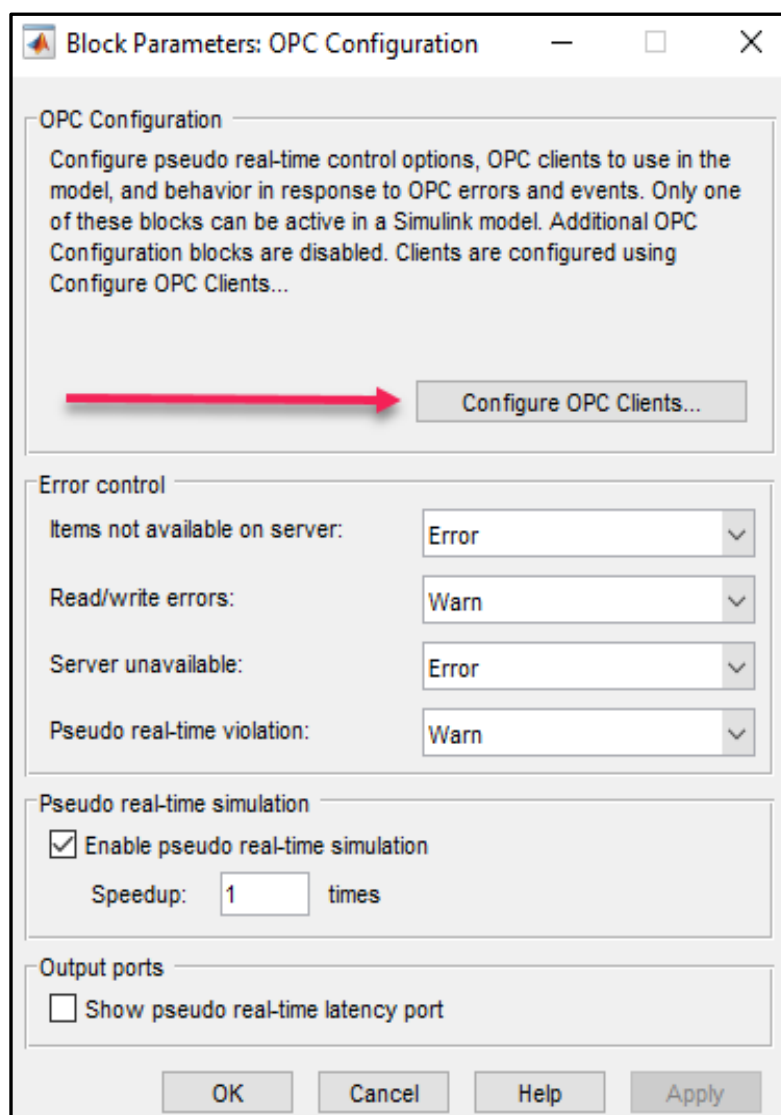


Figura 27 - Representação da arquitetura e configuração OPC tool box cliente.

Os grupos são responsáveis por informar pedidos de leitura e escrita, além de enviar atualizações para seus clientes periodicamente.

Tais informações de atualização podem ser ativadas ou desativadas no grupo ou nos itens individuais.

Os grupos presentes em um servidor *OPC* são normalmente definidos pelos clientes, e apenas o cliente criador do grupo pode acessá-los, conforme demonstra a figura 28.

Na figura 28 é exibida a estrutura de configuração do *OPC* de leitura de dados das variáveis de processo.

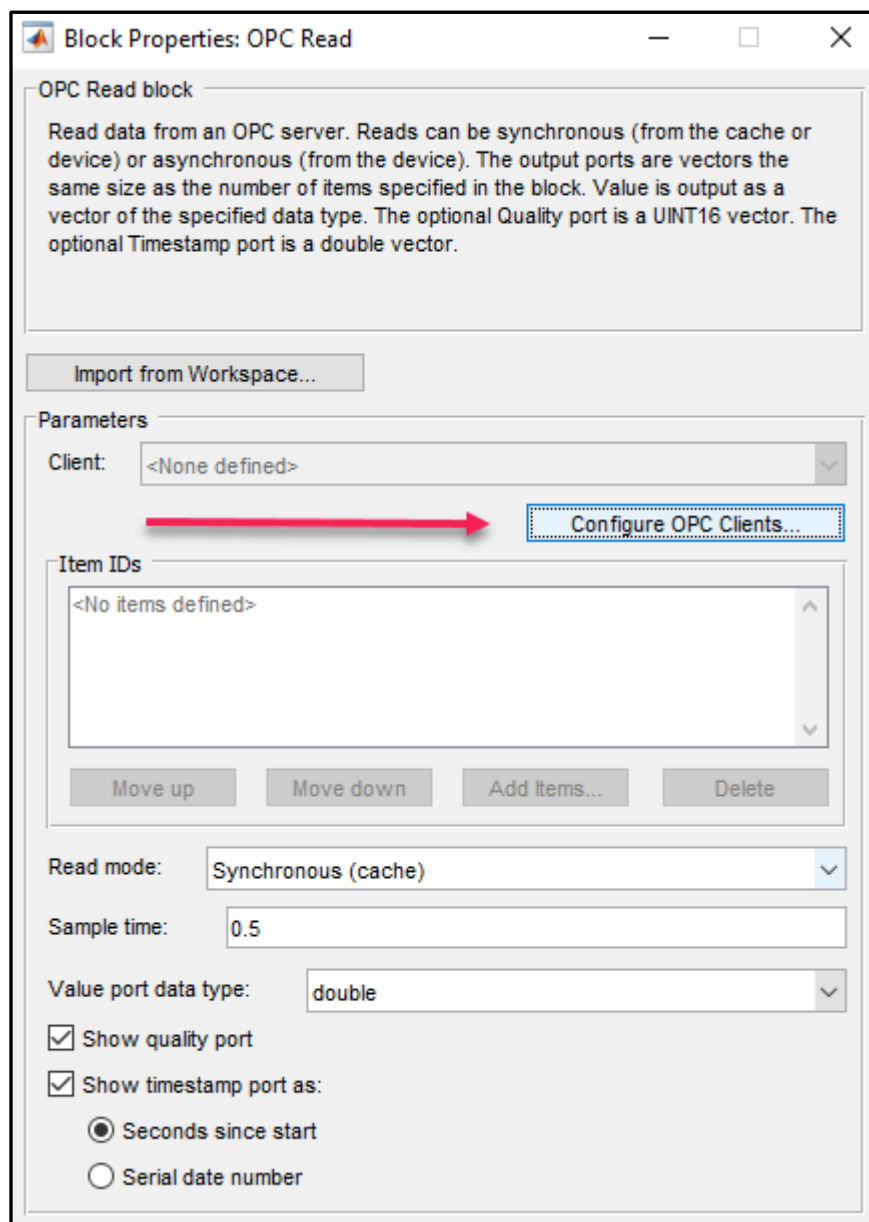


Figura 28 - Representação da configuração OPC *tool box* leitura da variável a ser monitorada em tempo real.

Neste trabalho, por meio do *OPC tool box*, os valores atualizados *on-line* (uma lista dos dados de variáveis) de um servidor *OPC* no banco de dados serão utilizados como histórico de dados *HDA* para futuro processamento.

O *tool box* oferece diversas maneiras de trazer um ou mais registros para o espaço de trabalho, onde poderá ser realizada uma análise ou visualização de tais dados.

O *HDA também* está relacionado às variáveis de leitura e escrita de acordo com a parametrização de leitura das variáveis, conforme figuras 28 e 29.

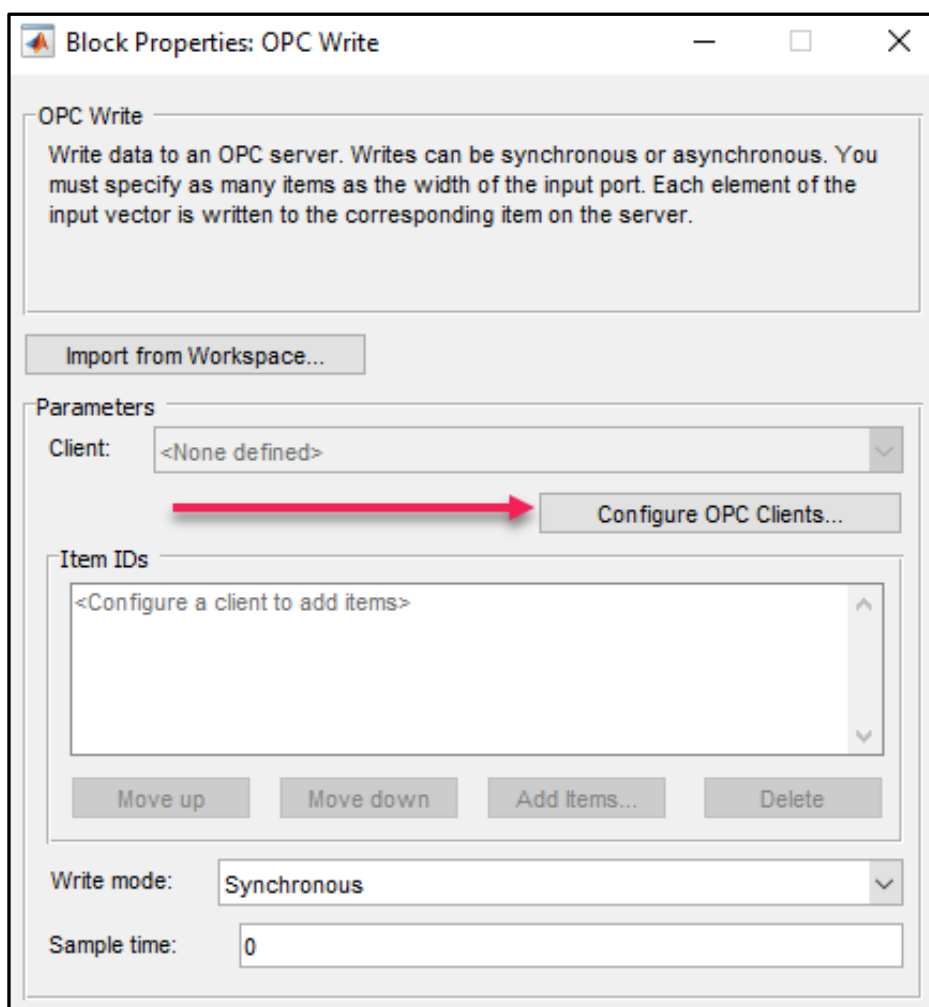


Figura 29 - Representação da configuração OPC tool box escrita da variável a ser monitorada em tempo real.

Como o *OPC tool box Matlab Simulink* permite um método consistente de acesso aos dados de incontáveis instrumentos dos mais diversos fabricantes, independente da origem das variáveis de dados, o usuário final terá uma maior liberdade na escolha dos equipamentos, independentemente da disponibilidade de *drivers* de comunicação proprietários.

Conforme será visto a seguir, este sistema será implantado em uma planta piloto onde os elementos finais de controle são inversores de frequência integrados aos motores e bombas centrífugas referentes a dois tanques nomeados: Tanque A e Tanque B.

4 PLANTA PILOTO DE PROCESSO INDUSTRIAL

A planta didática onde foi implantado o controle de razão para esta pesquisa está atualmente instalada no laboratório de controle de processos industriais no SENAI de Santos-SP. Foi projetada para o estudo das diversas tecnologias da instrumentação e controle de processos em um sistema de transferência de água e em sistemas de três tanques, que podem controlar duas das principais variáveis da instrumentação industrial: nível e vazão. A planta piloto é mostrada na figura 30.



Figura 30 - Visual geral da planta piloto de processo industrial.

4.1 Controle de nível do vaso TQ-103

Neste trabalho optou-se por controlar a pressão hidrostática no TQ-103, manipulando-se a vazão obtida pela estratégia em controle de razão de fluxo para os TQ-101 e TQ-102, o que mantém constante o seu nível.

O LIT102 será parametrizado para o $\Delta P(0\%) \sim \Delta P(100\%)$, fornecendo o grau de evidência favorável em 4 a 20mA, para pressão hidrostática exercida na tomada de impulso H e L do LIT 102 de 650 mmH₂O a 1370 mmH₂O.

4.2 Controle de vazão do vaso TQ-101 e TQ-102

A estratégia de controle de razão e o seguidor de variável de processo adotado podem ser observados na figura 32.

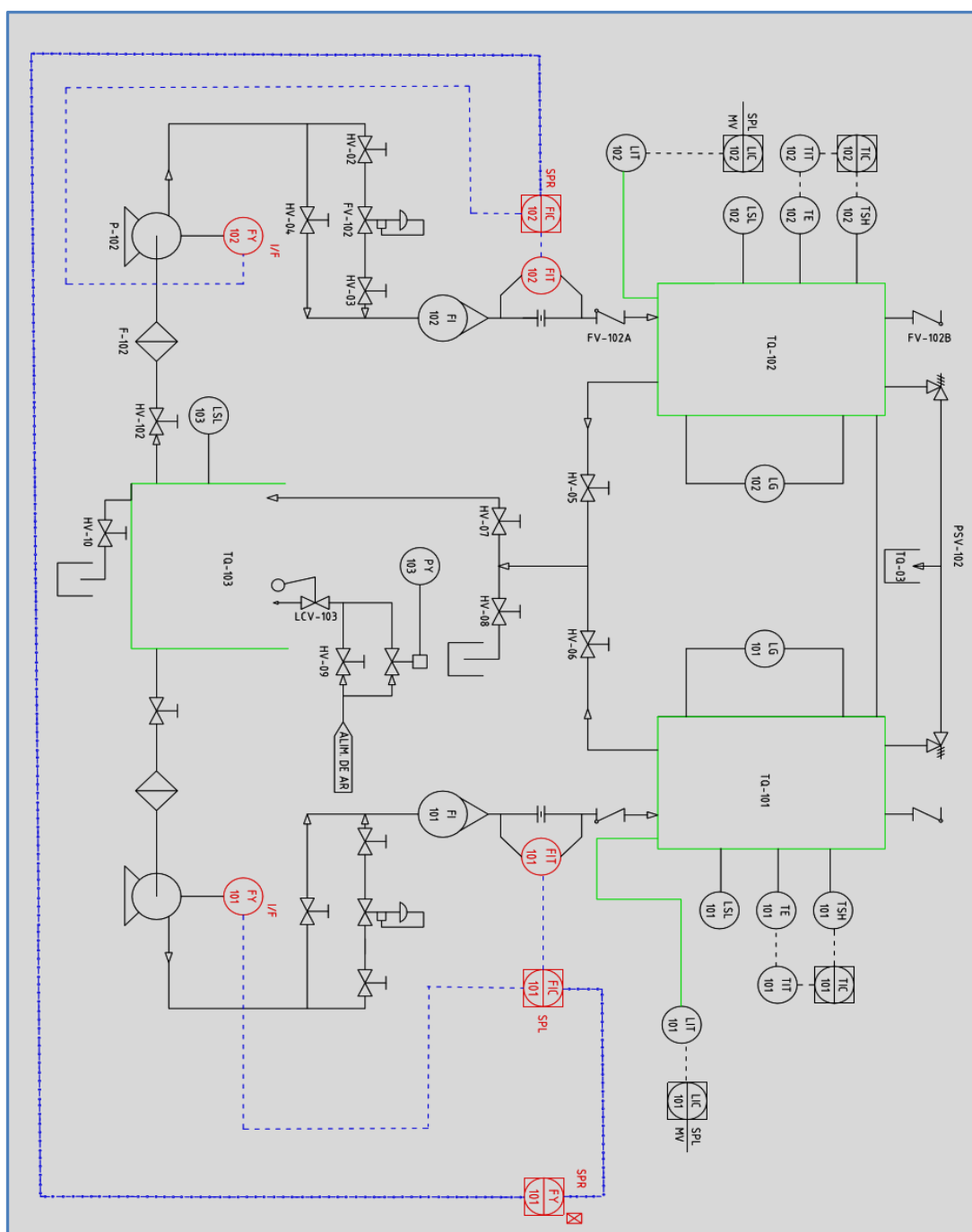


Figura 32 - Estratégia de controle razão e seguidor de variável de processo.

O sinal de saída do transmissor de vazão FIT- 101 será à entrada da função aritmética de multiplicação $FY-101(x)$ e do controlador de vazão FIC-101 referente ao TQ-101.

O especialista do processo define o fator de razão (multiplicação) do seguidor de vazão do produto A em fase estacionária no TQ-101, o sinal resultante do FY-101 (x) estabelece o valor do *Set point* remoto (SPR) do FIC 102, controlando a vazão do produto armazenado no TQ-102.

A saída $y(s) = \left[Pe(s) + I \left(\frac{1}{s} \right) e(s) \right] + y_o$ do controlador PI(s) paralelo *Matlab* FIC-101 será aplicada ao inversor de frequência $FY - 101^{\frac{I}{F}}$, devido à telemetria existente entre o *OPC tool box*, escrita da variável $y(s)$ e o hardware de saída analógica do controlador FIC-101 implementado em um equipamento do fabricante *SMAR* modelo CD600.

Neste equipamento CD600, a parametrização do *OPC SERVER* descrito nas figuras 27, 28 e 29 está conectada ao *OPC CLIENT* do *OPC toolbox Matlab Simulink* exibido nas figuras 33, 34, 35.

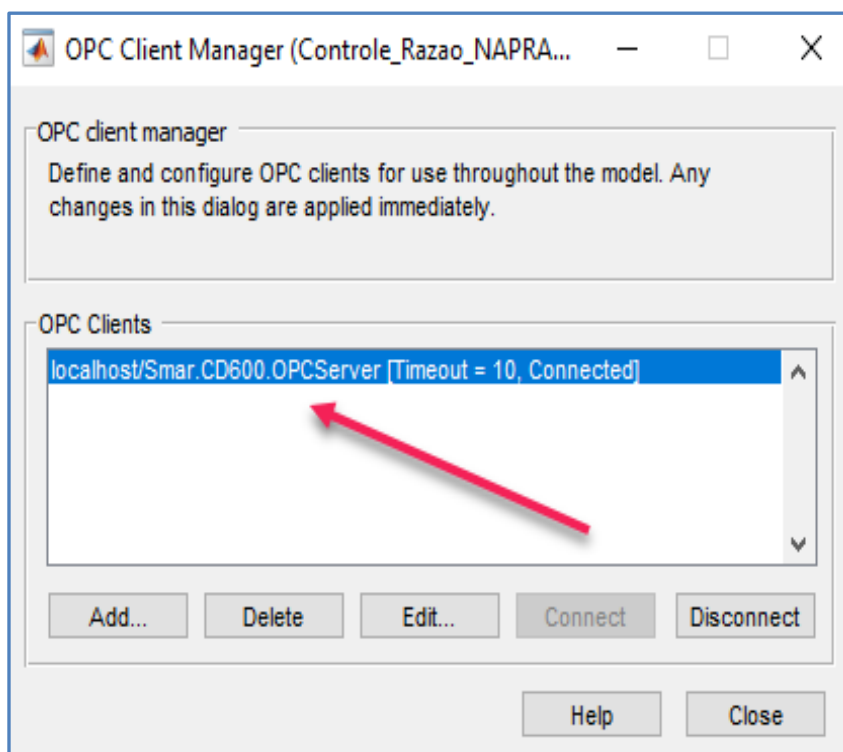


Figura 33 - Representação da configuração *OPC CLIENT tool box Matlab* com *OPC SERVER CD 600 SMAR*.

A medição de vazão do produto dos tanques TQ-101 e TQ-102 é de fundamental importância para linearização da vazão coletada pelo *OPC CLIENT* utilizada para o controle de razão e a otimização pelo algoritmo LPA2v conforme figura 33.

Neste trabalho, a medição de nível é coletada via *OPC CLIENT* e *OPC SERVER* CD 600 SMAR devido à necessidade da Rede de Análise Paraconsistente (RAP) utilizada no projeto e à função matemática de medição de nível utilizada e parametrizada nos transmissores de nível dos tanques (TQ-101 e 102).

Vale destacar que a parametrização está descrita nas equações (45), (46), (47) e (48).

A figura 34 apresenta a representação da configuração *OPC CLIENT tool box* Matlab com *OPC SERVER* CD 600 SMAR para medição de vazão FIT-101.

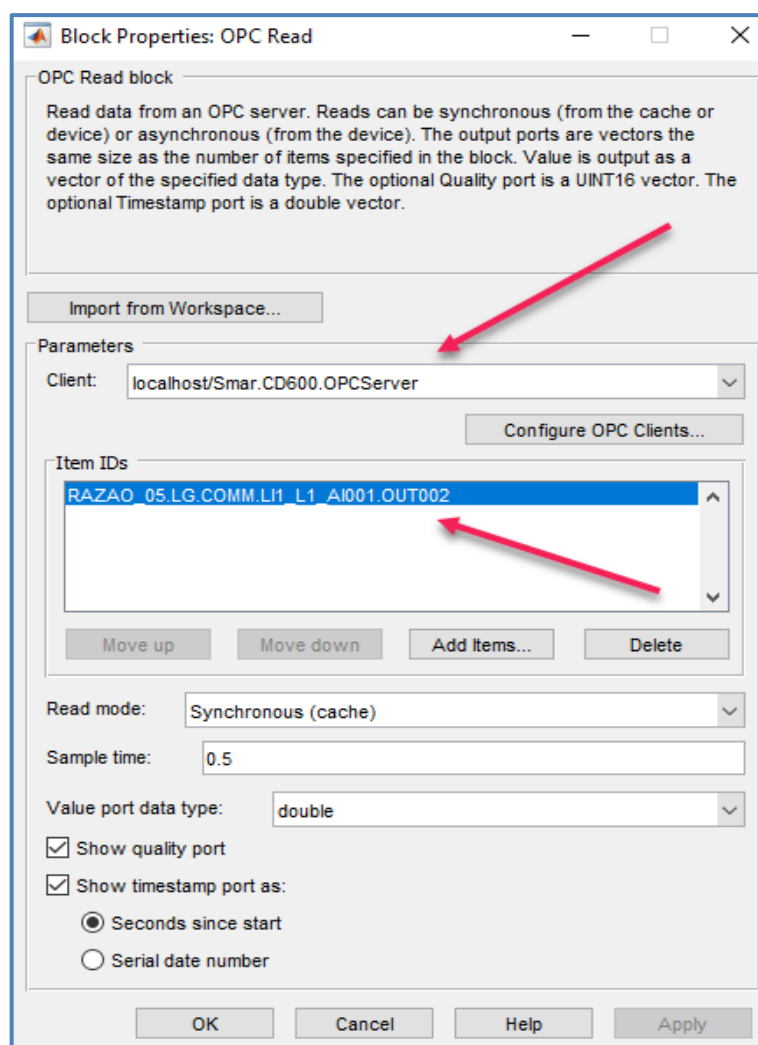


Figura 34 - Representação da configuração OPC CLIENT tool box Matlab com OPC SERVER CD 600 SMAR para medição de vazão FIT-101.

Na figura 35 é exibida a representação da configuração *OPC CLIENT tool box Matlab* com *OPC SERVER CD 600 SMAR* utilizado para a medição de vazão FIT-102.

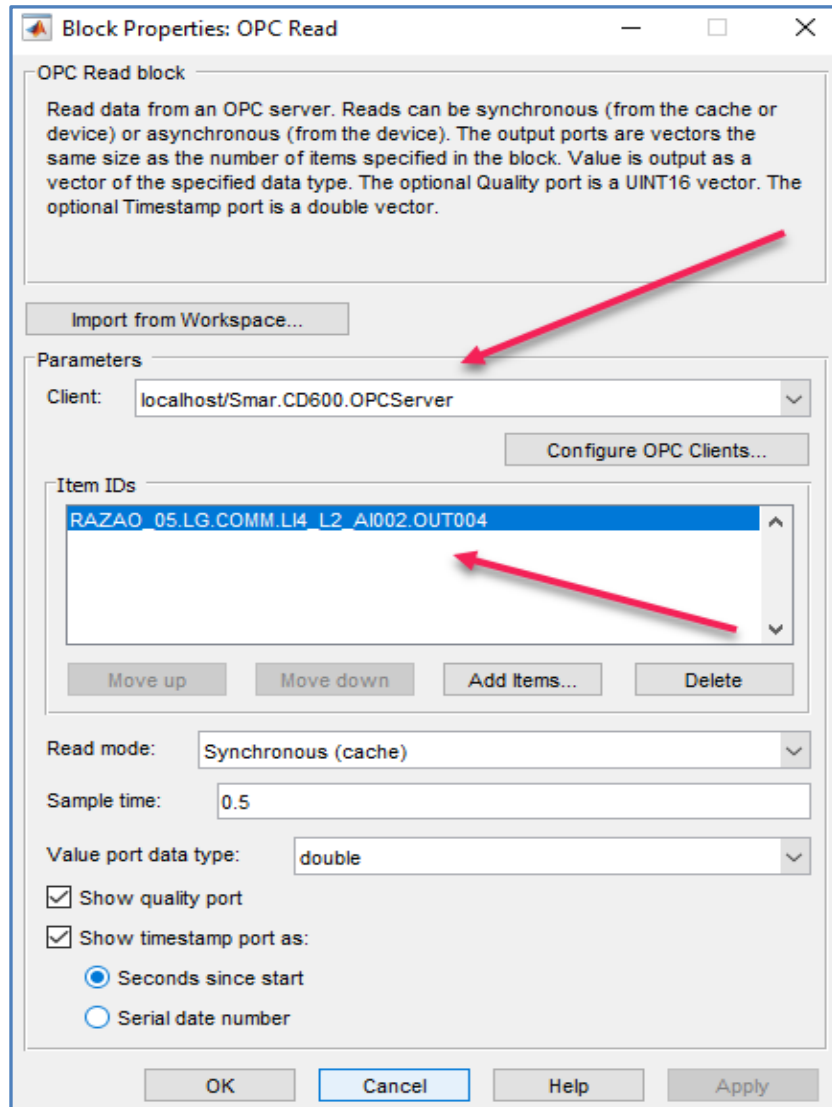


Figura 35 - Representação da configuração OPC CLIENT tool box Matlab com OPC SERVER CD 600 SMAR para medição de vazão FIT-102.

A função de transferência de primeira ordem utilizada na leitura medição de nível em função de L_1 e L_2 para TQ-101, L_3 e L_4 , referente à TQ-102, altura hidrostática atuante em LIT-101 e LIT-102, é feita pelo *OPC CLIENT tool box Matlab Simulink* a partir da equação (49):

$$qi(t). \rho. (t) - q(t). \rho(t) = A. \rho(t). \frac{d}{dt} h(t) \quad (49)$$

Em que:

- q_i é a vazão volumétrica de entrada TQ-101 e TQ-102;
- q é a vazão volumétrica de saída TQ-101 e TQ-102;
- A é a área da seção transversal TQ-101 e TQ-102;
- P é a massa específica do produto contido em TQ101 e TQ102;
- R é a resistência de atrito a passagem de fluxo pela HV-05 e Hv-06;
- t é o tempo morto do processo.

Aplicando os conceitos de Transformada de *Laplace*, obtém-se a função de transferência para leitura da pressão hidrostática pelo *OPC CLIENT tool box* Matlab *Simulink*, representada na equação (50). Obtida a partir da simplificação da equação (49) por meio das equações de (51) a (62):

$$q(s).R.\frac{1}{1+s.R.A} = h(s) \quad (50)$$

$$q(t) = \frac{h(t)}{R} \quad (51)$$

$$q_i(t).\rho.(t) - \frac{h(t)}{R}.\rho(t) = A.\rho(t).\frac{d}{dt}h(t) \quad (52)$$

$$q_i(t).\rho(t).R - h(t).\rho(t) = R.A.\rho(t).\frac{d}{dt}h(t) \quad (53)$$

$$q_i(t).R - h(t) = A.\rho.R.\frac{d}{dt}h(t) \quad (54)$$

$$q_i(t).R = R.A.\frac{d}{dt}h(t) + h(t) \quad (55)$$

$$h(0) = 0 ; \dot{h}(0) = h \quad (56)$$

$$q(t).R = R.A.\dot{h} + h \quad (57)$$

$$\dot{h} = \frac{dh(t)}{dt} \quad (58)$$

$$q(t).R = R.A.s.h(s) - h(0) + h(s) \quad (59)$$

$$q(s).R = R.A.s.h(s) - 0 + h(s) \quad (60)$$

$$q(s).R = h(s).(s.R.A + 1) \quad (61)$$

$$\frac{q(s).R}{s.R.A+1} = h(s) \quad (62)$$

A equação (63), no presente trabalho, exerce importante papel no logaritmo da rede paraconsistente LPA2v, eis que desenvolve a simulação de medição de nível de um tanque em função da resistência R de atrito e vazão de entrada do TQ-10.

$$q(s).R. \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)}\right) = h(t) \quad (63)$$

Em que:

t = tempo morto: atraso de tempo para leitura e atualização da telemetria do LIT-101 e LIT-102 para o *OPC CLIENT tool box* Matlab Simulink.

τ = constante de tempo 63,2% para processo de primeira ordem, calcula-se o valor de ΔPV correspondente a uma constante de tempo, que equivale a 63,2% de ΔPV_{max} de estabilização após um distúrbio no processo.

A figura 36 apresenta o fluxograma e telemetria para a leitura do *OPC CLIENT tool box* com LIT-101.

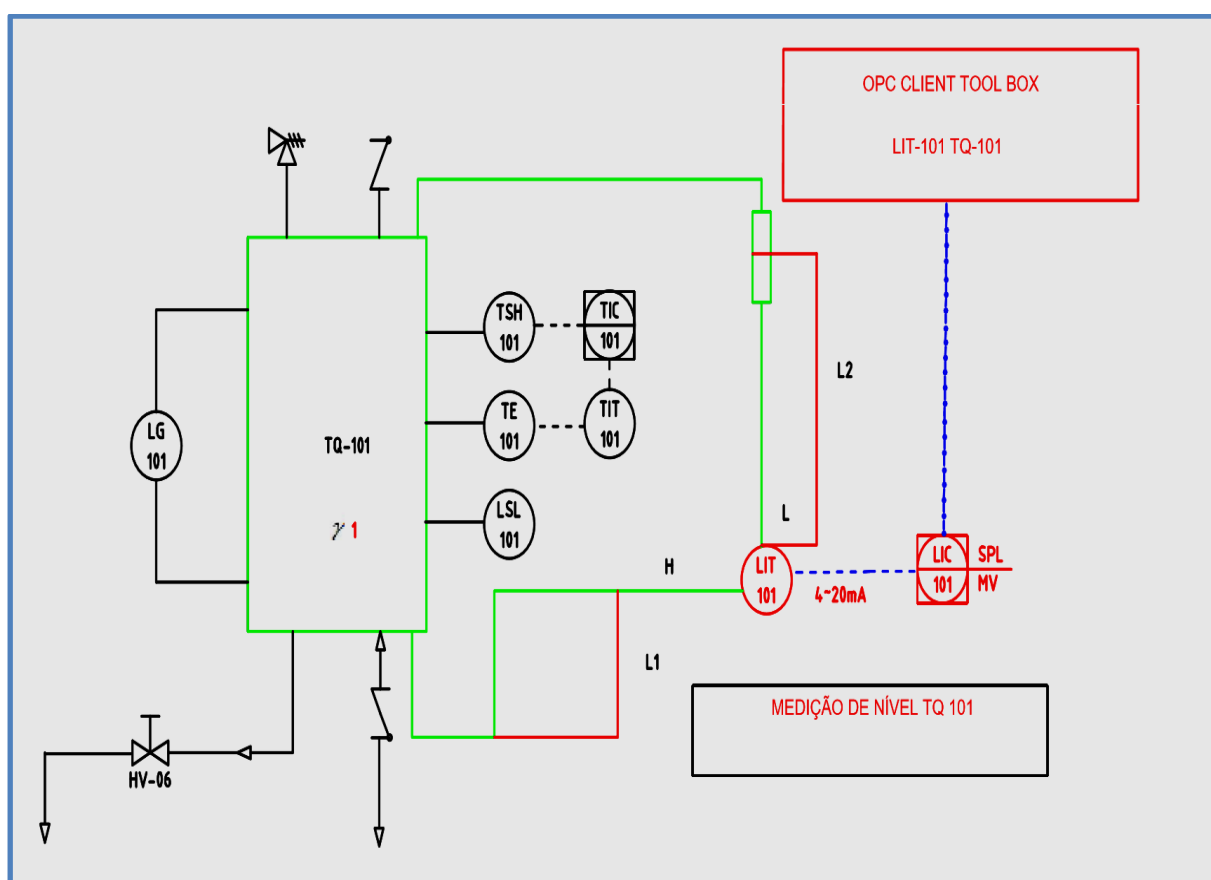


Figura 36 - Fluxograma e telemetria do *OPC CLIENT tool box* Matlab Simulink em medição de nível LIT-101.

A figura 37 exibe a representação da configuração do *OPC CLIENT*.

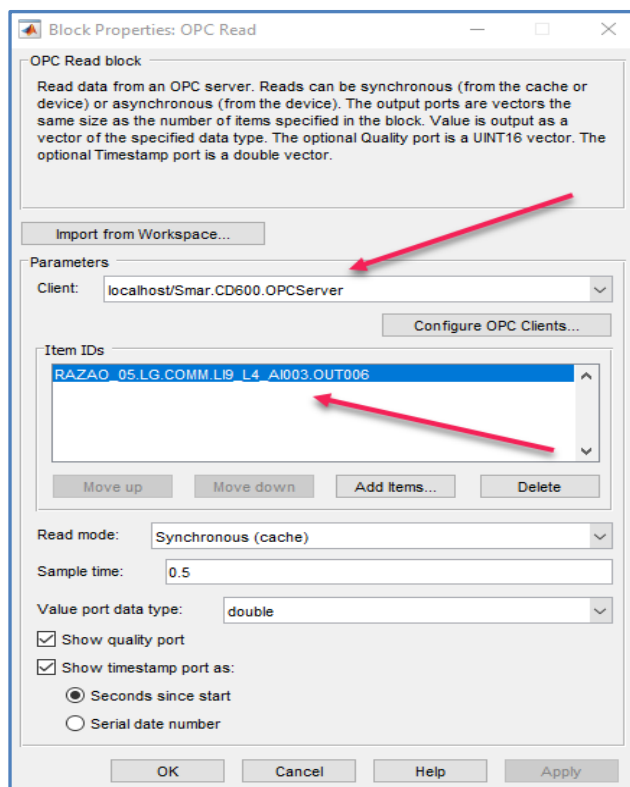


Figura 37 - Representação da configuração *OPC CLIENT* leitura *tool box Matlab* com *OPC SERVER CD600 SMAR* para medição de nível LIT-101.

A figura 38 apresenta o fluxograma e telemetria para a leitura do *OPC CLIENT TOOL BOX* com LIT-102 e figura 38 representação da configuração do *OPC CLIENT*.

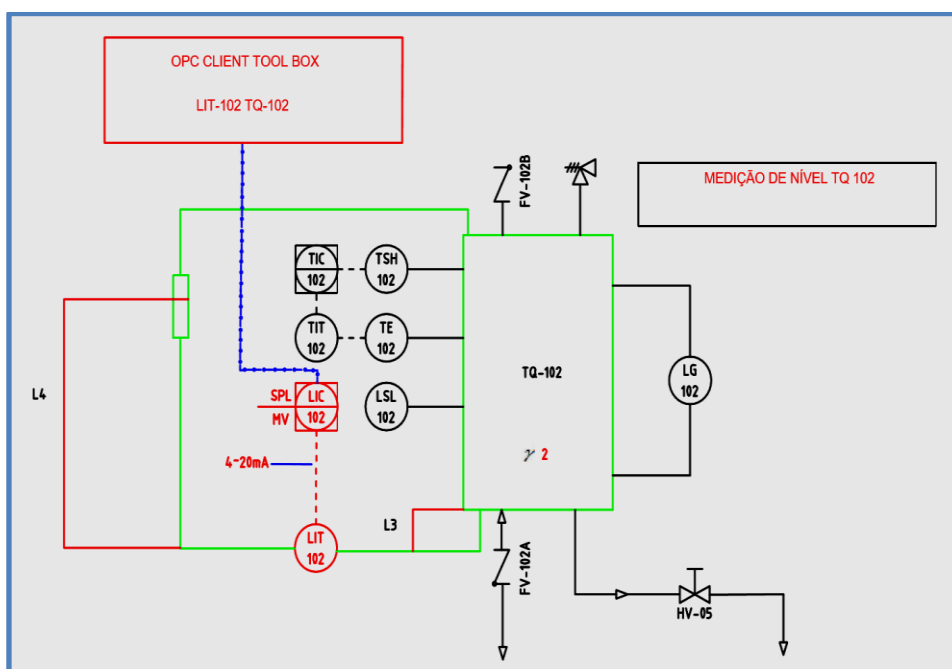


Figura 38 - Fluxograma e telemetria do *OPC CLIENT* leitura *tool box Matlab Simulink* em medição de nível com LIT-102.

A figura 39 exibe a representação da configuração OPC *CLIENT tool box Matlab* com OPC *SERVER* CD 600 SMAR para medição de nível LIT-102.

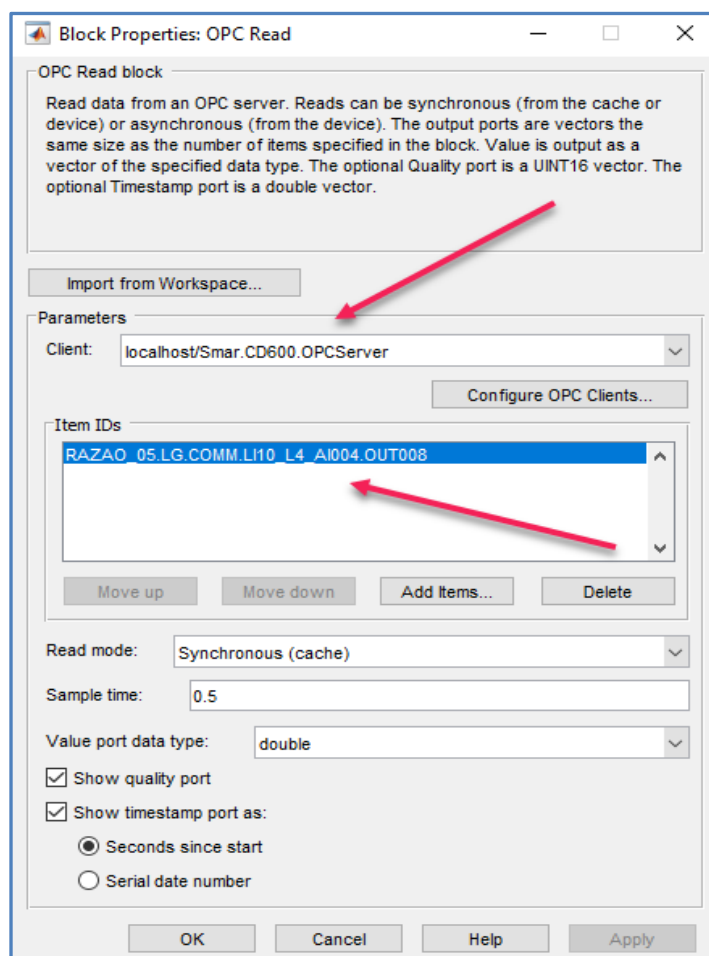


Figura 39 - Representação da configuração OPC *CLIENT tool box Matlab* com OPC *SERVER* CD 600 SMAR para medição de nível LIT-102.

A saída do PI(s) contínuo paralelo FIC-101 implementado no matlab *Simulink*

$$y(s) = \left[Pe(s) + I \left(\frac{1}{s} \right) e(s) \right] + y_o$$

será aplicada à entrada do inversor de frequência $FY - 101 \frac{I}{F}$ estabelecendo a condição do *SPL(set – point local)* FIC – 101 e o Fator *SPR setpoint remtoto de relação do* $FY - 101(x)$, neste projeto foi ajustado para o valor de 0,5 e a figura 40 apresenta o fluxograma e telemetria para a escrita do OPC *CLIENT* escrita para o Inversor de frequência.

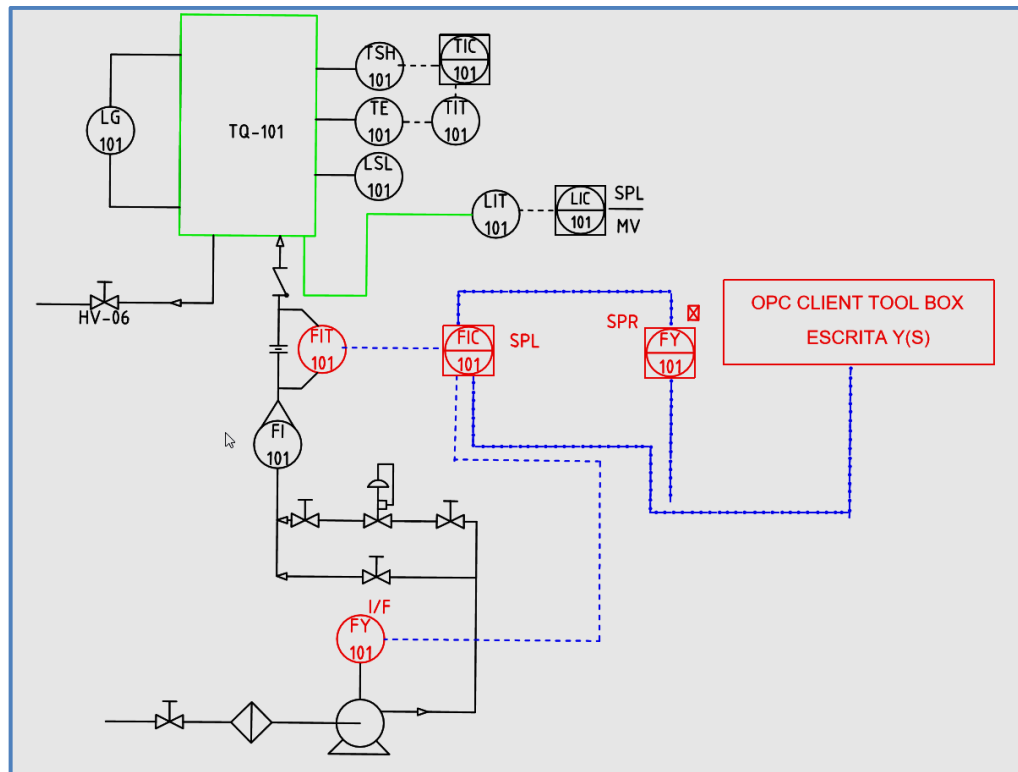


Figura 40 - Fluxograma e telemetria do *OPC CLIENT* escrita *tool box* Matlab *Simulink* com *OPC SERVER* CD 600 SMAR FIC 101.

A figura 41 apresenta a parametrização do *OPC CLIENT* escrita do Matlab *Simulink* com o *OPC SERVER* CD600 SMAR, com isso se consegue aplicar o sinal $y(s) = \left[Pe(s) + I \left(\frac{1}{s} \right) e(s) \right] + y_o$ ao inversor de frequência $FY - 101 \frac{1}{F}$.

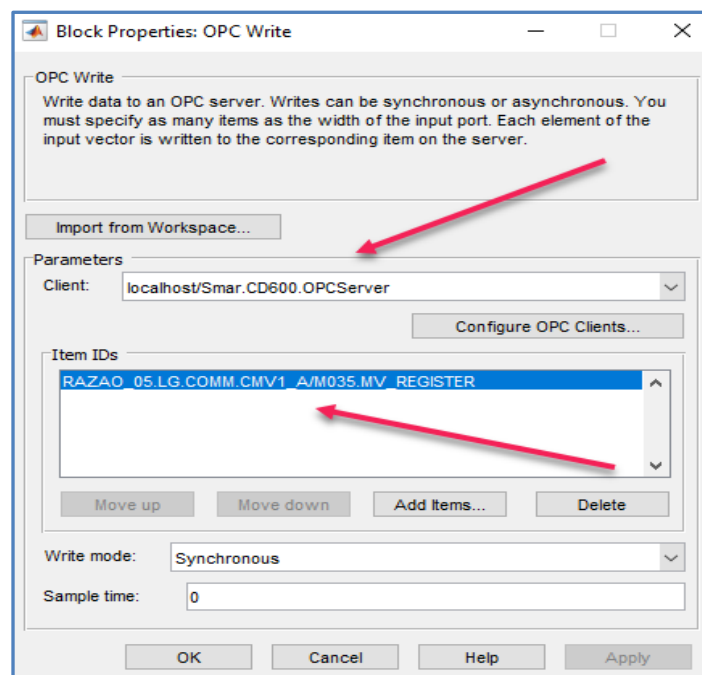


Figura 41 - Representação da configuração *OPC CLIENT* escrita *tool box* Matlab com *OPC SERVER* CD 600 SMAR FIC 101.

A saída do PI(s) contínuo paralelo FIC-102 implementado no matlab *Simulink* $I(s) = \left[Pe(s) + I \left(\frac{1}{s} \right) e(s) \right] + I_o$ será aplicado à entrada do inversor de frequência $FY - 102 \frac{I}{F}$ estabelecendo a condição *SPR(set - point remoto) FIC - 102* proveniente do fator *SPR setpoint remtoto de relação do FY - 101(x)* , a figura 42 apresenta o fluxograma e telemetria para a escrita do *OPC CLIENT* escrita para o inversor de frequência.

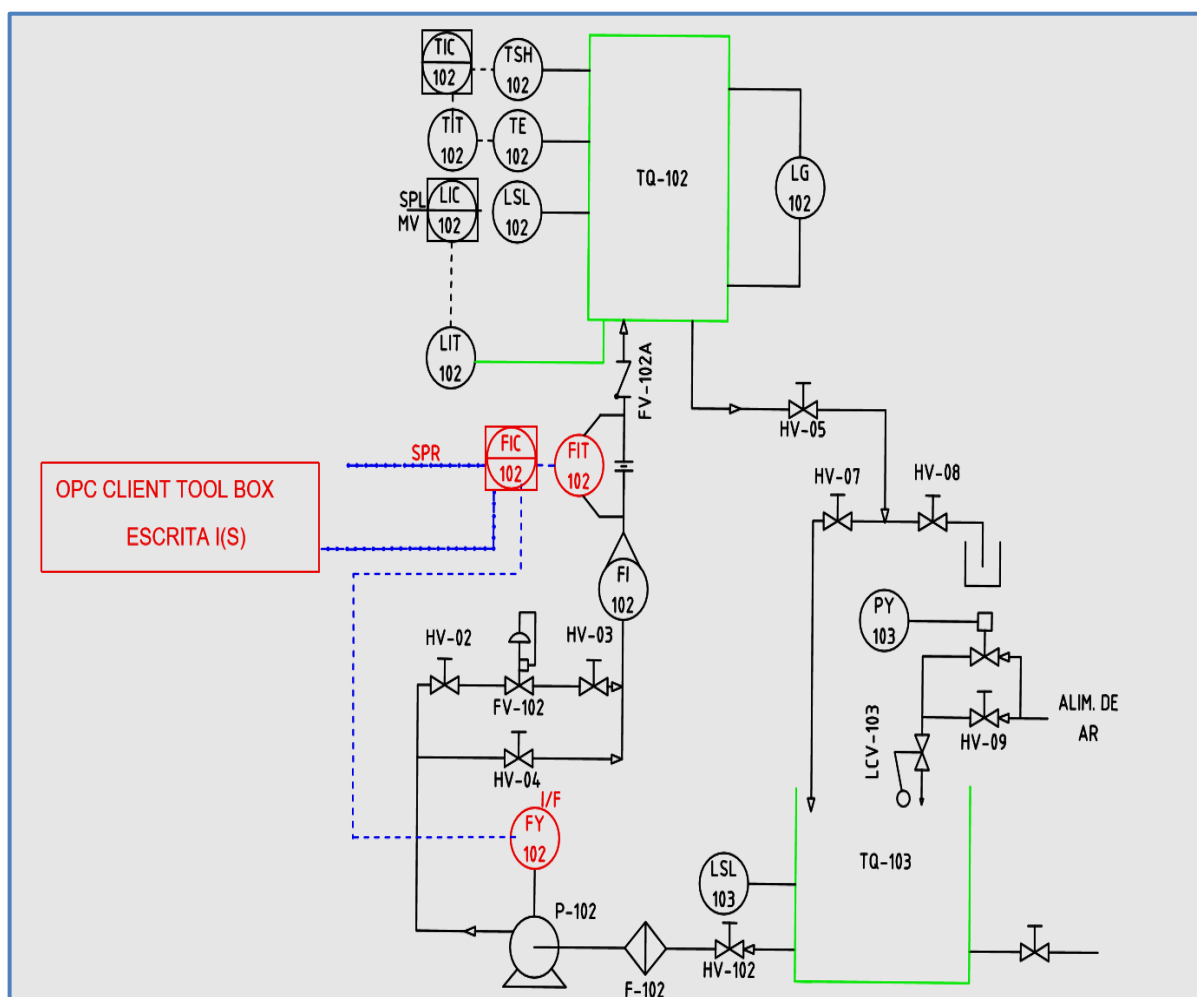


Figura 42 - Fluxograma e telemetria do OPC CLIENT escrita tool box Matlab Simulink com OPC SERVER CD 600 SMAR FIC-102.

A figura 43 apresenta a parametrização do *OPC CLIENT* escrita do Matlab *Simulink* com o *OPC SERVER* CD600 *SMAR*, com isso se consegue aplicar o sinal $I(s) = \left[Pe(s) + I \left(\frac{1}{s} \right) e(s) \right] + I_o$ ao inversor de frequência $FY - 102 \frac{I}{F}$, lembrando que, nesse projeto o *SPR de relação do* $FY - 101(x)$ será o ponto de controle para o $PI(s)$ FIC-102 Paralelo Matlab *Simulink* a estratégia de controle de razão da variável vazão do TQ-102.

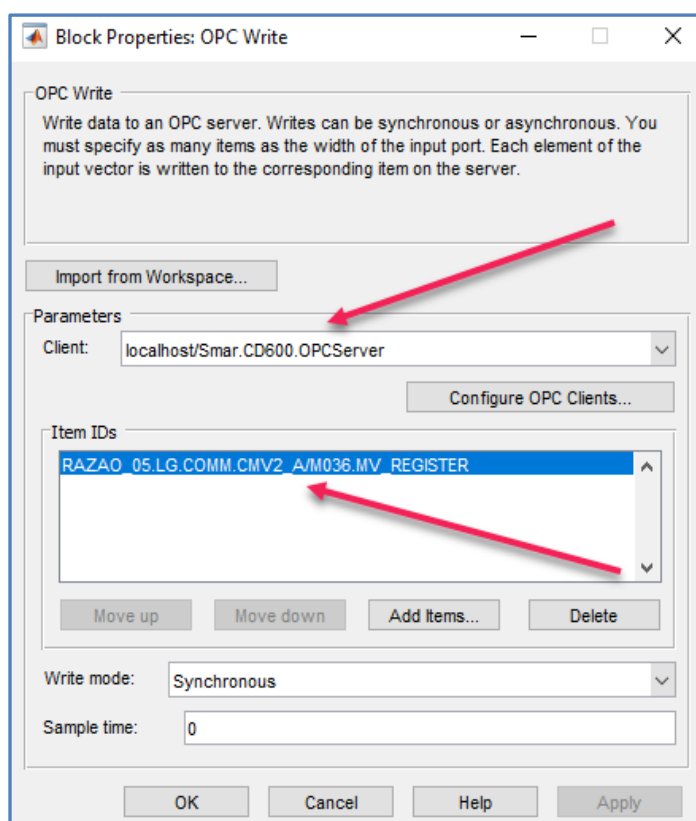


Figura 43 - Representação da configuração *OPC CLIENT* escrita *tool box Matlab* com *OPC SERVER* CD 600 *SMAR* FIC-102.

4.3 Levantamento da característica do processo vazão e nível TQ-101 e TQ-102

O levantamento da característica do processo de vazão e nível (TQ-101 e TQ-102) foi realizado considerando o levantamento da curva de reação do processo de sistema de três tanques, aplicado às seguintes condições:

- Válvula Hv-05 e HV-06 (figura 32) 50% aberta atribuindo resistência de atrito

$$R = \frac{h}{q} = \frac{m}{\frac{m^3}{h}} = \frac{h(\text{tempo})}{m^2}$$

fazendo uso do recalque da Bomba P-101 e 102;

- O ajuste do degrau em 50% de saída do FIC 101 e 30% em FIC 102 na lógica do Subsistema do PI MATLAB *Simulink* conforme figuras 44, 45 e 46 (função degrau), aplicado aos inversores $FY - 101^{\frac{I}{F}}$ e $FY - 102^{\frac{I}{F}}$, referência analógica para realizar a transferência de produto do TQ-103 TQ-101 E 102.

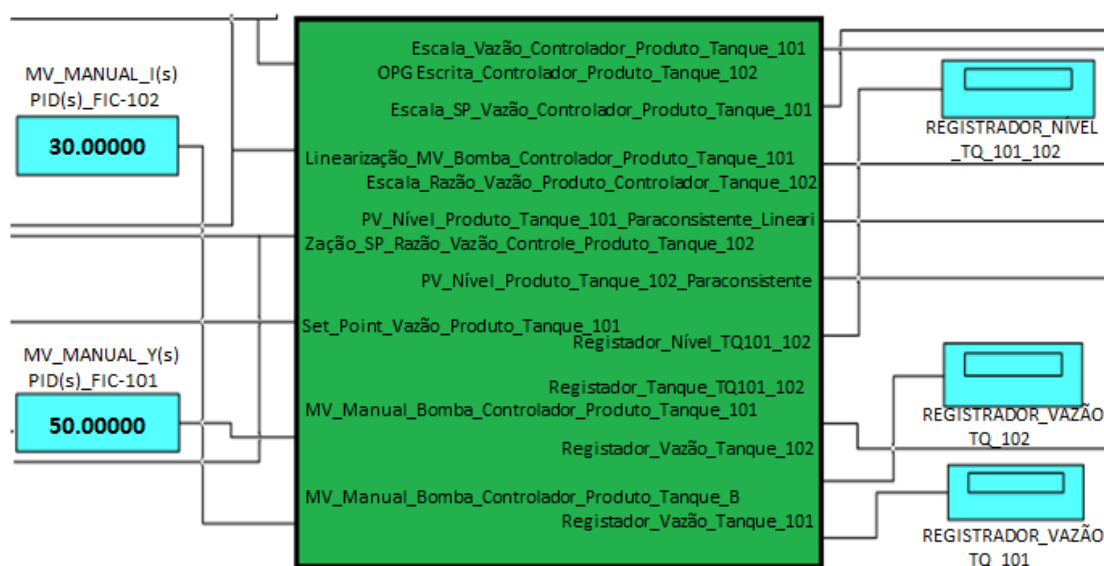


Figura 44 - Subsistema *OPC CLIENT* escrita *tool box Matlab Simulink* com *OPC SERVER CD 600 SMAR FIC-101, FIC-102*, telemetria $FY - 101^{\frac{I}{F}}$ e $FY - 102^{\frac{I}{F}}$.

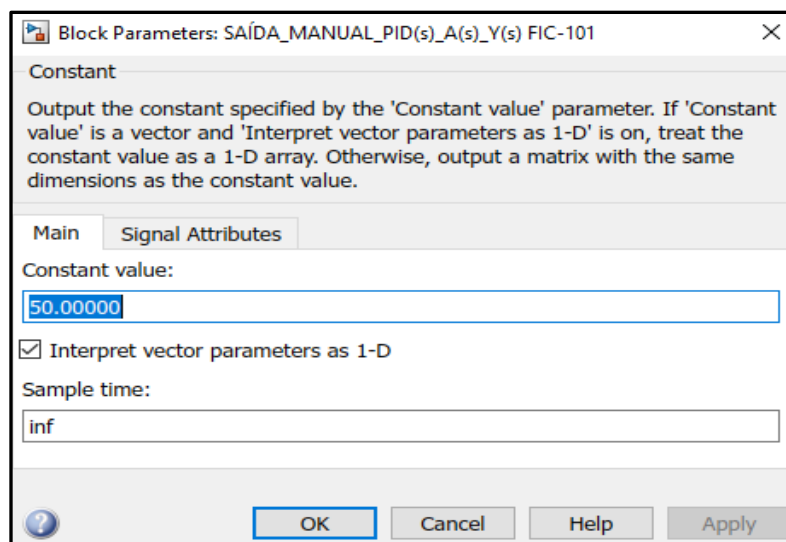


Figura 45 - Parametrização *OPC CLIENT* escrita *tool box Matlab Simulink* com *OPC SERVER CD 600 SMAR PI*.

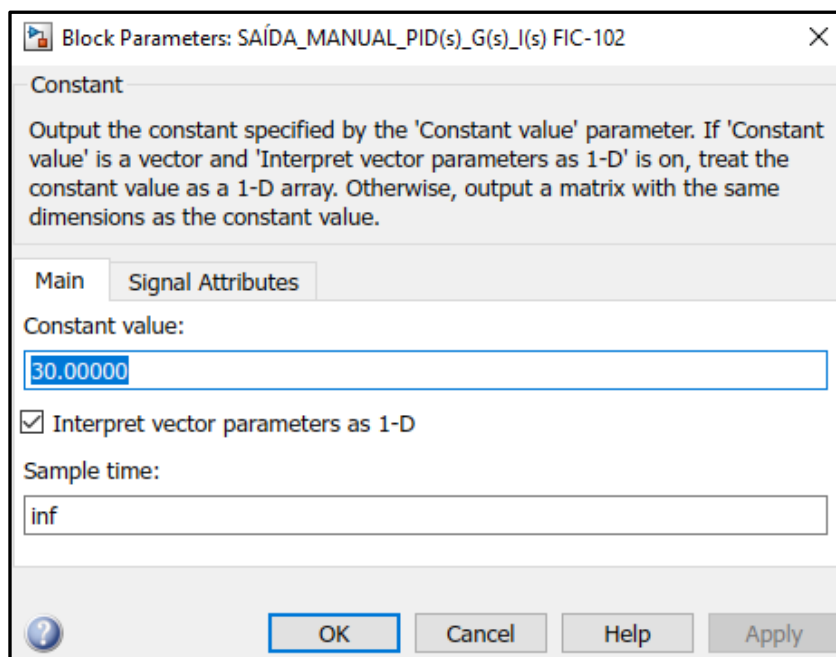


Figura 46 - Parametrização OPC CLIENT escrita tool box Matlab Simulink com OPC SERVER CD 600 SMAR PI(s) FIC-102 e FY – 102 $\frac{I}{F}$.

Após alguns minutos, a vazão no TQ-101 estabilizou-se entre 64 e 66%, conforme apresentado na figura 47, que ilustra a tela do sistema de monitoramento e supervisão do sistema de controle coletado pelo *Simulink Malab OPC tool box*.

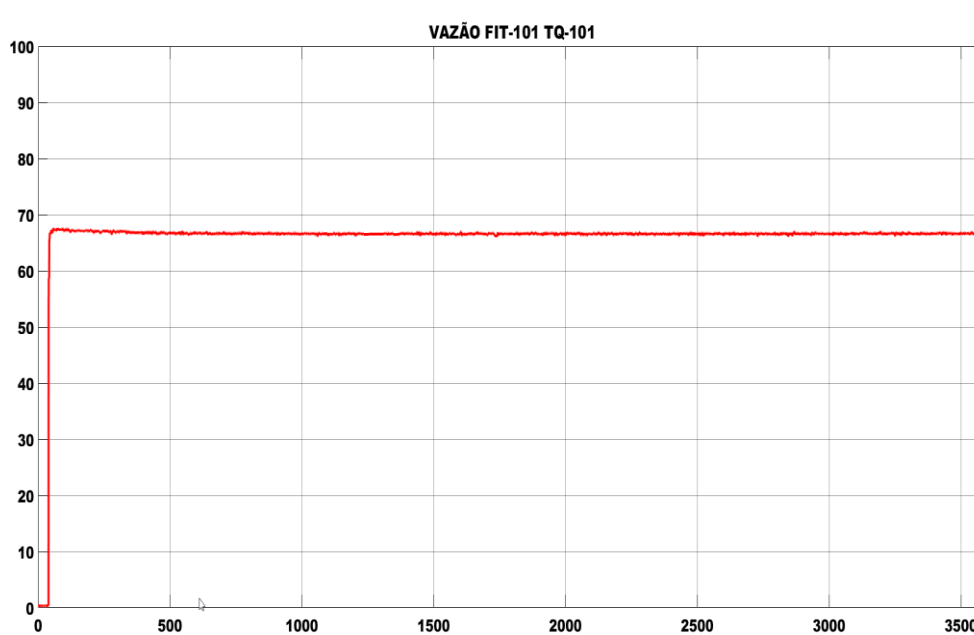


Figura 47 - Gráfico OPC CLIENT leitura FIT-101 C(s) vazão TQ-101.

De igual modo, após alguns minutos, a vazão no TQ-102 estabilizou-se entre 18 e 19%, conforme apresentado na figura 47, que ilustra a tela do sistema de monitoramento e supervisão do sistema de controle apresentado no Matlab *Simulink* *OPC tool box*.

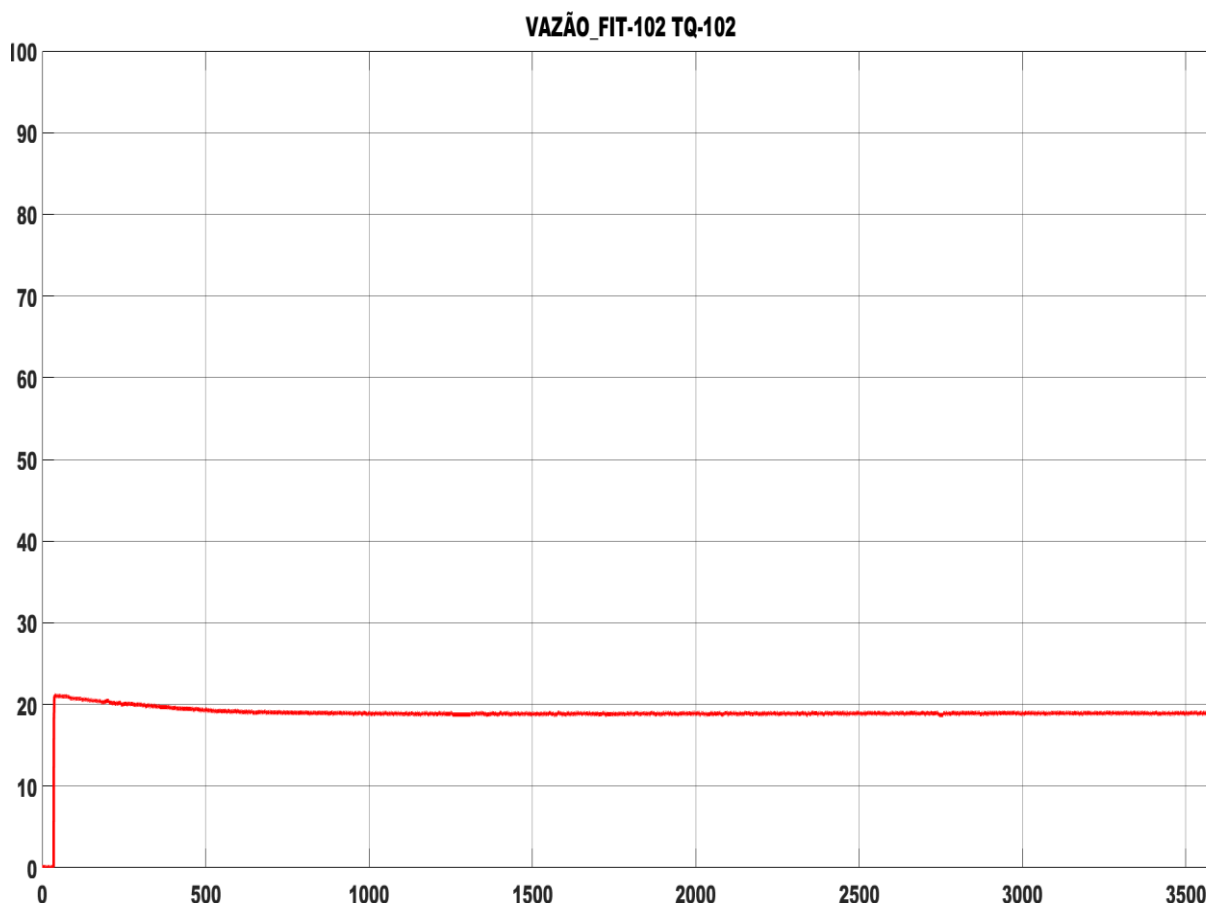


Figura 47. Gráfico *OPC CLIENT* leitura FIT-102 J(s) vazão TQ-102.

Realizando-se uma análise da coleta da forma de onda no sinal do *OPC CLIENT*, conforme demonstrado na figura 48, referente ao FIT-101, determinando o tempo morto t de resposta do transdutor sensor capacitivo, interagindo com a placa de orifício do transmissor de vazão instalado na linha do produto em fase estacionária no TQ-101.

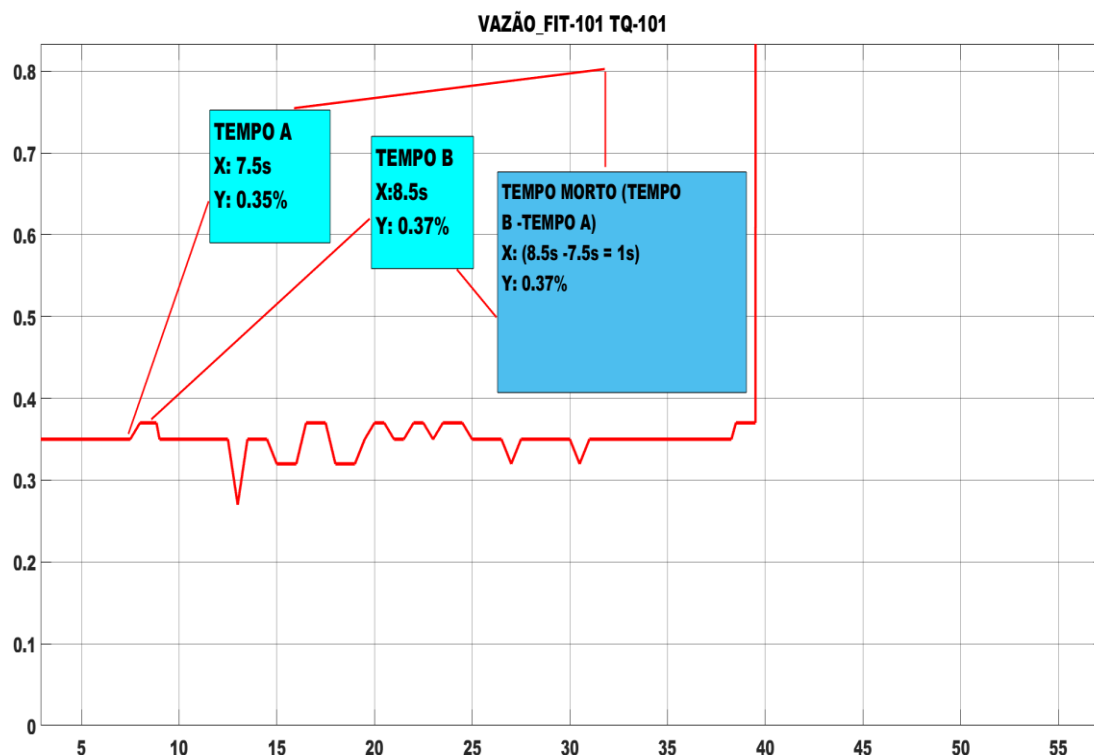


Figura 48 - Levantamento do tempo morto t FIT-101 C(s) *OPC CLIENT* com *OPC SERVER* CD600 SMAR.

A constante de tempo 63,2% é determinada após a estabilização da variável de vazão medida pelo FIT-101 *OPC CLIENT*, leitura realizada em função da aplicação do degrau de 50% e de sua estabilidade em 66,72%.

A figura 49 apresenta o gráfico do levantamento do valor da constante de tempo para o processo em função do degrau aplicado.

Tal valor tem grande relevância para o algoritmo LPA2v, que será aplicado na determinação dos valores dinâmicos do bloco PI, que por sua vez será aplicado à estratégia de controle seguidor de PV no intuito de controlar a vazão e o nível do TQ-101.

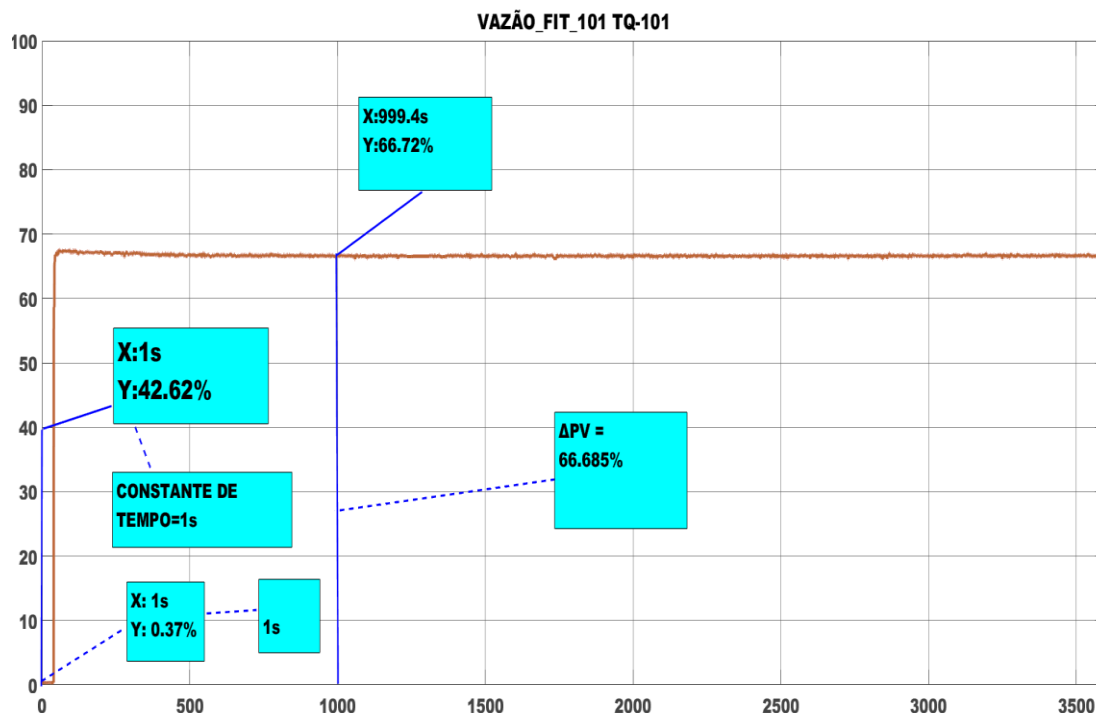


Figura 49 - Levantamento da constante de tempo τ FIT-101 C(s) *OPC CLIENT* com *OPC SERVER CD600 SMAR*.

Como se pode observar no gráfico, o transmissor de vazão FIT-101 apresenta excelente estabilidade e resposta instantânea ao degrau de 50% aplicado. Isto ocorre, pois, a telemetria *OPC CLIENT tool box* encontra-se parametrizada para integrar com o algoritmo da LPA2v na rede paraconsistente.

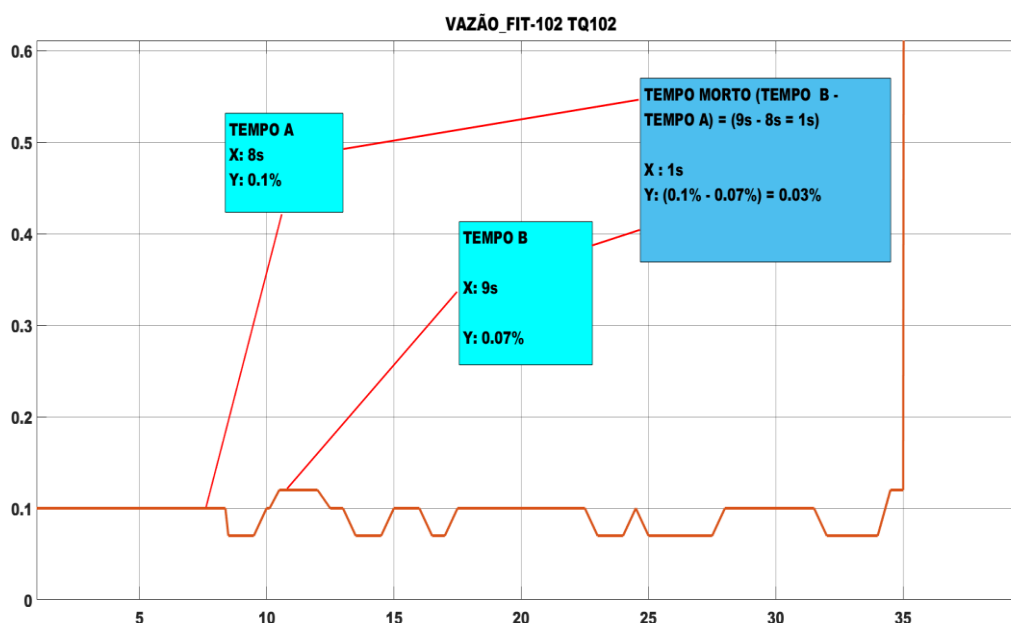


Figura 50 - Levantamento do tempo morto t FIT-102 J(s) *OPC CLIENT* com *OPC SERVER CD600 SMAR*.

A constante de tempo **63,2%** é determinada após a estabilização da variável de vazão medida pelo FIT-102 *OPC CLIENT*, leitura realizada em função da aplicação do degrau de 30% e da estabilidade da vazão em 18,77%, apresentada na figura 51.

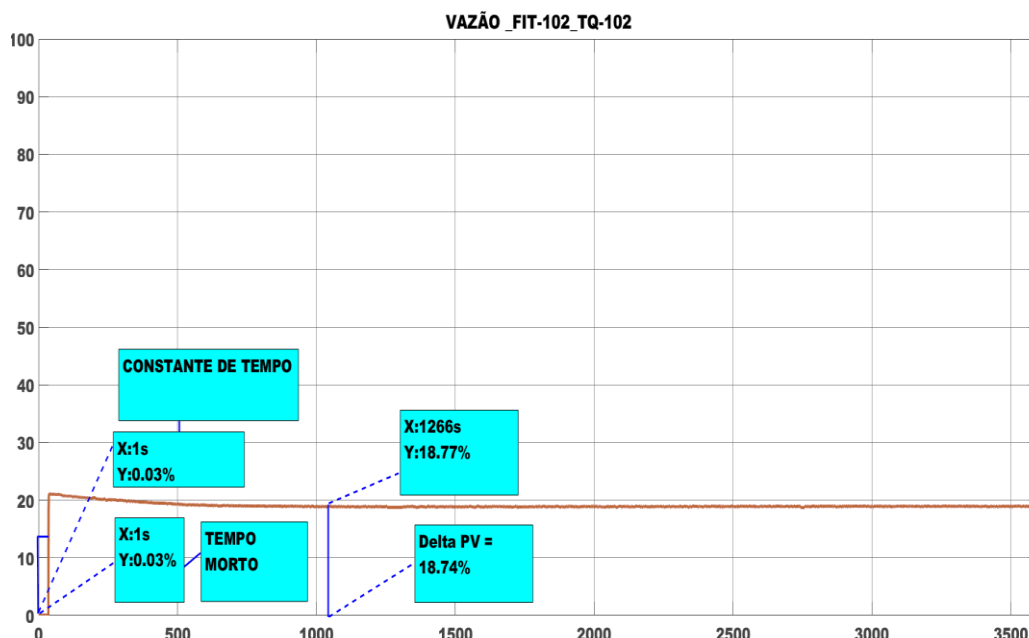


Figura 51 - Levantamento da constante de tempo τ FIT-102 J(s) *OPC CLIENT* com *OPC SERVER* CD600 SMAR.

Em função do degrau de 50% aplicado para o inversor $FY - 101 \frac{I}{F}$ e 30% no $FY - 102 \frac{I}{F}$, utilizando o *OPC CLIENT* escrita *tool box* descrito anteriormente, determinou-se as constantes de tempo da medição de nível executada pelos medidores de pressão diferencial LIT-101 e LIT-102, comprovando a equação (63).

O valor medido pelos transmissores de nível tem a finalidade de fornecer o valor de grandeza favorável, determinando a curva exponencial de amortecimento de primeira ordem ao algoritmo paraconsistente LPA2v, para prever, de forma dinâmica, os valores Proporcional e Integral ao Bloco PI(s) paralelo *Matlab Simulink*.

O banco de dados desenvolvido na plataforma *Matlab Simulink* fornece valores das variáveis: tempo morto (t) e constante de tempo (τ), demonstrados nos gráficos de tendências anteriores. Valores estes que tem como finalidade o cálculo teórico dos parâmetros internos a serem inseridos pelo especialista no bloco PI (figura 24).

Segundo Rivera *et al.* (1986) e Campos e Teixeira (2010), os valores de ganho proporcional P e integral I são obtidos pelo método Modelagem Interna do Controlador (IMC), apresentados na equação (64):

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta mv} \quad (64)$$

Em que:

K é o ganho do processo;

ΔPV é a estabilidade da variável de processo após o degrau aplicado;

Δmv é a função degrau aplicada em Y(s) e I(s).

O ganho proporcional do controlador PID(s) Paralelo *Matlab Simulink* foi obtido por meio da equação (65):

$$P = \frac{\tau}{K.(\lambda+t)} \quad (65)$$

Em que:

P é o ganho proporcional do controlador PID(s) Paralelo *Matlab Simulink*;

t é o tempo morto de resposta de FIT-101,FIT-102,LIT-101,LIT-102;

τ é a constante de tempo FIT-101,FIT-102,LIT-101,LIT-102;

λ é o fator de ajuste do tempo de resposta PID(s) paralelo *Matlab Simulink*.

5. ESTRATÉGIA DE CONTROLE RAZÃO E SEGUIDOR DE PV PARACONSISTENTE DE VAZÃO EM PLANTA PILOTO TQ-101 E TQ-102

Neste capítulo apresenta-se a estratégia de Controle de Razão e Seguidor de PV paraconsistente de Vazão aplicados à planta piloto de processo industrial (figura 32), desenvolvido a partir de dois controladores PI(s) contínuos e de estrutura paralela paraconsistente (FIC-101) com a saída de correção exibida na equação (66):

$$y(s) = \left[Pe(s) + I \left(\frac{1}{s} \right) e(s) \right] + y_o \quad (66)$$

Tal como saída manipulada de correção representada na equação (67):

$$I(s) = \left[Pe(s) + I \left(\frac{1}{s} \right) e(s) \right] + I_o \quad (67)$$

A parametrização externa dos valores de ganho proporcional e integral foi feita conforme o grau de contradição normalizado e o grau de evidência resultantes reais obtidos de forma dinâmica com o uso dos *NAP's* e *OPC's CLIENT'S*, desenvolvidos no projeto *OPC tool box* escrita de variável *Matlab Simulink*, que realiza a telemetria com o inversor de frequência $FY - 101 \frac{I}{F}$ e $FY - 102 \frac{I}{F}$ e bombas centrífugas $P - 101$ e $P - 102$.

O fator de multiplicação inserido pelo especialista de processo está ajustado em 0,5, conforme figura 52, no *SP Matlab Simulink* controle razão de vazão Produto TQ-101 e 102.

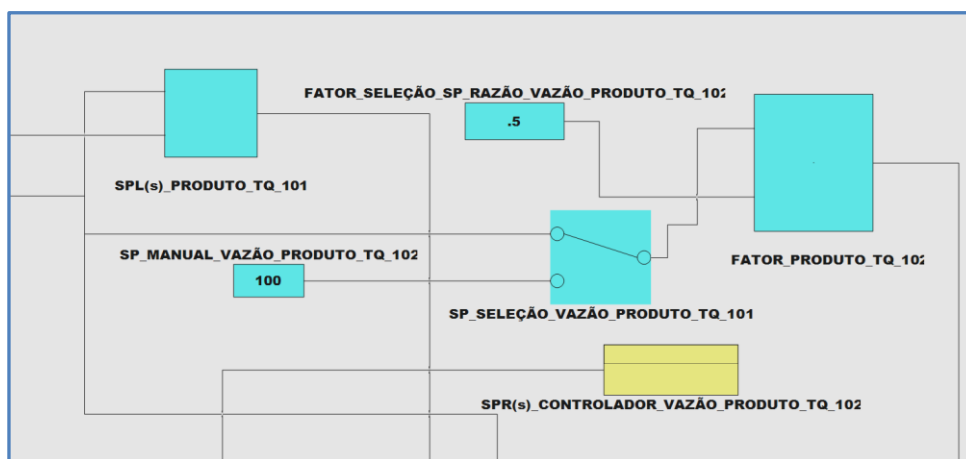


Figura 52 - SPL(s) e SPR(s) Matlab Simulink controle razão de vazão produto TQ-101 e 102.

A figura 53 apresenta o fluxograma OPC Matlab Simulink Paraconsistente em estratégia de controle de razão de vazão.

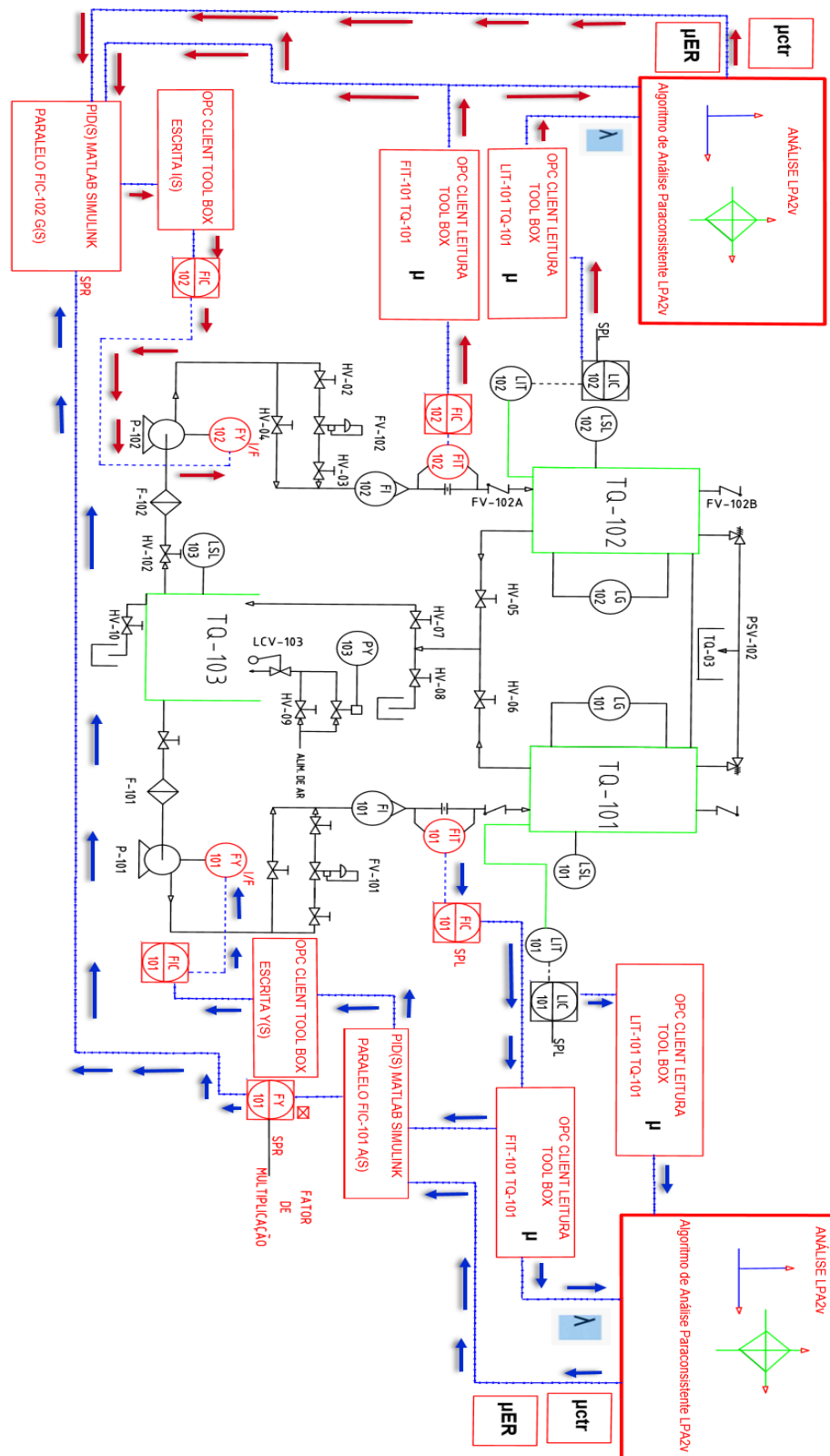


Figura 53 - OPC Matlab Simulink paraconsistente em estratégia de controle razão PI(s) FIC-101 A(s) e FIC-102 G(s).

O presente projeto utiliza dois blocos LPA2v (algoritmo de análise paraconsistente) interagindo com o *OPC CLIENT tool box*, realizando a leitura das variáveis de vazão FIT-101, FIT-102, nível LIT-101 e LIT-102 com o hardware analógico do CD-600 via telemetria digital.

O algoritmo inserido em LPA2V tende a informar, de maneira dinâmica, e em valores reais os parâmetros proporcional e integral ao PI(s) paralelo FIC101 A(s) e PI(s) paralelo FIC102 G(s).

O *OPC tool box* escrita Matlab *Simulink* executa a telemetria com os inversores de frequência adequando-os ao hardware analógico do CD 600. Estabelecendo assim, a escrita da rotação das bombas centrífuga e o controle $F(s)$: Erro (SP-PV), a entrada FIC-102 PI(s) contínuo paralelo Matlab *Simulink* (G(s)), bem como a variável de vazão do produto do tanque TQ-102.

5.1 Bloco Paraconsistente Matlab Simulink OPC tool box

Neste projeto, o bloco Paraconsistente *Matlab Simulink OPC tool box* é responsável pela execução do algoritmo de análise paraconsistente da LPA2v com saída de grau de evidência resultante real e intervalo de certeza sinalizado, grau de contradição normalizado e grau de contradição, conforme representação na figura 54.

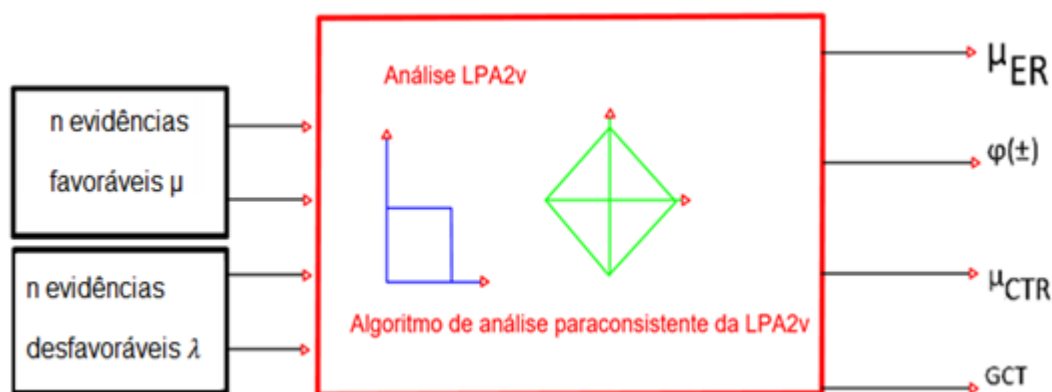


Figura 54 - Representação do bloco paraconsistente *Matlab Simulink OPC tool box*.

5.2 Algoritmo de análise paraconsistente da LPA2v com saída de grau de evidência resultante real μ_{ER} , ϕ_{E1} , μ_{ctr} , G_{ct} com *Matlab OPC tool box*

O bloco Paraconsistente *Matlab Simulink OPC tool box* foi desenvolvido utilizando-se as equações obtidas no estudo dos NAP's.

O sistema Paraconsistente de Tratamento de Incertezas da figura 55 encontra-se parametrizado conforme o número de evidências favoráveis (μ) obtidos em FIT-101 e FIT-102 e de evidências desfavoráveis (λ) obtidas em LIT-101 e LIT-102. Cabe destacar que as informações incompletas e contraditórias receberão um tratamento adequado por meio das equações da LPA2v.

O algoritmo de Análise Paraconsistente utilizado na estratégia de controle de razão e seguidor de PV é o Nó de Análise Paraconsistente (NAP), conforme foi descrito no item 2.3 (Capítulo 2).

5.3 Arquitetura do controlador paraconsistente *Matlab Simulink OPC tool box*

Nessa estratégia de controle (figura 56) utilizam-se dois transmissores de vazão, FIT-101, como a primeira fonte de evidência, e LIT-101, como a segunda fonte de evidência, do nó de análise paraconsistente **NAPRATECONTROL 1**.

As saídas do **NAPRATECONTROL 1** e **NAPRATECONTROL 2** correspondem à representação do graus de evidência resultante real μ_{ER1} e μ_{ER2} .

O terceiro nó **NAPRATECONTROL 3** terá como fonte de evidência favorável a saída do grau de evidência resultante real μ_{ER3} do **NAPRATECONTROL 1** e **NAPRATECONTROL 2**. Tendo finalidade tratar as incertezas dos graus de evidências favoráveis FIT-101 e FIT-102, assim como os graus de evidências desfavoráveis, dados por LIT-101 e LIT-102, estabelecendo a PV que será analisada junto com o *set point* local do FIC-01.

A figura 55 apresenta a Rede de Análise Paraconsistente (RAP) PI(s) FIC-101 A(s) e FIC-102 G(s) *Matlab Simulink OPC tool box*.

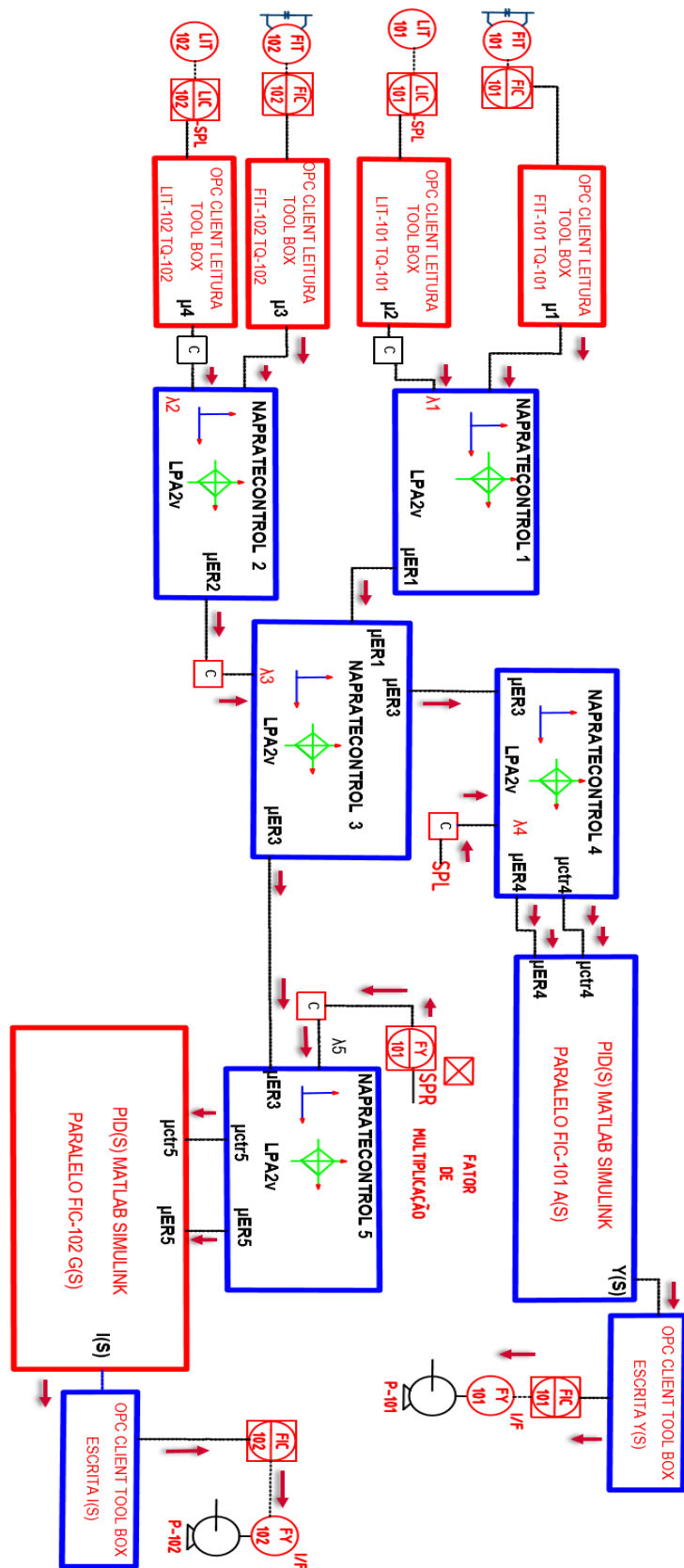


Figura 55 - Rede de Análise Paraconsistente (RPA) PI(s) FIC-101 A(s) e FIC-102 G(s).

O quarto nó **NAPRATECONTROL 4** terá como fonte de evidência favorável a saída do grau de evidência real μ_{ER3} do **NAPRATECONTROL 3**. Já a fonte de evidência desfavorável será o valor desejado do SPL (*set point* local) referente à vazão do produto contido no TQ-101.

Como saídas, o quarto nó **NAPRATECONTROL 4**, produzirá o grau de contradição normalizado (μ_{ctr4}) e o grau de evidência resultante real μ_{ER4} , que serão aplicados na entrada do controlador PI (ganho proporcional e integral) do PI(s) contínuo paralelo A(s) FIC-101.

Dessa forma, o quinto nó **NAPRATECONTROL 5** apresentará como fonte de evidência favorável a saída do grau de evidência real μ_{ER4} do **NAPRATECONTROL 4** e a fonte de evidência desfavorável será o valor desejado do SPR (*setpoint* remoto) referente à razão da vazão do produto contido no TQ-102 estabelecida pelo especialista do processo.

O **NAPRATECONTROL 5** produzirá como saídas o grau de contradição normalizado (μ_{ctr5}) e a saída do grau de evidência resultante real μ_{ER5} , que serão aplicados na entrada do controlador PI (ganho proporcional e integral) do PI(s) contínuo paralelo G(s) FIC-102.

Os controladores desenvolvidos no Matlab *Simulink* encontram-se integrados à leitura e escrita das variáveis de entradas analógicas e das saídas de campo.

A comunicação de dados no *Matlab Simulink OPC tool box* foi realizada com a topologia da rede 485 e ethernet exibido na figura 56, estabelecendo a leitura e escrita das variáveis de campo dos instrumentos de medição e elementos finais de controle inversor de frequência $FY - 101^{\frac{I}{F}}$ e $FY - 102^{\frac{I}{F}}$, assim como das bombas centrífugas $P - 101$ e $P - 102$ do banco de dados *workspace Matlab*.

A figura 56 apresenta a comunicação paraconsistente PI(s) FIC-101 A(s) e FIC-102 G(s) Matlab *Simulink OPC tool box* rede ethernet e 485 *OPC SERVER CD600 SMAR*.

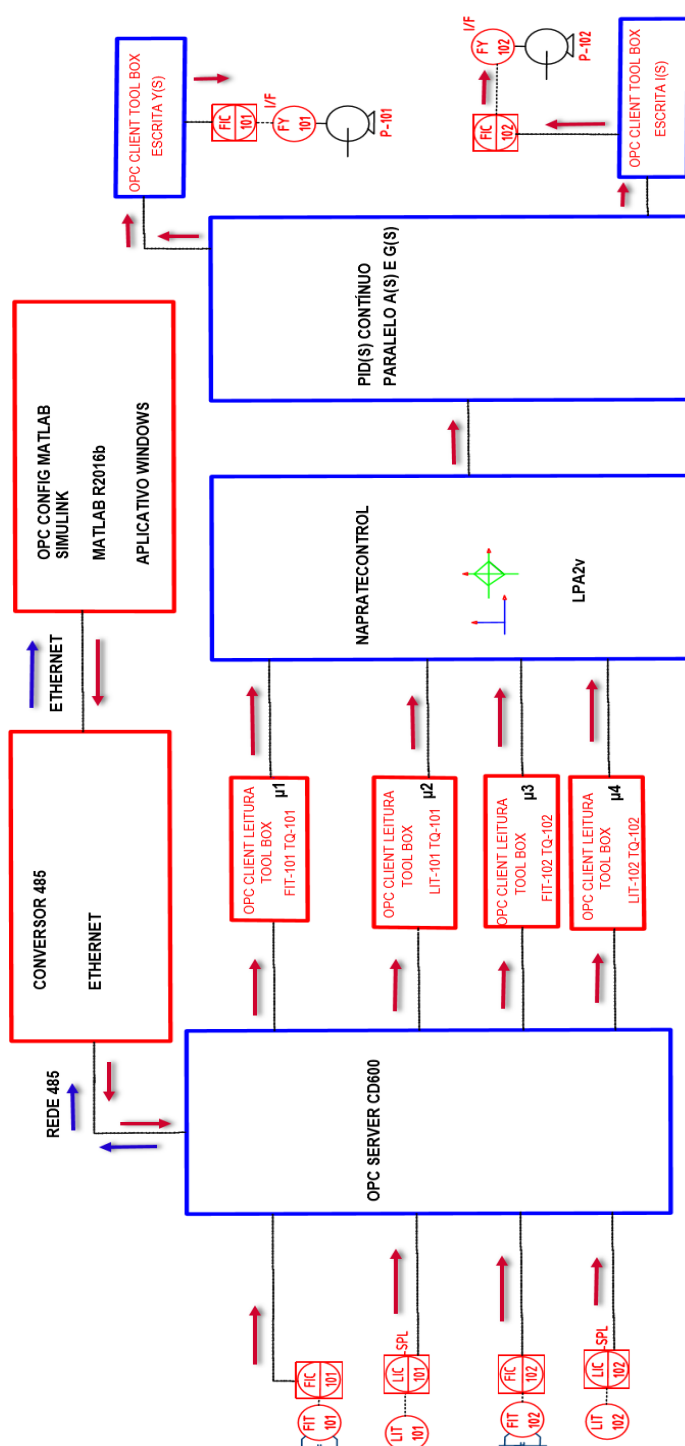


Figura 56 - Comunicação paraconsistente PI(s) FIC-101 A(s) e FIC-102 G(s) Matlab Simulink
 OPC tool box rede ethernet e 485 OPC SERVER CD600 SMAR.

6 LINEARIZAÇÃO DOS SINAIS PARA CONSISTENTES: NAPRATECONTROL OPC TOOL BOX MATLAB SIMULINK

Os sinais provenientes do FIT-101 e FIT-102 variam entre 4 e 20 mA proporcionalmente a uma variação da vazão volumétrica instantânea na seção transversal da placa de orifício, em função da equação $K\sqrt{\Delta P} = Q$, conforme descrito no item 2.1.

A telemetria analógica dos dois transmissores de vazão está integrada ao hardware e *OPC SERVER* do controlador CD600 SMAR na faixa de 0 e 100% e aplicada ao *OPC CLIENT tool box* conforme a figura 33 e 34.

As figuras 57 e 58 apresentam a instalação do FIT-101 e FIT-102 na planta piloto de processo industrial.

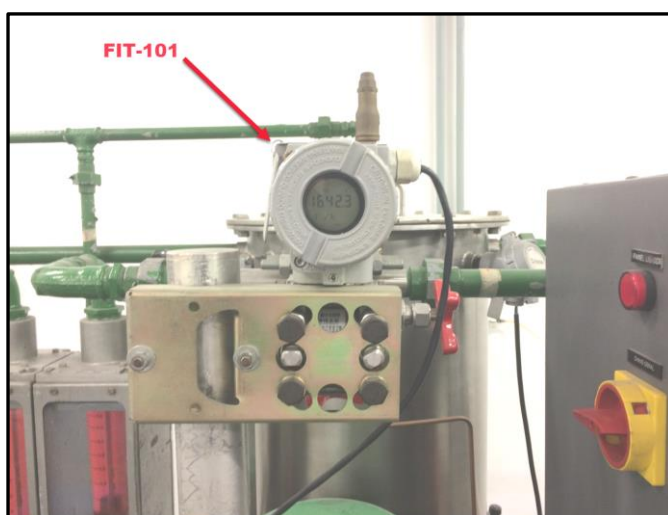


Figura 57 - Instalação do FIT-101 C(s).

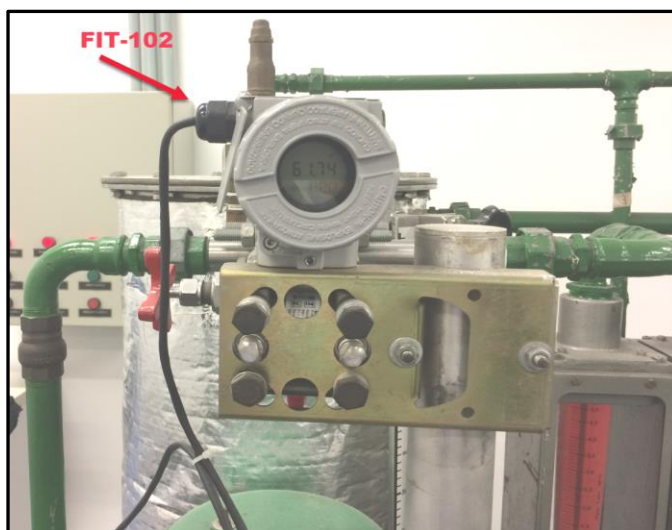


Figura 58 - Instalação do FIT-102 J(s).

A valorização das evidências favoráveis e desfavoráveis são expressas pelo seu valor lógico paraconsistente, que é um número pertencente ao conjunto dos reais no intervalo fechado entre 0 e 1.

A figura 59 demonstra o grau de evidência μ_1 , μ_3 em função da vazão FIT-101 e FIT-102.

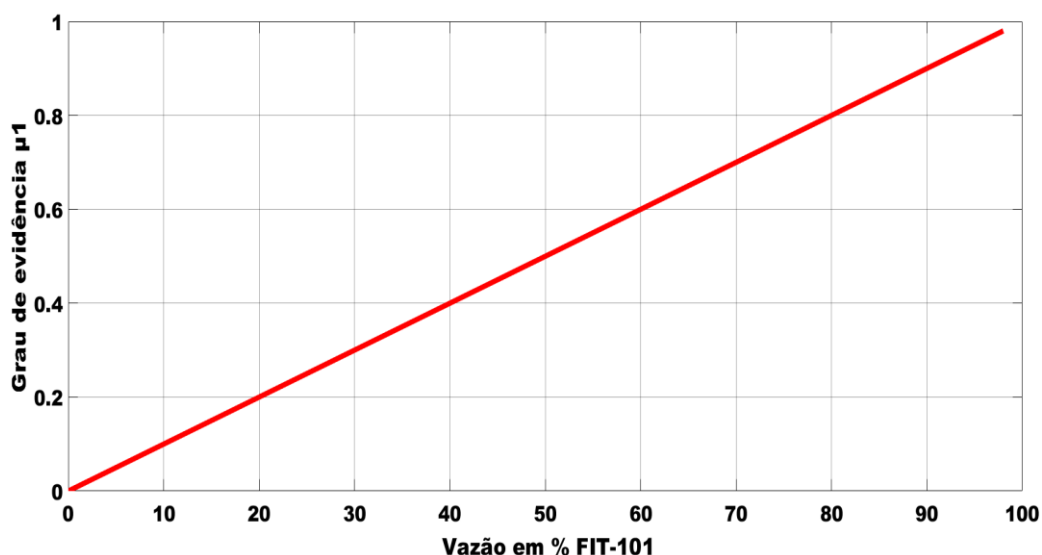


Figura 59 - Grau de evidência μ_1 , μ_3 em função da vazão FIT-101 e FIT-102.

A telemetria do sinal do FIT-101 e FIT-102, mostrada na figura 60, é devidamente linearizada para o seu grau de evidência, sendo descrita na relação:

$\text{FIT-101} \in \mathbb{R} \mid 0 \leq \text{FIT-101} \leq 1$ e proporcional a $4\text{mA} \leq \text{FIT-101} \leq 20\text{mA}$;

Onde:

Se $\text{FIT-101} = 4\text{mA} \rightarrow \mu_1 = 0 \rightarrow \text{Vazão para Tanque TQ-101} = 0\% (0)$;

Se $\text{FIT-101} = 20\text{mA} \rightarrow \mu_1 = 1 \rightarrow \text{Vazão para Tanque TQ-101} = 100\% (1)$;

Se: $4\text{mA} \leq \text{FIT-101} \leq 20\text{mA} \rightarrow 0 \leq \mu_1 \leq 1 \rightarrow \mu_1 = (\text{FIT-101} - 4) / 16$.

$\text{FIT-102} \in \mathbb{R} \mid 0 \leq \text{FIT-102} \leq 1$ e proporcional a $4\text{mA} \leq \text{FIT-102} \leq 20\text{mA}$;

Onde:

Se $\text{FIT-102} = 4\text{mA} \rightarrow \mu_3 = 0 \rightarrow \text{Vazão para Tanque TQ-102} = 0\% (0)$;

Se $\text{FIT-102} = 20\text{mA} \rightarrow \mu_3 = 1 \rightarrow \text{Vazão para Tanque TQ-102} = 100\% (1)$;

Se: $4\text{mA} \leq \text{FIT-102} \leq 20\text{mA} \rightarrow 0 \leq \mu_3 \leq 1 \rightarrow \mu_3 = (\text{FIT-102} - 4) / 16$

As figuras 60 e 61 apresentam a instalação do LIT-101 e LIT-102 na planta piloto de processo industrial.



Figura 60 - . Instalação do LIT-101.

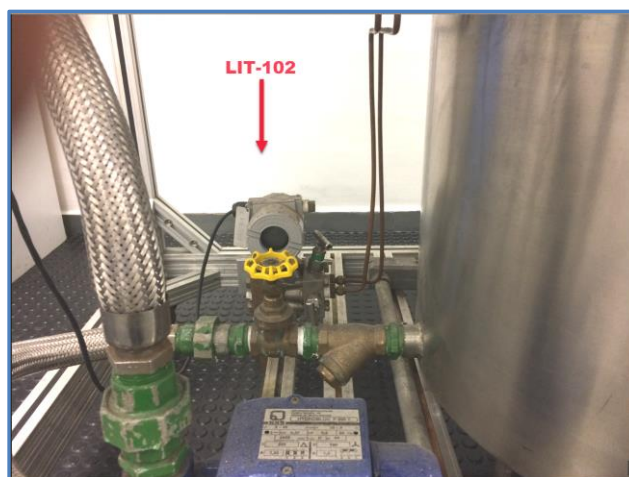


Figura 61 - Instalação do LIT-102.

A telemetria do sinal do LIT-101 e do LIT-102 é devidamente linearizada para o seu grau de evidência, conforme mostrado na figura 62 e descrito na relação:

$LIT-101 \in \mathbb{R} \mid 0 \leq LIT-101 \leq 1$ e proporcional a $4mA \leq LIT-101 \leq 20mA$;

Se $LIT-101 = 4mA \rightarrow \mu_2 = 0 \rightarrow \text{Vazão para Tanque TQ-101} = 0\% (0)$;

Se $LIT-101 = 20mA \rightarrow \mu_2 = 1 \rightarrow \text{Vazão para Tanque TQ-101} = 100\% (1)$;

Se: $4mA \leq LIT-101 \leq 20mA \rightarrow 0 \leq \mu_2 \leq 1 \rightarrow \mu_2 = (LIT-101 - 4) / 16$.

e $\lambda_2 = 1 - \mu_2$

LIT-102 $\in \mathbb{R} \mid 0 \leq \text{LIT-102} \leq 1$ e proporcional a $4\text{mA} \leq \text{LIT-102} \leq 20\text{mA}$;

Se LIT-102 = 4mA $\rightarrow \mu_4 = 0 \rightarrow$ Vazão para Tanque TQ-102 = 0% (0);

Se LIT-102 = 20mA $\rightarrow \mu_4 = 1 \rightarrow$ Vazão para Tanque TQ-102 = 100% (1);

Se: $4\text{mA} \leq \text{LIT-102} \leq 20\text{mA} \rightarrow 0 \leq \mu_4 \leq 1 \rightarrow \mu_4 = (\text{LIT-102} - 4) / 16$
e $\lambda_2 = 1 - \mu_4$.

A Figura 62 exibe o gráfico do grau de evidência μ_2 , μ_4 em função do nível LIT-101 e LIT-102.

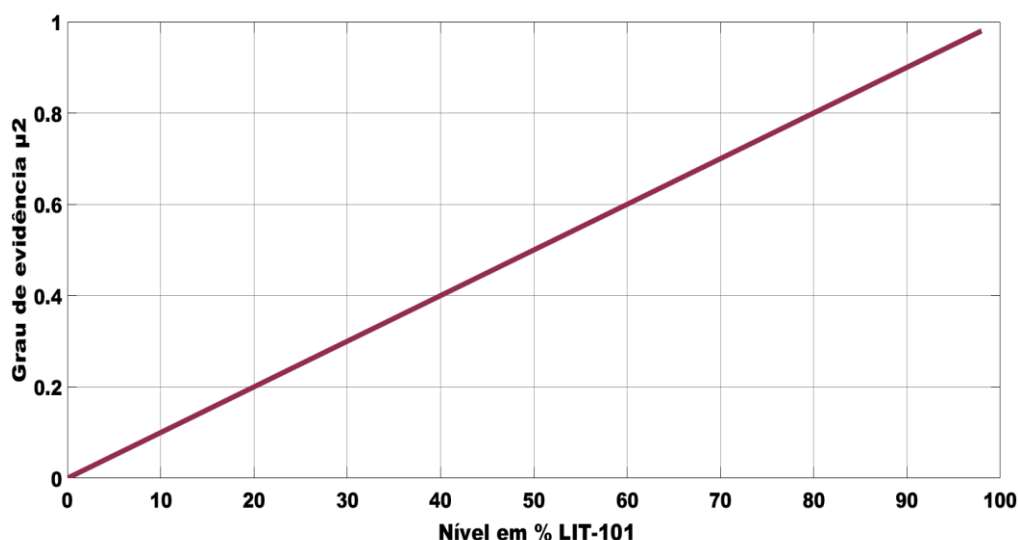


Figura 62 - Grau de evidência μ_2 , μ_4 em função do nível LIT-101 e LIT-102.

A entrada primeiro nó de análise paraconsistente receberá a telemetria de 4 a 20 mA, em função das evidências provenientes do transmissor de vazão FIT-101 e nível LIT-101 para informar à seguinte proposição: “A vazão do FIT-101 e o nível LIT-101 está em seu valor mínimo”.

Os transmissores de vazão e nível instalados ao TQ-101 fornecem os Graus de Evidências Favoráveis μ_1 e μ_2 .

O transmissor FIT-101 será a fonte de evidência favorável (μ_1) e o transmissor LIT-101 a fonte de evidência desfavorável da análise ($\lambda_1 = 1 - \mu_2$), conforme representado na figura 63.

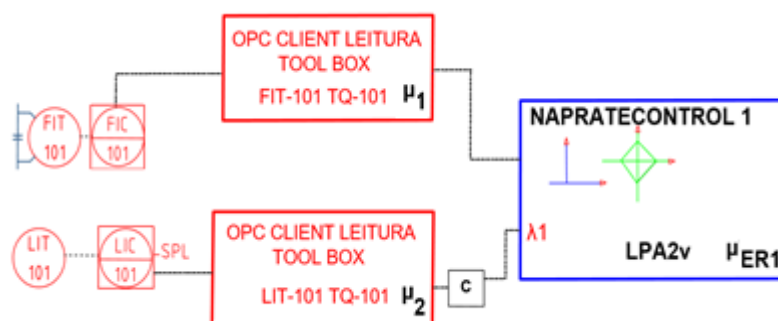


Figura 63 - NAPRATECONTROL 1.

Nesse projeto, foi desenvolvido o banco de dados HDA, devido à necessidade de aquisição das variáveis de leitura FIT-101 C(s), FIT-102 J(s), SPL(s) FIC-101 A(s), SPR(s) FIC-102 G(s), ganho P (proporcional), ganho I (integral) e variáveis de escrita PI(s) Y(s) e I(s) para análise dos valores a distúrbios na demanda, pequenas variações de SPL(s), SPR(s) e resposta à rede RAP de análise paraconsistente conforme o intervalo de tempo relacionado ao tratamento das evidências demonstrado nas tabelas a e b aos parâmetros *NAPRATECONTROL* e PI(s).

A comunicação de dados entre o *HDA OPC tool box Simulink* foi realizada com a topologia da rede 485 e *ethernet*, conforme a figura 64.

Tabela 2 - HDA- Histórico do Banco de Dados OPC tool box Matlab Simulink SPL(s).

Tempo	$\lambda 4$	Tempo	$\lambda 4$
0	1	3581	0.4400
0.5000	1	3.5815e+03	0.4400
1.0000	1	3582	0.4400
1	0.3200	3.5825e+03	0.4400
1.0000	0.3200	3583	0.4400
1.5000	0.3200	3.5835e+03	0.4400
2	0.3200	3584	0.4400
2.0294	0.3200	3.5845e+03	0.4400
2.0294	0.3200	3585	0.4400
2.5000	0.3200	3.5855e+03	0.4400
3	0.3200	3586	0.4400
3.5000	0.3200	3.5865e+03	0.4400
4	0.3200	3587	0.4400
4.5000	0.3200	3.5875e+03	0.4400
5	0.3200	3588	0.4400
5.5000	0.3200	3.5885e+03	0.4400
6	0.3200	3589	0.4400
6.5000	0.3200	3.5895e+03	0.4400
7	0.3200	3590	0.4400
7.2666	0.3200	3.5905e+03	0.4400
7.2666	0.3200	3591	0.4400
7.2666	0.3200	3.5915e+03	0.4400
7.5000	0.3200	3592	0.4400
7.7334	0.3200	3.5925e+03	0.4400
8	0.3200	3593	0.4400
8.5000	0.3200	3.5935e+03	0.4400
9	0.3200	3594	0.4400
9.5000	0.3200	3.5945e+03	0.4400
10	0.3200	3595	0.4400
10.5000	0.3200	3.5955e+03	0.4400
11	0.3200	3596	0.4400
11.0518	0.3200	3.5965e+03	0.4400
11.1037	0.3200	3597	0.4400
11.1850	0.3200	3.5975e+03	0.4400
11.2782	0.3200	3598	0.4400
11.3892	0.3200	3.5985e+03	0.4400
11.5000	0.3200	3599	0.4400
11.5858	0.3200	3.5995e+03	0.4400
11.6716	0.3200	3600	0.4400

(A)

(B)

Na Figura 65 consta o gráfico do Grau de evidência desfavorável $\lambda 4$ SPL PI A(s).

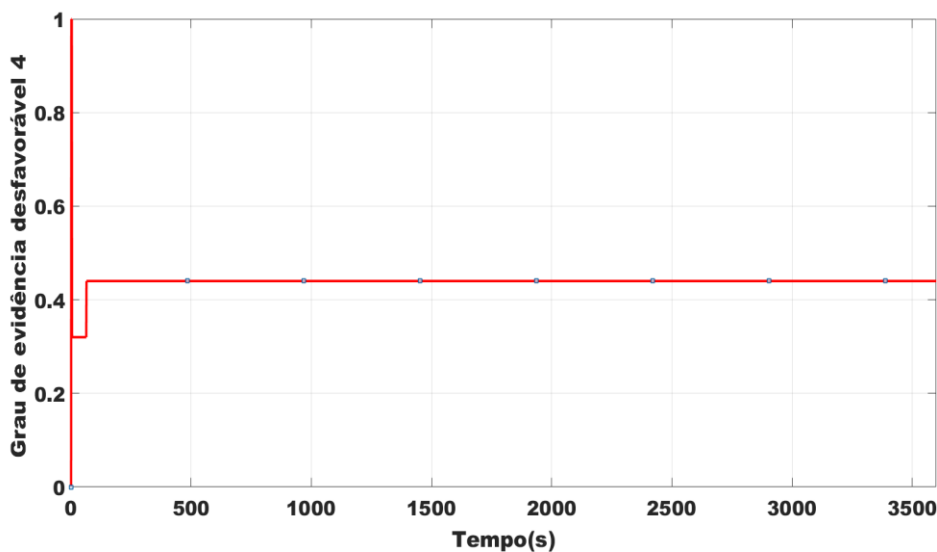


Figura 65 - Grau de evidência desfavorável λ_4 SPL PI A(s).

De igual modo, a figura 66 representa o Gráfico grau de contradição normalizado μ_{ctr1} NAPRATECONTROL 1.

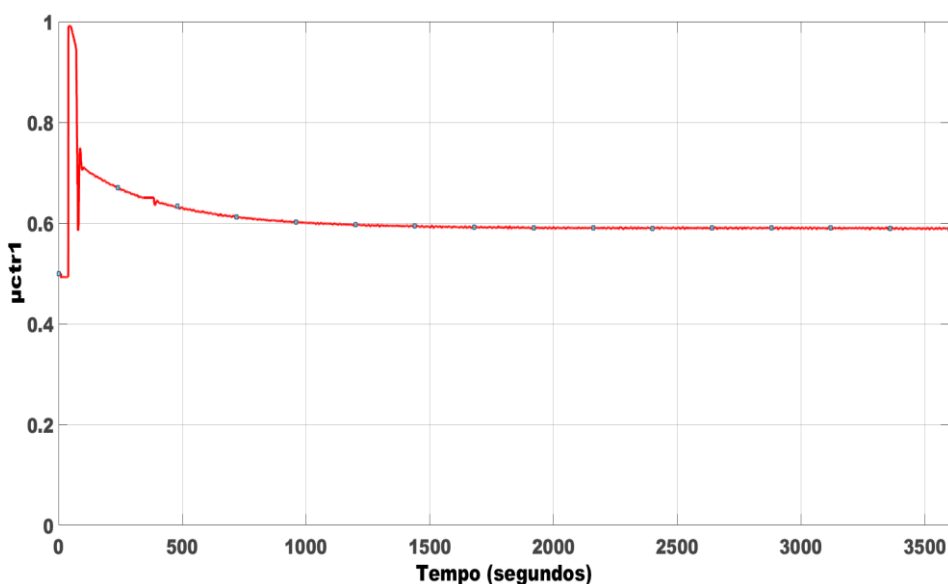


Figura 66 - Gráfico grau de contradição normalizado μ_{ctr1} NAPRATECONTROL 1.

Os valores de Graus de Contradição Normalizados, exibidos na figura 66, iniciam em 0,5, incrementando a 1,0, indicando que estão estabelecendo um estado lógico Inconsistente à Proposição analisada. O estado dinâmico das grandezas favoráveis μ_1 **FIT-101** e desfavorável $1 - \mu_2$ **LIT-101** contribui para o incremento do valor do Grau de Contradição Normalizado com tendência a 1,0, atribuindo uma contradição total à proposição. O estado lógico é o totalmente Inconsistente, conforme o gráfico demonstra.

A tabela 3 mostra o comportamento do grau de contradição normalizado em análise paraconsistente *NAPRATECONTROL 1*, considerando que as fontes de evidência não apresentam erros em relação ao nível real do tanque T-102, devido à parametrização e calibração efetuada no FIT-101, FIT-102, LIT-101 e LIT-102 em função dos *ranges* em unidades de engenharia estabelecidos pelos especialistas, tal como descrito no capítulo 2, obtendo-se uma resposta padronizada de 0 a 1, conforme o distúrbio inserido pelo especialista.

Tabela 3 - Histórico banco de dados *OPC tool box Matlab Simulink* μ ctr1 grau de contradição normalizado *NAPRATECONTROL 1*.

Tempo(s)	μ ctr1	Tempo(s)	μ ctr1
0	0.5000	3581	0.5893
0.5000	0.5000	3.5815e+03	0.5893
1	0.5000	3582	0.5887
1.5000	0.5000	3.5825e+03	0.5887
2	0.5000	3583	0.5887
2.5000	0.5000	3.5835e+03	0.5898
3	0.5000	3584	0.5898
3.5000	0.5000	3.5845e+03	0.5893
4	0.5000	3585	0.5889
4.5000	0.5000	3.5855e+03	0.5889
5	0.5000	3586	0.5896
5.5000	0.5000	3.5865e+03	0.5896
6	0.5000	3587	0.5893
6.5000	0.5000	3.5875e+03	0.5893
7	0.5000	3588	0.5882
7.5000	0.5000	3.5885e+03	0.5882
8	0.5000	3589	0.5880
8.5000	0.5000	3.5895e+03	0.5891
9	0.5000	3590	0.5895
9.5000	0.5000	3.5905e+03	0.5897
10	0.5000	3591	0.5897
10.5000	0.4909	3.5915e+03	0.5891
11	0.4928	3592	0.5886
11.5000	0.4928	3.5925e+03	0.5887
12	0.4928	3593	0.5887
12.5000	0.4928	3.5935e+03	0.5889
13	0.4928	3594	0.5889
13.5000	0.4928	3.5945e+03	0.5893
14	0.4928	3595	0.5893
14.5000	0.4928	3.5955e+03	0.5888
15	0.4928	3596	0.5888
15.5000	0.4930	3.5965e+03	0.5894
16	0.4928	3597	0.5894
16.5000	0.4928	3.5975e+03	0.5893
17	0.4930	3598	0.5893
17.5000	0.4930	3.5985e+03	0.5888
18	0.4929	3599	0.5888
18.5000	0.4929	3.5995e+03	0.5882
19	0.4926	3600	0.5882

(A)

(B)

Na tabela 3(A) o valor do Grau de Contradição Normalizado decrementa em 0,5, indicando que existe uma contradição à proposição analisada. Nesse **NAPRATECONTROL 1** os valores de Graus de Contradição Normalizados, abaixo de 0,5, tendem a zero.

Na tabela 3(B) estão indicadas as evidências contraditórias no sentido de estabelecer um estado lógico de Indeterminação ao valor do SP Local FIC-101.

A tabela A1 (Anexo I) mostra o comportamento do $\mu ER1$ grau de evidência resultante do **NAPRATECONTROL 1** em análise paraconsistente, obtendo-se uma resposta padronizada de 0 a 1, conforme o distúrbio inserido pelo especialista.

O **NAPRATECONTROL 1** tem como finalidade estabelecer os dados tratados da variável de vazão FIT-101 C(s) e LIT-101 do TQ-101 em regime de amortecimento ao grau de evidência resultante real $\mu ER1$, portanto, neste projeto, representa a principal fonte de evidência de informação para os demais **NAPRATECONTROL's**.

A monitoração da telemetria digital integrada ao *OPC CLIENT tool box Simulink* (leitura dos transmissores de vazão e nível) verifica o estado de medição dos instrumentos em função das equações (21), (47) e (48).

Na tabela A1 (Anexo I) os valores de $\mu ER1$ iniciam em 0,0 incrementando a 1,0, os resultados obtidos nas equações indicam que um **NAPRATECONTROL 1** pode ser utilizado como gerador de Graus de Evidências, eis que os valores apresentam regime de amortecimento de primeira ordem, devido à condição do grau desfavorável $1 - \mu_2$ LIT-101 de medição, conforme equação (63).

A tabela A2 (Anexo II) mostra o comportamento do $\mu ER2$ grau de evidência do **NAPRATECONTROL 2** em análise paraconsistente, obtendo uma resposta padronizada de 0 a 1, conforme o distúrbio inserido pelo especialista.

As tabelas A2(A) e A2(B) demonstram o comportamento de $\mu ER2$, grau de evidência resultante do **NAPRATECONTROL 2** em análise paraconsistente, tratamento de dados da telemetria digital FIT-102 J(s) e LIT-102, obtendo-se uma resposta padronizada de 0 a 1 em função das equações (21), (47) e (48).

O tratamento de dados ($\mu ER1$ e $\mu ER2$) realizado pelos **NAPRATECONTROL 1** E **NAPRATECONTROL 2**, tem a finalidade de condicionar os dados de vazão FIT-101 C(s), LIT-101, FIT-102 J(s) e LIT-102 em função de pequenas variações da PV no *Set point* SPL(s) ou distúrbios na demanda.

Os valores apresentados na tabela A1 (Anexo I - grau de evidência favorável), bem como na tabela A2 (Anexo II - grau de evidência desfavorável), serão as entradas de evidência do *NAPRATECONTROL 3*, que irá tratar os dados a um valor de μ_{ER3} (PV condicionada a ser controlada pelo PI a uma resposta de controle contínuo em regime permanente).

A tabela A3 (Anexo III) e a figura 68 mostram o comportamento de μ_{ER3} grau de evidência resultante real na saída do *NAPRATECONTROL 3* em análise LPA2v, obtendo-se uma resposta padronizada de 0 a 1 em função das entradas de μ_{ER1} e μ_{ER2} .

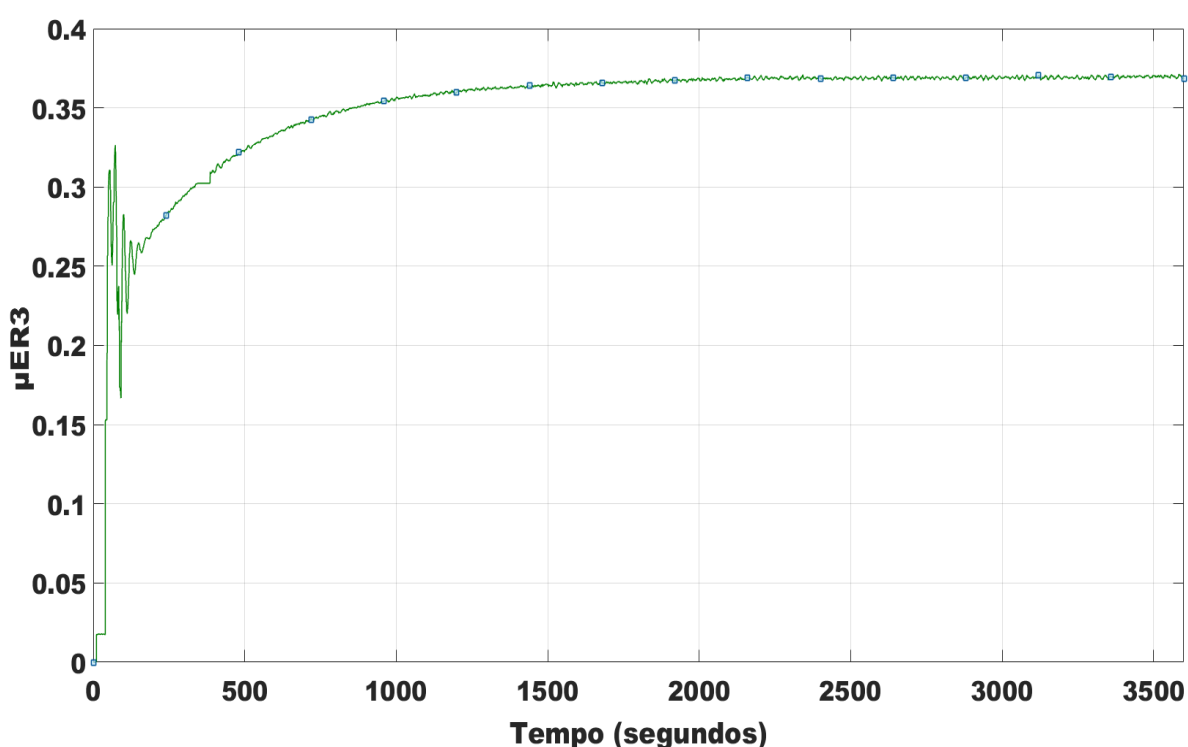


Figura 67 - Gráfico grau de evidência resultante real μ_{ER3} *NAPRATECONTROL 3*.

A saída μ_{ER3} apresenta uma resposta amortecida em função do LIT-101 (nível TQ-101) e do LIT-102 (nível TQ-102), estabelecendo o PV tratado e a fonte de informação (grandeza favorável – entrada de informação do *NAPRATECONTROL 4*).

A figura 68 mostra que a saída μ_{ER3} do *NAPRATECONTROL 3* é a PV (variável de processo) referente aos sinais de medição dos transmissores de vazão C(s), J(s), descritos na figura 24, e de nível tratado pela análise LPA2v referente às grandezas favoráveis μ_1 (FIT-101), μ_3 (FIT-102), $1-\mu_2$ (LIT-101), $1-\mu_4$ (LIT-102).

Portanto a PV padronizada pela análise de tal *NAP* será à entrada do próximo *NAPRATECONTROL 4* na qual irá ser tratada ao SPL do PI(s) FIC-101 A(s), conforme o distúrbio descrito na tabela 2, o mesmo valor padronizado da PV é a entrada do *NAPRATECONTROL 5* a ser tratada pela análise LPA2v ao SPR DO PI(s) FIC-102 G(s), conforme figura 56.

A tabela A4 (Anexo IV) e a figura 68 mostram o comportamento de $\mu ER4$ grau de evidência resultante real na saída do *NAPRATECONTROL 4* em análise LPA2v, obtendo-se uma resposta padronizada de 0 a 1 em função das entradas de $\mu ER3 =$ PV e SPL PI(s) A(s) FIC – 101.

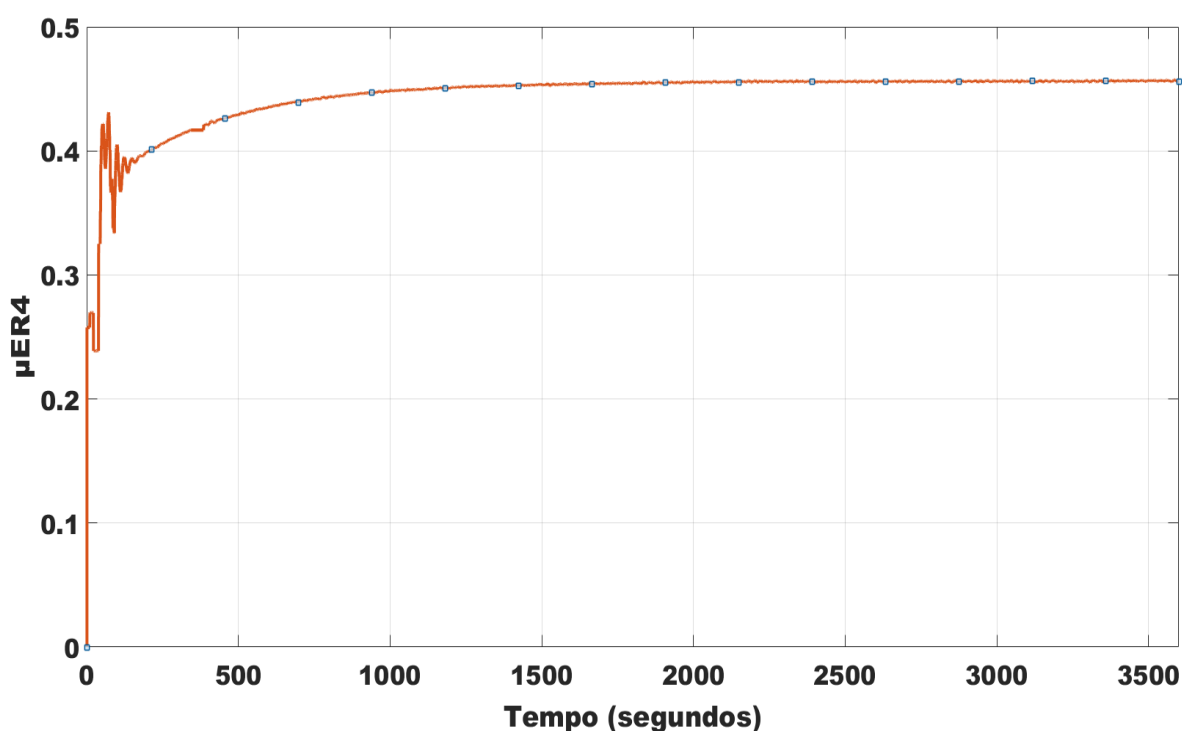


Figura 68 - Gráfico grau de evidência resultante real $\mu ER4$ *NAPRATECONTROL 4*.

A saída $\mu ER4$ e $\mu ctr4$ do *NAPRATECONTROL 4* tem como finalidade fornecer o valor de parametrização do ganho proporcional P e integral I do controlador PI(s) contínuo *Matlab Simulink* A(s) FIC-101 mostrado na figura 20 estabelecendo a função de transferência $y(s) = \left[Pe(s) + I \left(\frac{1}{s} \right) e(s) \right] + y_0$ descrita no capítulo 4.

A tabela A5 (Anexo V) e a figura 69 mostram o comportamento do $\mu ctr4$ grau de contradição normalizado do *NAPRATECONTROL 4* em análise LPA2v.

O $\mu ctr4$ é utilizado como ganho integral I devido ao incremento de correção obtido pelo *NAPRATECONTROL 4* em função da grandeza desfavorável $1 - \mu 2$ **LIT-101** com isso obtêm-se uma normalização no Grau de Contradição, e seus valores resultantes ficarão no intervalo real fechado entre 0 e 1.

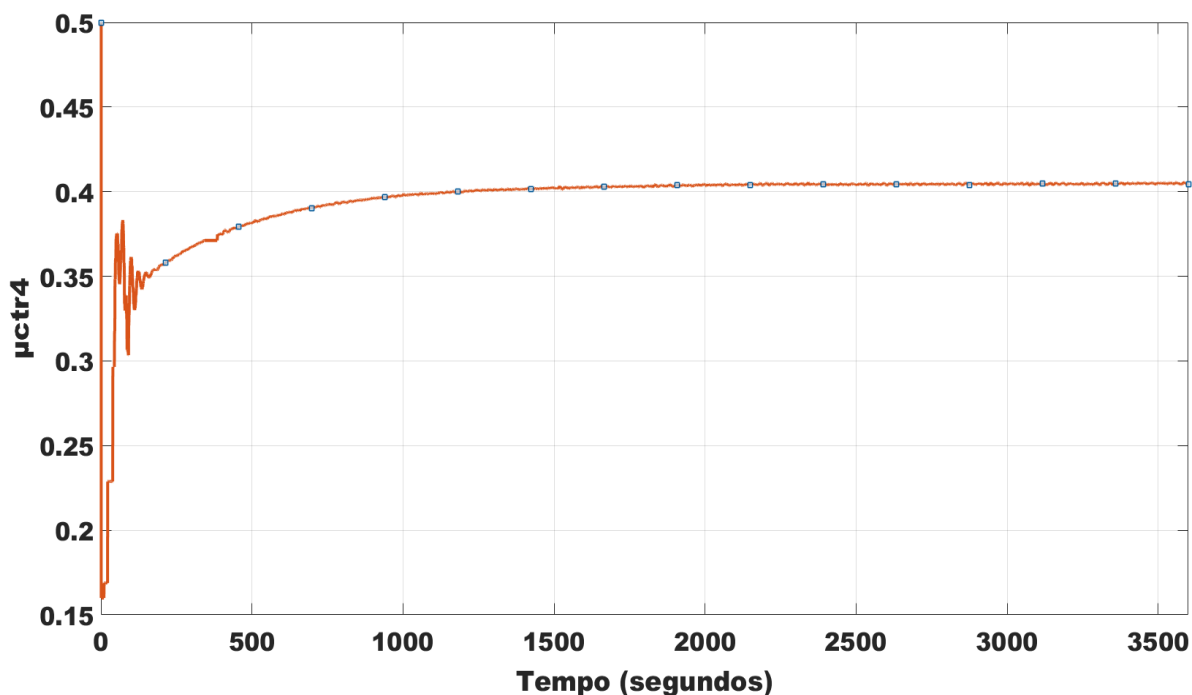


Figura 69 - Gráfico grau de contradição normalizado $\mu ctr4$ *NAPRATECONTROL 4*.

A tabela A6 (Anexo VI) e a figura 70 mostram o comportamento do $\mu ER5$ grau de evidência resultante real na saída do *NAPRATECONTROL 5* em análise LPA2v, obtendo-se uma resposta padronizada de 0 a 1 em função das entradas de $\mu ER3 = P_v$ e $SPR PI(s) G(s) FIC - 102$.

A saída $\mu ER5$ e $\mu ctr5$ do *NAPRATECONTROL 5* tem como finalidade fornecer o valor de parametrização do ganho proporcional P e integral I do controlador $PI(s)$ contínuo *Matlab Simulink G(s) FIC-102* mostrado na figura 21, estabelecendo a função de transferência $I(s) = \left[Pe(s) + I \left(\frac{1}{s} \right) e(s) \right] + I_o$ descrita no capítulo 4.

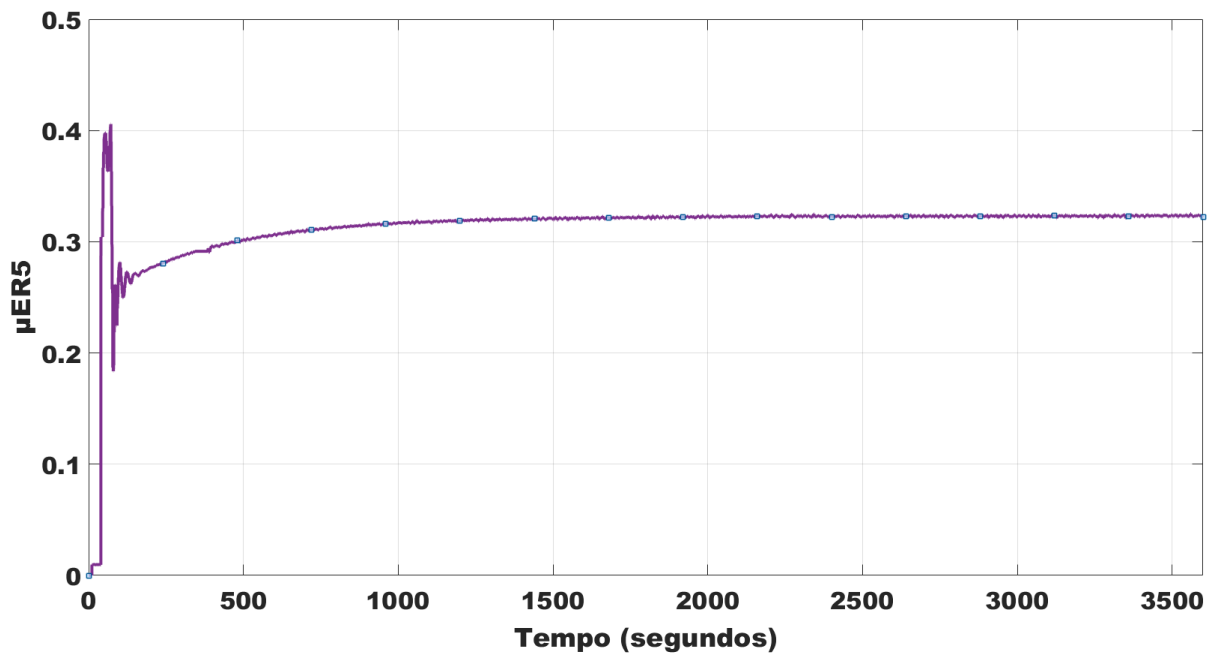


Figura 70 - Gráfico grau de evidência resultante μ_{ER5} NAPRATECONTROL 5.

A tabela A7 (Anexo VII) e a figura 71 mostram o comportamento do μ_{ctr5} grau de contradição normalizado do NAPRATECONTROL-5 em análise LPA2v. O μ_{ctr5} é utilizado como ganho integral I devido ao incremento de correção obtido pelo NAPRATECONTROL 5 em função da grandeza desfavorável $1 - \mu_4$ LIT-102, com isso obtêm-se uma normalização no Grau de Contradição, assim seus valores resultantes encontrados ficarão no intervalo real fechado entre 0 e 1.

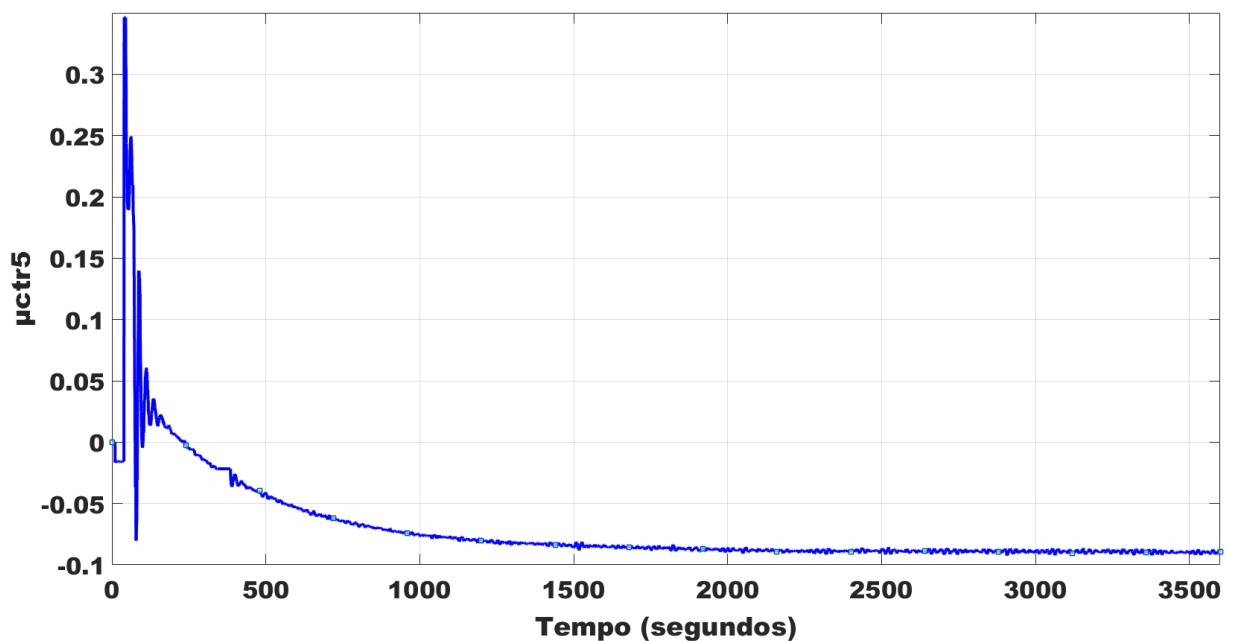


Figura 71 - Gráfico grau de contradição normalizado μ_{ctr5} NAPRATECONTROL 5.

Os valores negativos apresentados na tabela A7 (Anexo VII) mostram que a PV superior ao valor do SP local PI(s) contínuo paralelo A(s) FIC-102 e SP remoto PI(s) paralelo G(s) FIC-102 é fundamental para alterar o sentido de correção referente às equações $I(s) = \left[Pe(s) + I \left(\frac{1}{s} \right) e(s) \right] + Io$ e $y(s) = \left[Pe(s) + I \left(\frac{1}{s} \right) e(s) \right] + yo$ aumentando o tempo de resposta da atuação dos PI(s) e diminuindo a intensidade de velocidade nos inversores de frequência $FY - 101^{\frac{I}{F}}$ e $FY - 102^{\frac{I}{F}}$ atuantes nas bombas centrífugas $P - 101$ e $P - 102$.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são mostradas as curvas de amortecimentos referentes à posição hidrostática de nível e os valores que estão relacionados ao controle de razão da malha.

Conforme descrito, o grau de certeza desfavorável $1 - \mu_2$ LIT-101, $1 - \mu_4$ LIT-102 é fundamental para o tratamento e normalização dos graus de evidência resultantes reais $\mu_{ER1}, \mu_{ER2}, \mu_{ER3}, \mu_{ER4}$ e μ_{ER5} e para os graus de contradição normalizados $\mu_{ctr1}, \mu_{ctr2}, \mu_{ctr3}, \mu_{ctr4}$ e μ_{ctr5} .

A figura 72 apresenta a curva de amortecimento obtida em função do degrau de 50% e 30%, aplicada ao $FY - 101 \frac{I}{F}$ e $FY - 102 \frac{I}{F}$

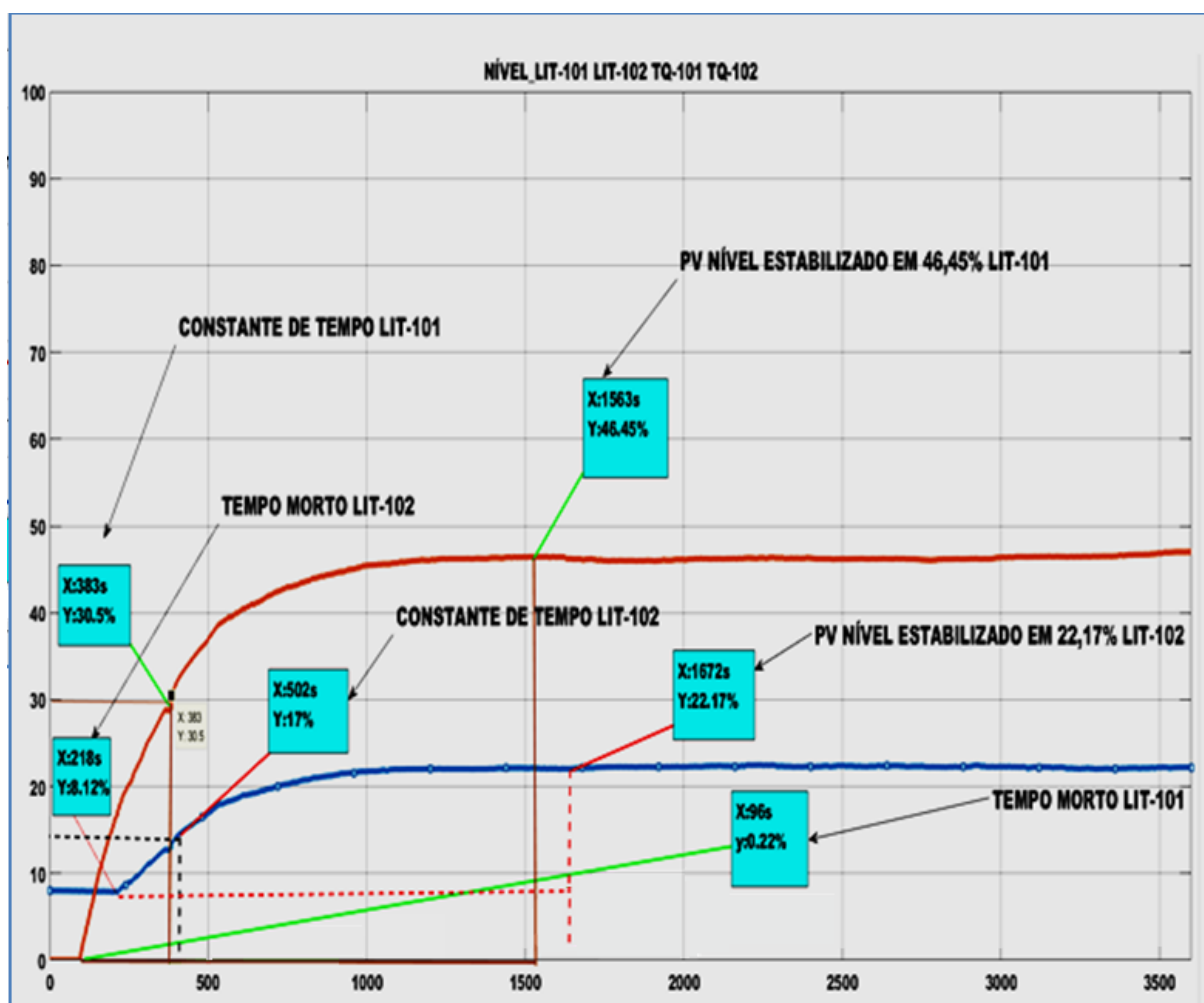


Figura 72 - Levantamento da constante de tempo τ e tempo morto t LIT-101 E LIT-102 OPC CLIENT com OPC SERVER CD600 SMAR.

Como demonstrado no gráfico (figura 72), o transmissor de nível LIT-101 e LIT-102 apresenta excelente estabilidade e resposta instantânea ao degrau de 50% e 30% aplicado.

Os valores de sintonia, demonstrados no gráfico (figura 72), foram obtidos pelo método (IMC) em PID(s) contínuo paralelo FIC-101, conforme demonstram as equações:

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta mv} = \frac{66,685\%}{50\%} = 1,3337$$

$$P = \frac{\tau}{K \cdot (\lambda + t)} = \frac{1s}{1,3337 \cdot (1s + 1s)} = 0,37489$$

De igual modo, o fator λ adotado para o desempenho do PI(s) é $1s = t$ (tempo morto), para ajuste de desempenho do PI(s) Paralelo, foi obtido na equação:

$$I = \tau, 4 \cdot (\lambda + t) = 1s, 4(1s + 1s) = 1s = 0,016min$$

O valor de I deve ser escolhido em função do menor valor entre a constante de tempo e tempo morto:

$$\tau \text{ e } 4 \cdot (\lambda + t)$$

Valores de Sintonia foram obtidos pelo método (IMC) em PI(s) Contínuo paralelo FIC-102, conforme equação:

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta mv} = \frac{18,74\%}{30\%} = 0,624666$$

$$P = \frac{\tau}{K \cdot (\lambda + t)} = \frac{1s}{0,624666 \cdot (1s + 1s)} = 0,80043$$

Os Valores de Sintonia foram obtidos pelo método (IMC) em PI(s) Contínuo paralelo LIC-101, conforme as equações:

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta mv} = \frac{46,45\% - 0,22\%}{50\%} = 0,9246$$

$$P = \frac{\tau}{K \cdot (\lambda + t)} = \frac{383s}{0,9246 \cdot (96s + 96s)} = 2,1575$$

O fator λ adotado para o desempenho do PI(s) é $1s = t$ (tempo morto) para ajuste de desempenho do PI(s) Paralelo:

$$I = \tau, 4 \cdot (\lambda + t) = 383s, 4(96s + 96s) = 383s = 6,3833\text{min}$$

Os Valores de Sintonia foram obtidos pelo método (IMC) em PI(s) Contínuo paralelo LIC-102 conforme a equação:

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta mv} = \frac{22,17\% - 8,12\%}{30\%} = 0,46833$$

$$P = \frac{\tau}{K \cdot (\lambda + t)} = \frac{502s}{0,46833 \cdot (218s + 218s)} = 2,4585$$

O fator λ adotado para o desempenho do PI(s) é $1s = t$ (tempo morto) para ajuste de desempenho do PI(s) Paralelo, foi determinado pela equação:

$$I = \tau, 4 \cdot (\lambda + t) = 502s, 4(218s + 218s) = 502s = 8,3666 \text{ min}$$

Na figura 73 são exibidas as curvas de amortecimentos referentes à posição hidrostática de nível, conforme a equação $\mathbf{q}(s) \cdot \mathbf{R} \cdot \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)}\right) = \mathbf{h}(t)$, desenvolvida no capítulo 3 e a parametrização feita aos transmissores LIT-101 e LIT-102, conforme as equações (23), (24), (25) e (26).

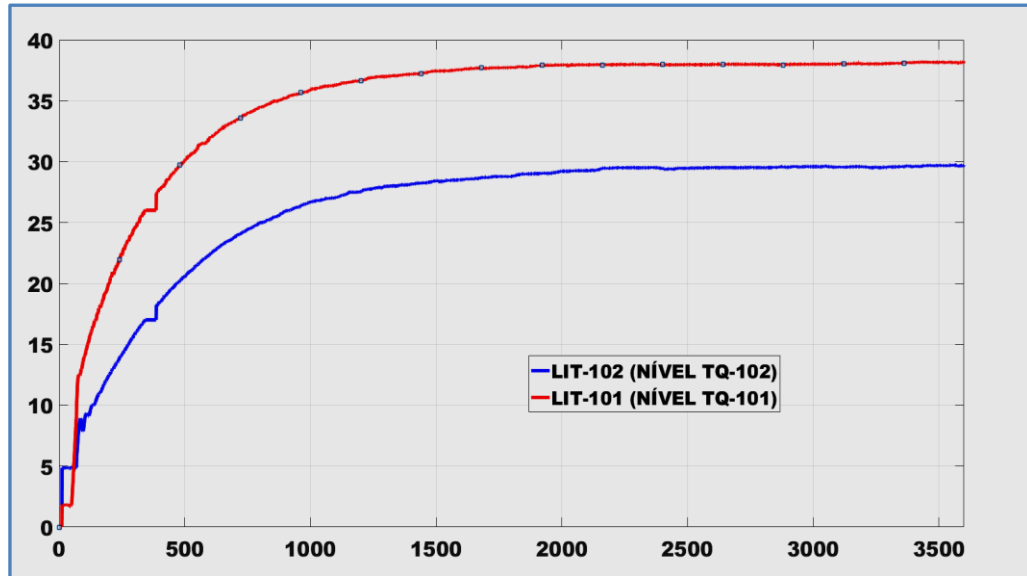


Figura 73 - Curva de amortecimento posição hidrostática nível LIT-101 e LIT-102.

As figuras 74 e 75 mostram o comportamento do grau de evidência desfavorável $\lambda_1 = 1 - \mu_2$ LIT-101, $\lambda_2 = 1 - \mu_4$ LIT-102 referente à figura 72.

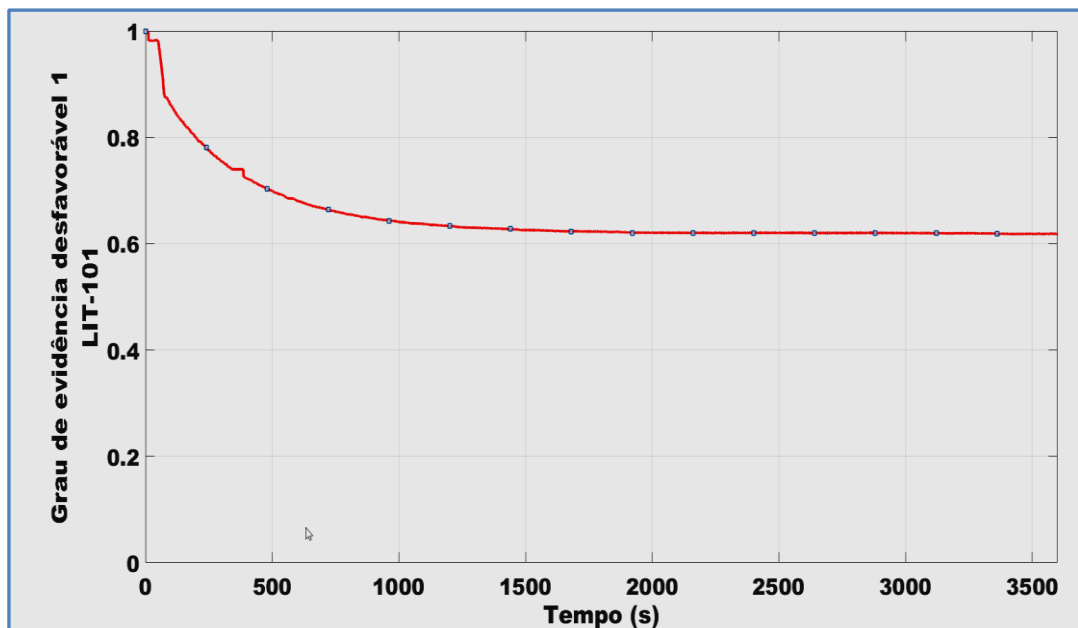


Figura 74 - Gráfico λ_1 grau de evidência desfavorável LIT-101.

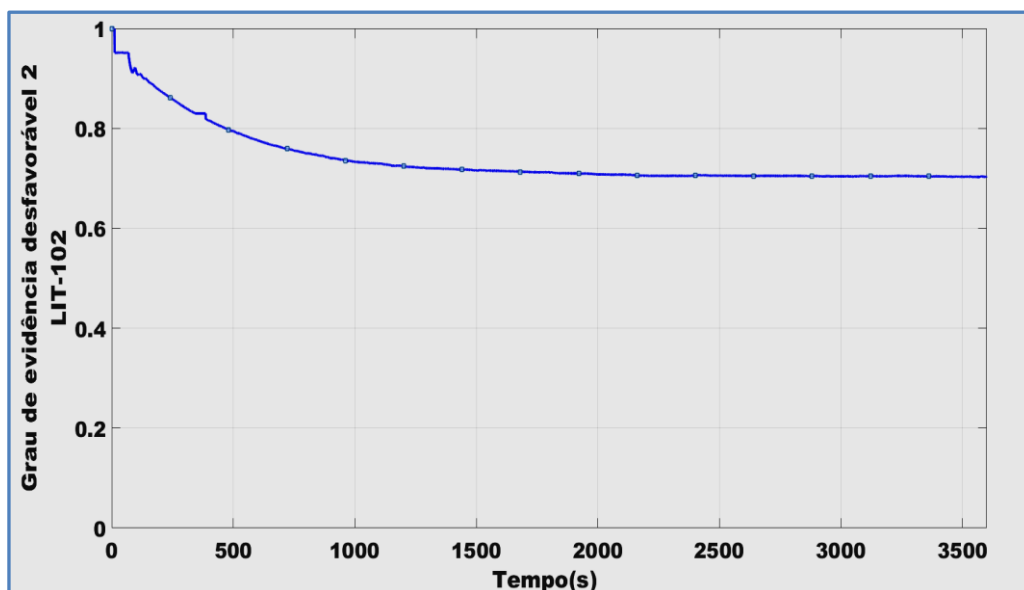


Figura 75 - Gráfico λ_2 grau de evidência desfavorável LIT-102.

Em função do degrau ascendente e descendente, descrito no capítulo 6, e demonstrado na tabela 1, atribuído ao SPL (*Set point* local do PI(s) Contínuo Paralelo FIC-101 A(s)) λ_4 entrada do grau de evidência desfavorável do *NAPRATECONTROL* 4, os valores obtidos em SPR do PI(s) contínuo paralelo G(s) FIC-102 é igual ao λ_5 grau de evidência desfavorável e a entrada de informação do *NAPRATECONTROL* 5. Este comportamento é mostrado na figura 76 e seus valores na tabela A8 (Anexo VIII).

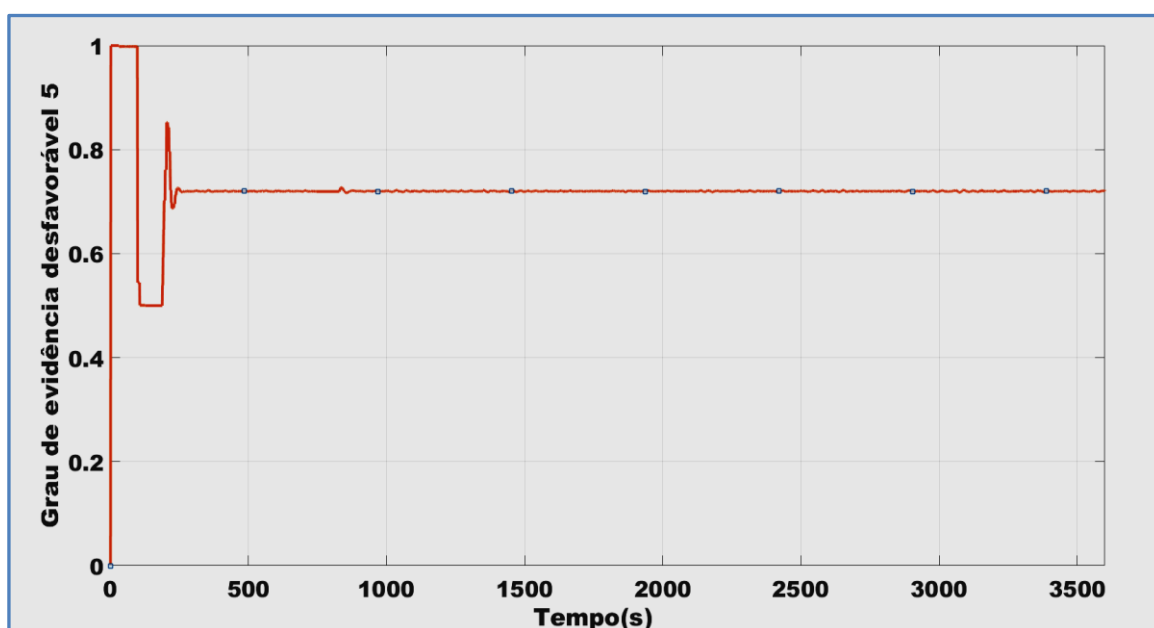


Figura 76 - Grau de evidência desfavorável λ_5 SPR PI G(s).

Os valores da PV FIT-101 C(s) na tabela A8 (Anexo VIII) comprovam a precisão do tratamento da variável controlada no intervalo da tabela A8(B) em 55,9672% comparado ao $\lambda_4 = 0,44$ SPL=0,56, $ERRO = (0,559672 - 0,560000) * 100 = -0,0328\% + 1 = 96,72\%$, estabelecendo a precisão de tratamento de incerteza ***φE4*** LPA2v NAPRATECONTROL 4 de +/- 80,84% (Tabela A9 – Anexo IX).

O tratamento de incerteza atribuído pelo NAPRATECONTROL 4 à telemetria PI(s) FIC-101 e PV FIT-101 C(s) apresentou um valor de precisão superior ao esperado pelo LPA2v, estabelecendo a integridade da rede de análise paraconsistente aos valores 0 e 1. Tal resultado tem grande influência sobre os valores de sintonia que serão atribuídos de forma dinâmica aos parâmetros PI(s) FIC-101 A(s).

Os valores da PV FIT-102 J(s), constantes na tabela A1 (Anexo I), comprovam a precisão do tratamento da variável controlada no intervalo apresentado na tabela 4(B) em 28,0238% comparado ao $\lambda_5 = 0,72$ SPL=0,28, $ERRO = (0,280238 - 0,28) * 100 = 1 - 0,0238\% = +/- 97,62\%$, estabelecendo a precisão de tratamento de incerteza LPA2v NAPRATECONTROL 5 de +/- 91,06% (Tabela A10 - Anexo X).

O tratamento de incerteza atribuído pelo NAPRATECONTROL 5 à telemetria PI(s) FIC-102 e PV FIT-102 J(s) também apresentou um valor de precisão superior ao esperado pelo LPA2v, estabelecendo a confiabilidade da rede de análise paraconsistente aos valores 0 e 1.

Este resultado tem grande importância para os valores de sintonia que serão atribuídos de forma dinâmica aos PI(s) FIC-102 G(s).

A tabela 4 apresenta o Histórico banco de dados (HDA) OPC *tool box Matlab Simulink* µ1 grau de evidência favorável FIT-101 C(s).

Tabela 4- HDA- Histórico banco de dados OPC *tool box Matlab Simulink* $\mu 1$ grau de evidência favorável FIT-101 C(s).

Tempo(s)	$\mu 1$	Tempo(s)	$\mu 1$
0	0	3581	0.5602
0.5000	0	3.5815e+03	0.5602
1.0000	0	3582	0.5590
1	0	3.5825e+03	0.5590
1.0000	0	3583	0.5590
1.5000	0	3.5835e+03	0.5612
2	0	3584	0.5612
2.0294	0	3.5845e+03	0.5602
2.0294	0	3585	0.5595
2.5000	0	3.5855e+03	0.5595
3	0	3586	0.5602
3.5000	0	3.5865e+03	0.5602
4	0	3587	0.5597
4.5000	0	3.5875e+03	0.5597
5	0	3588	0.5580
5.5000	0	3.5885e+03	0.5580
6	0	3589	0.5580
6.5000	0	3.5895e+03	0.5602
7	0	3590	0.5602
7.2666	0	3.5905e+03	0.5605
7.2666	0	3591	0.5605
7.2666	0	3.5915e+03	0.5592
7.5000	0	3592	0.5592
7.7334	0	3.5925e+03	0.5595
8	0	3593	0.5595
8.5000	0	3.5935e+03	0.5600
9	0	3594	0.5600
9.5000	0	3.5945e+03	0.5602
10	0	3595	0.5602
10.5000	0	3.5955e+03	0.5597
11	0.0037	3596	0.5597
11.0518	0.0037	3.5965e+03	0.5600
11.1037	0.0037	3597	0.5600
11.1850	0.0037	3.5975e+03	0.5602
11.2782	0.0037	3598	0.5602
11.3892	0.0037	3.5985e+03	0.5597
11.5000	0.0037	3599	0.5597
11.5858	0.0037	3.5995e+03	0.5580
11.6716	0.0037	3600	0.5580

(A)

(B)

As figuras 77 e 78 mostram os gráficos para parametrização do ganho proporcional P referente ao PI(s) contínuo paralelo *Matlab OPC tool box* A(s) FIC-101 e G(s) FIC-102 obtidos pelo tratamento padronizado paraconsistente LPA2v *NAPRATECONTROL* 4 e *NAPRATECONTROL* 5 ($\mu ER4$, $\mu ER5$ = ganho proporcional).

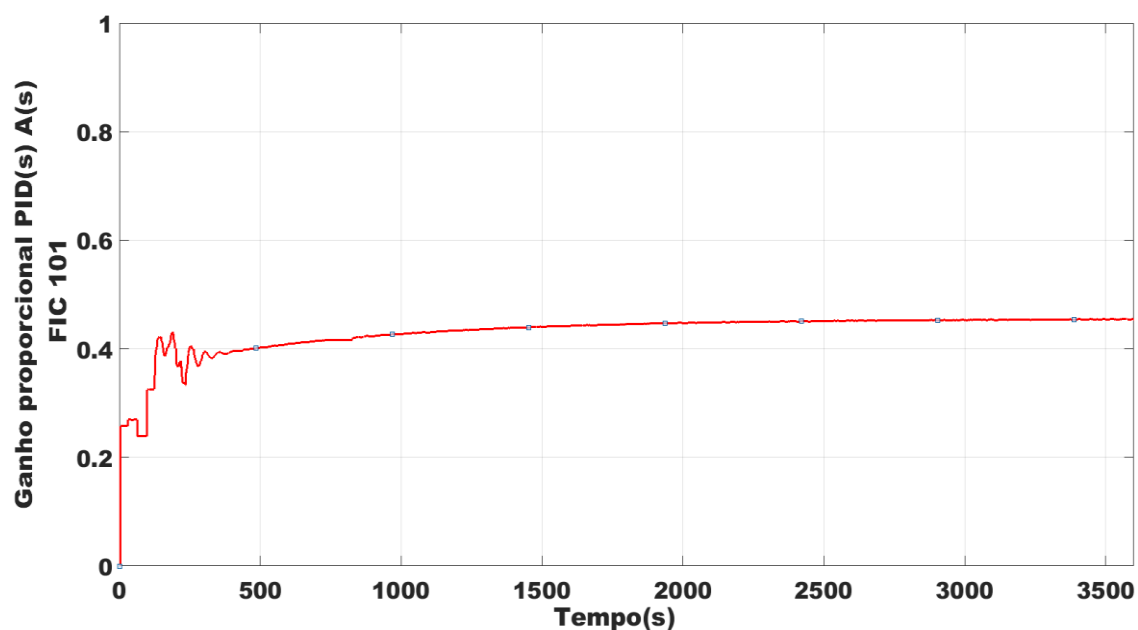


Figura 77 - Gráfico ganho proporcional (P) PI(s) A(s) FIC-101.

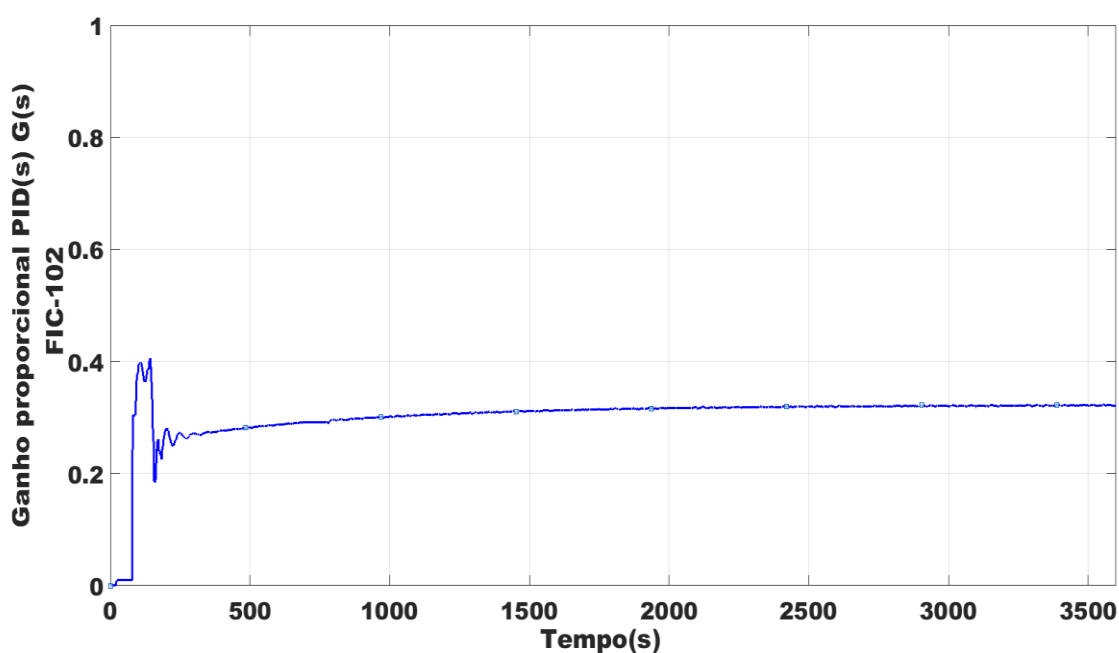


Figura 78 - Gráfico ganho proporcional (P) PI(s) G(s) FIC-102.

As figuras 79 e 80 mostram os gráficos para parametrização do ganho integral referente ao PI(s) contínuo paralelo Matlab *OPC tool box* A(s) FIC-101 e G(s) FIC-102 obtidos pelo tratamento padronizado paraconsistente LPA2v NAPRATECONTROL 4 e NAPRATECONTROL 5 (μ_{ctr4} , μ_{ctr5} = ganho integral).

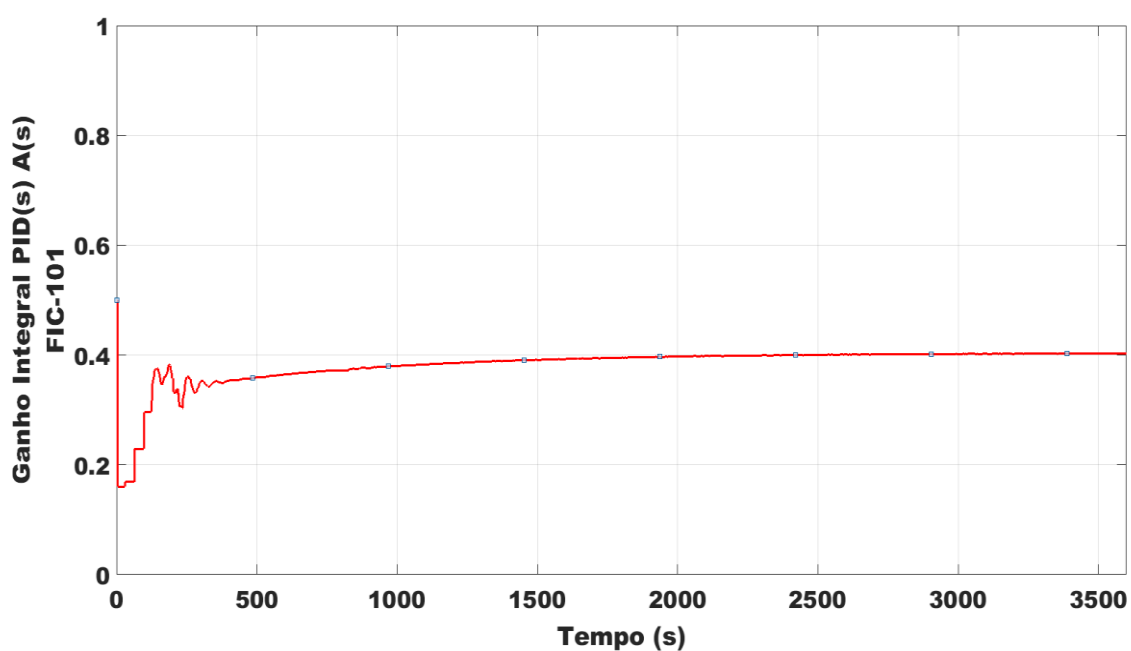


Figura 79 - Gráfico ganho integral (I) PI(s) A(s) FIC-101.

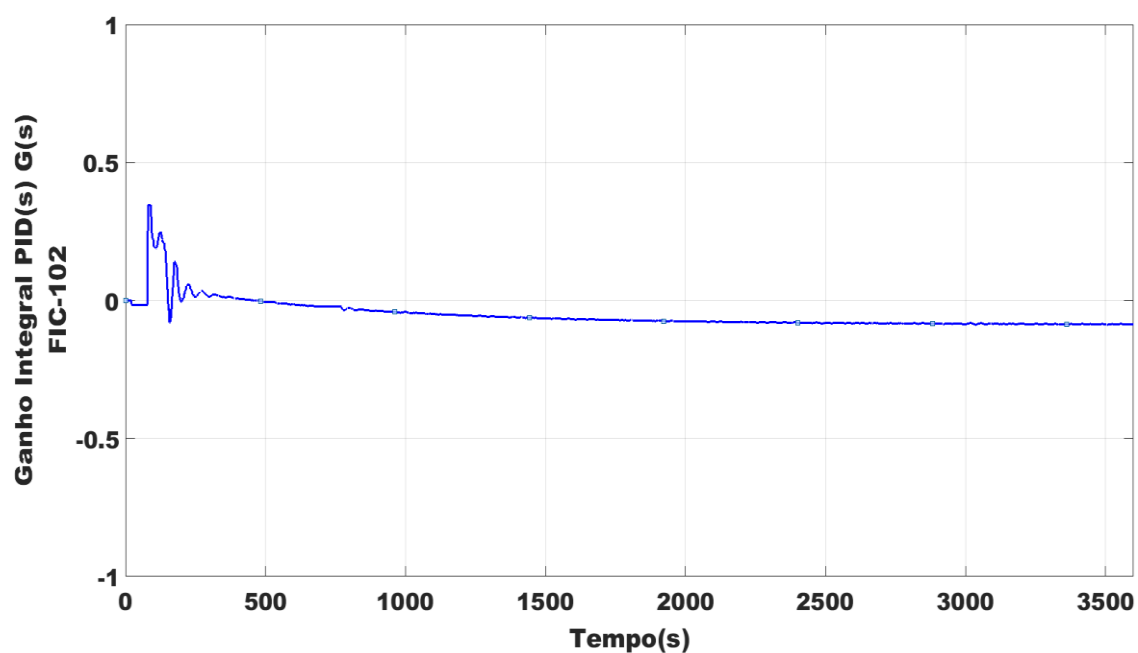


Figura 80 - Gráfico ganho integral (I) PI(s) G(s) FIC-102.

A figura 81 apresenta a curva de resposta do PI(s) A(s) contínuo paralelo FIC-101 em função dos parâmetros P (proporcional) e I (integral) obtidos na análise paraconsistente padronizada pelo *NAPRATECONTROL 4*.

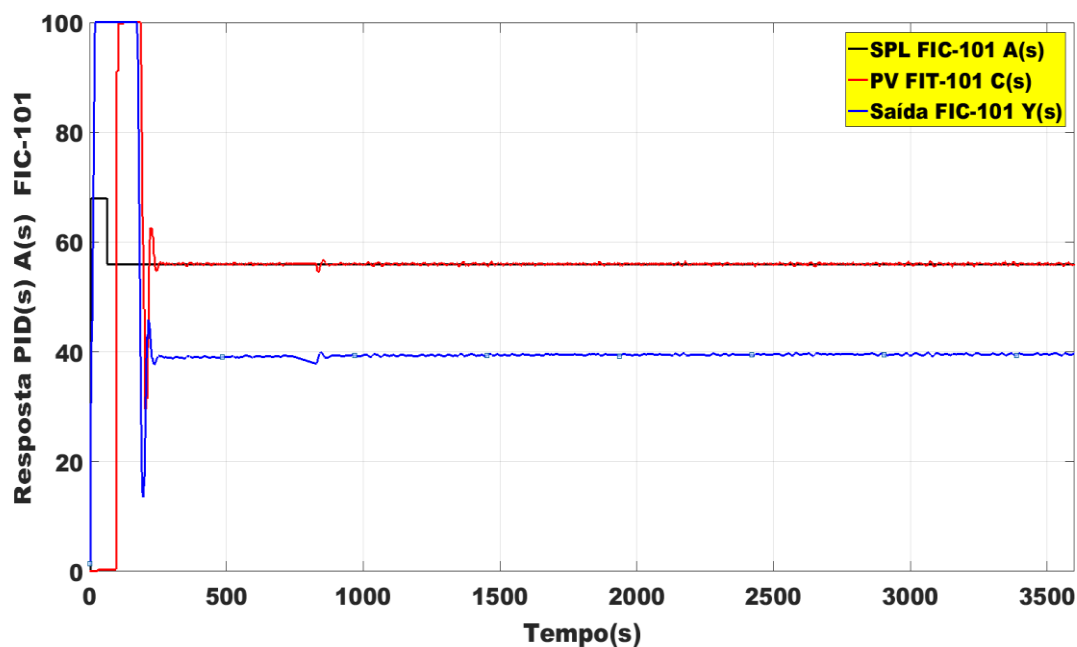


Figura 81 - Gráfico resposta PI(s) A(s) FIC-101.

A figura 82 mostra a variação máxima e mínima da PV FIT-101 C(s) com relação ao degrau SPL aplicado ao PI (s) A(s) FIC-101.

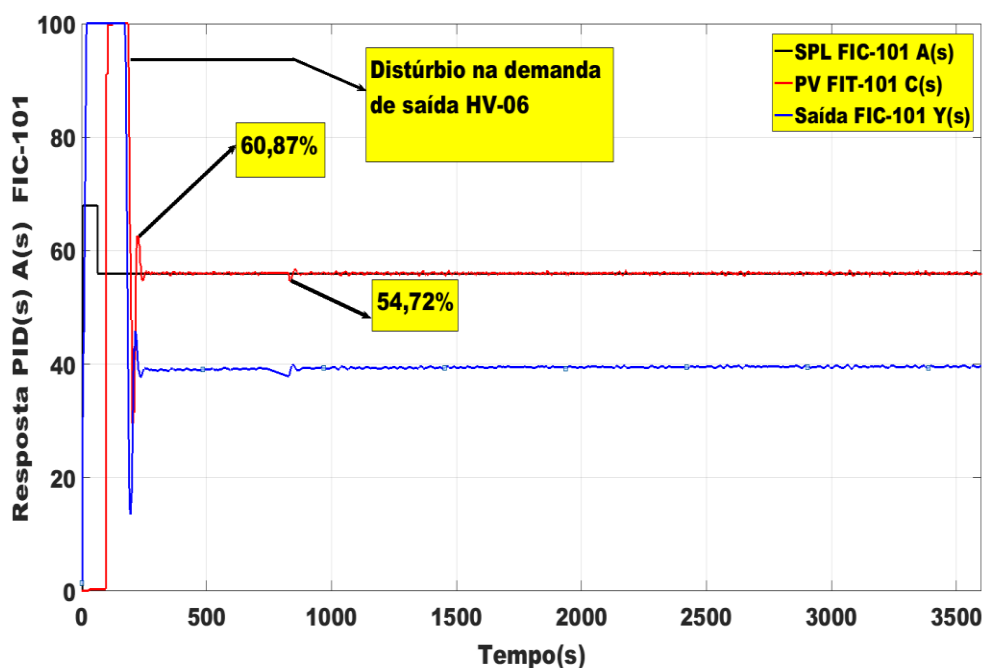


Figura 82 - Gráfico resposta (+/-5%) PI(s) A(s) FIC-101.

Segundo Ogata (2011), os valores da PV FIT-101 C(s) 60,87% comparado ao SPL ($\lambda_4 = 0,44$) 56% inserido pelo especialista ao PI(s) A(s) FIC 101 são fundamentais na análise de +/- 5% de variação em relação ao distúrbio inserido na demanda de saída **HV-06**.

Portanto para a variação de 60,87% consta um valor de +4,87% acima do SPL e 54,72% (-1,28%), abaixo do ponto de controle, estabelecendo que a rede de análise paraconsistente projetada informe os parâmetros padronizados de ganho P (proporcional) e I (integral) ao PI(s) A(s) FIC 101, mantendo a PV FIT-101 C(s) em regime permanente.

A saída Y(s) do PI(s) contínuo paralelo apresenta excelente estabilidade de variação determinando o regime permanente de 4 a 20 mA, aplicados à entrada do inversor de frequência **FY – 101** e a rotação da bomba centrífuga **P – 101**.

Os valores negativos no gráfico de μ_{ctr5} são fundamentais para a correção da saída $I(s) = \left[Pe(s) + I \left(\frac{1}{s} \right) e(s) \right] + I_o$ estabilizando a PV FIT-102 J(s) em pequenas variações mostradas na figura 83 (Ação direta FIC-102 PV>SP).

O LIT-101(μ_2) LIT-102 (μ_4) tem como finalidade estabelecer o regime permanente do NAPRATECONTROL-4 otimizando os valores de μ_{ER4} e μ_{ctr4} ao PI(s) A(s) FIC-101.

As figuras 83 e 84 mostram os gráficos de resposta do PI(s) G(s) FIC-102 em função do SPR ($\lambda_5 = 0,72$) 28% e o tratamento das evidências executadas pela análise paraconsistente do NAPRATECONTROL 5, estabelecendo os valores P (proporcional) e I (integral) ao PI(s) contínuo paralelo G(s).

O PI(s) G(s) FIC-102 estabelece a PV (s) FIT-102 J(s) no valor de 0,5 inserido pelo especialista, otimizando a equação $F(s) = \frac{Y(s)}{G(s)H(s)+1}$ ao erro nulo (PV(s) FIT-102 J(s) = SPR PI(s) G(s) FIC-102).

Portanto para a variação de 32,56% consta um valor de +4,56% acima do SPR e 27,22% (-0,78%) abaixo do ponto de controle, estabelecendo que a rede de análise paraconsistente projetada informe os parâmetros padronizados de ganho P (proporcional) e I (integral) ao PI(s) G(s) FIC 102, mantendo a PV FIT-102 J(s) em regime permanente.

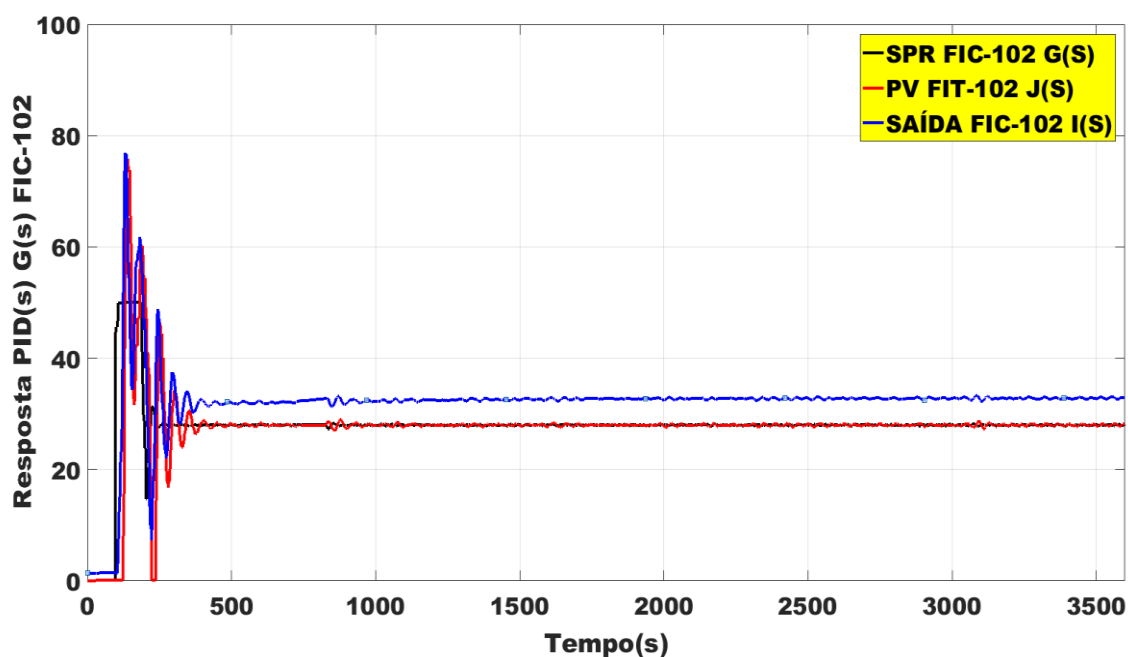


Figura 83 - Gráfico resposta PI(s) G(s) FIC-102,

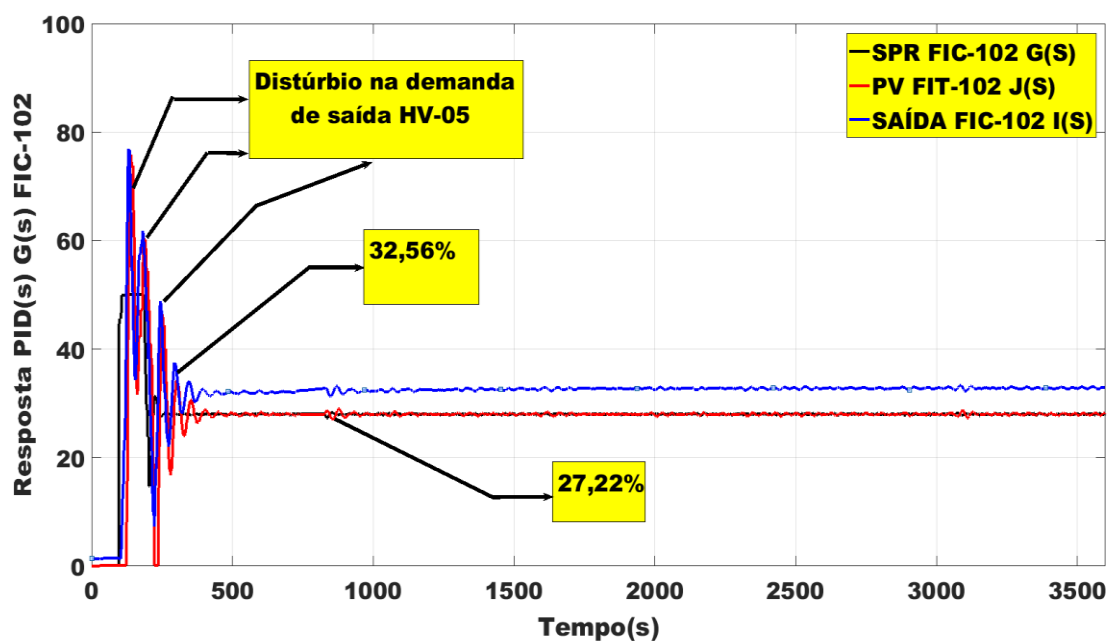


Figura 84 - Gráfico resposta (+/-5%) PI(s) G(s) FIC-102.

Foi realizado outro ensaio dinâmico e tratamento do grau de evidência μ_1 e μ_2 , estabelecendo um distúrbio (degrau) no SPL (Set-point local do PI(s) Contínuo Paralelo FIC-101 A(s)) de 0 a 62% ($\lambda_2 = 0,38$), 64% ($\lambda_4 = 0,36$).

Nas figuras 85, 86, 87 e 88 são apresentados os gráficos do μ_{ER4} , μ_{ctr4} , μ_{ER5} , μ_{ctr5} , referentes à saída **NAPRATECONTROL 4** e **NAPRATECONTROL 5**.

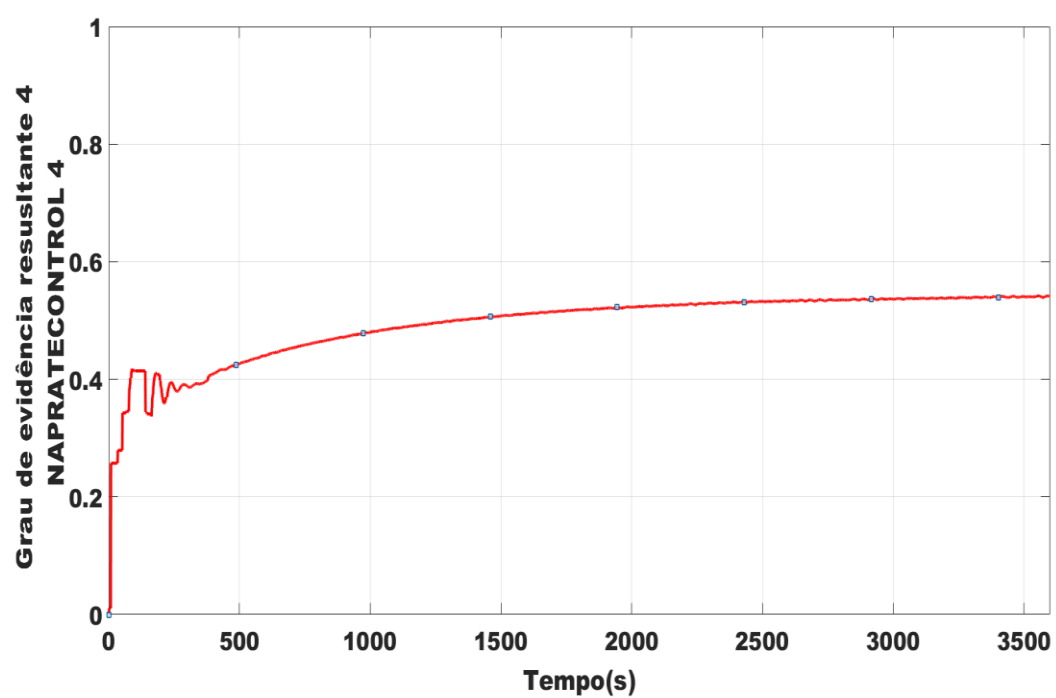


Figura 85 - Ensaio 2 grau de evidência resultante μ_{ER4} NAPRATECONTROL 4 .

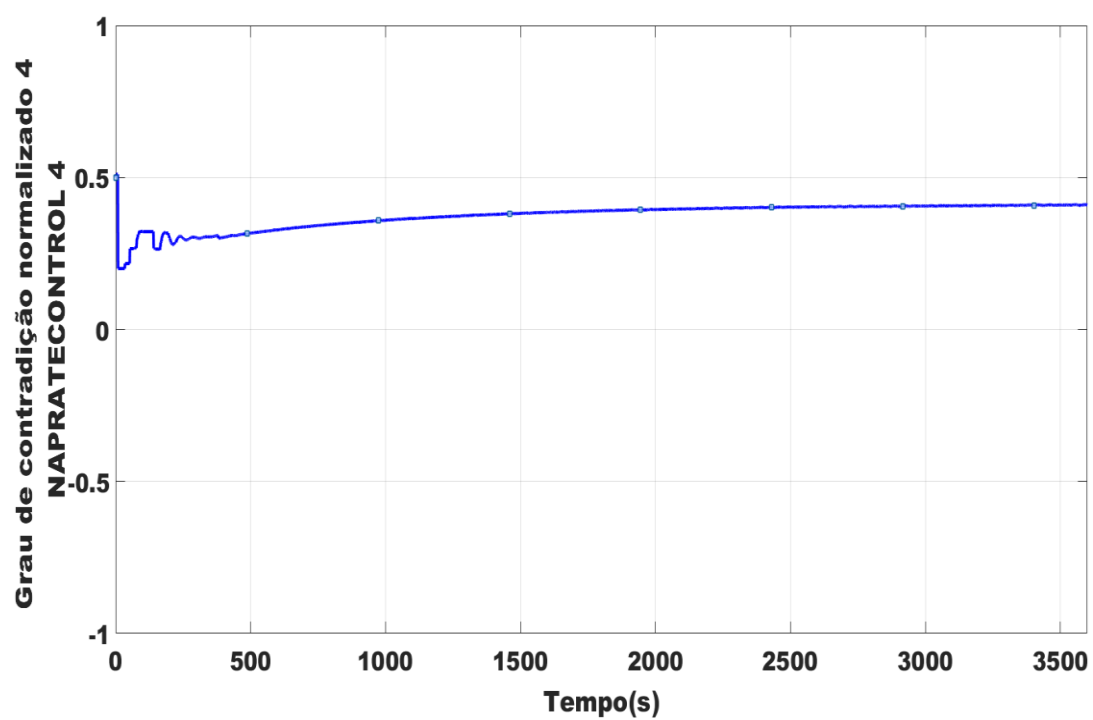


Figura 86 - Ensaio 2 grau de contradição normalizado μ_{ctr4} NAPRATECONTROL 4.

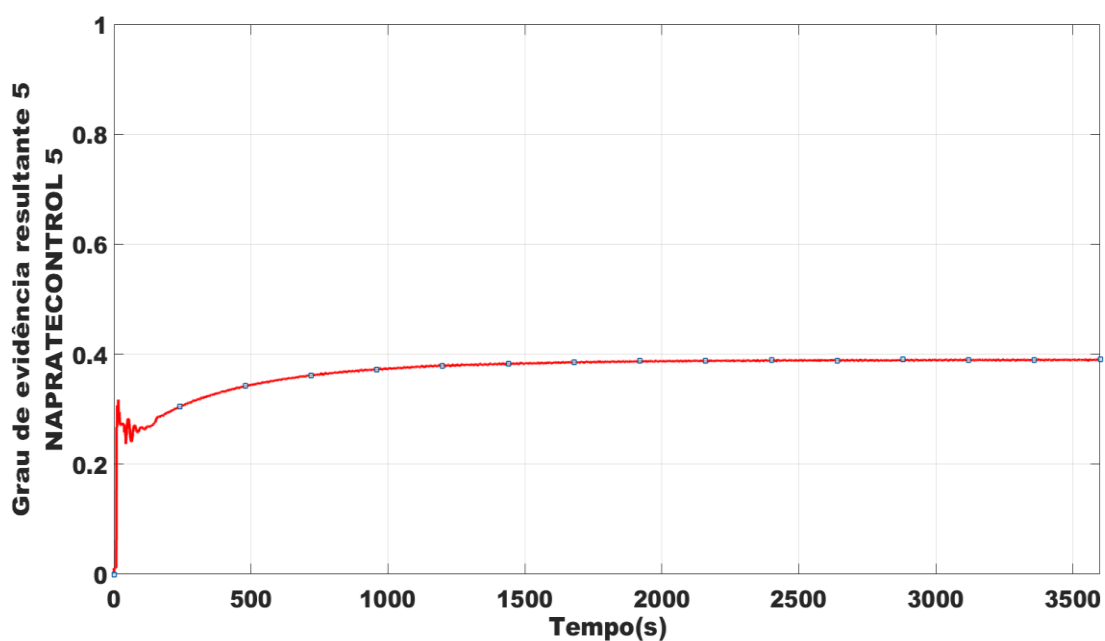


Figura 87 - Ensaio 2 grau de evidência resultante μ_{ER5} NAPRATECONTROL 5.

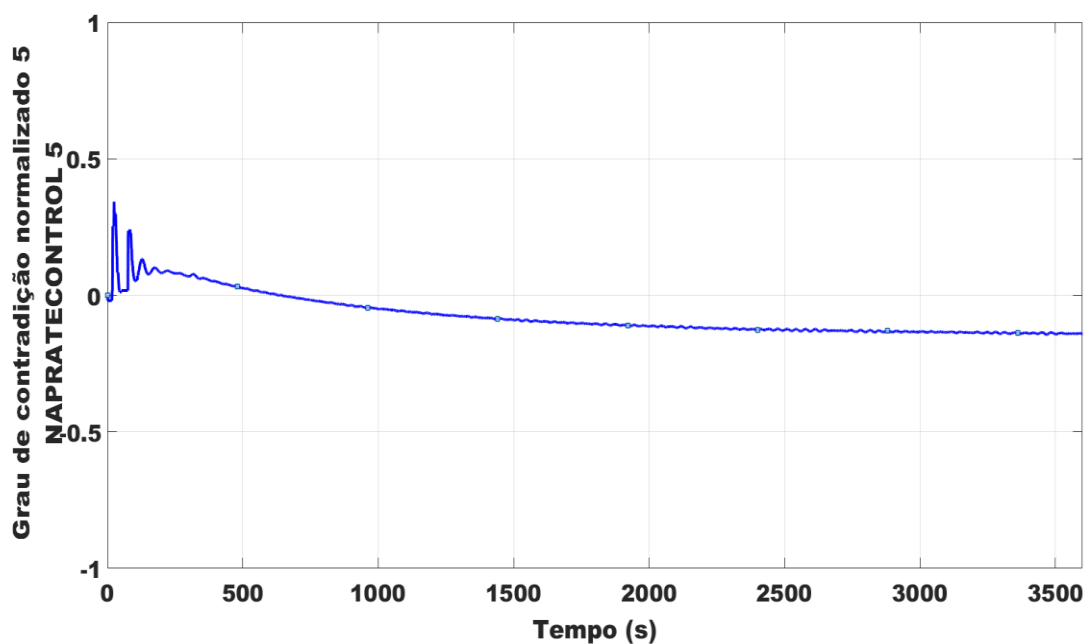


Figura 88 - Ensaio 2 grau de contradição normalizado μ_{ctr5} NAPRATECONTROL 5.

A telemetria da rede de análise paraconsistente nesse segundo distúrbio funcionou, pois a informação de $\mu_{ER4} = \mathbf{P}$, ganho proporcional, e $\mu_{ctr4} = \mathbf{I}$, ganho integral, foram as entradas de sintonia PI(s) A(s) FIC-101, como mostram as figuras 89 e 90.

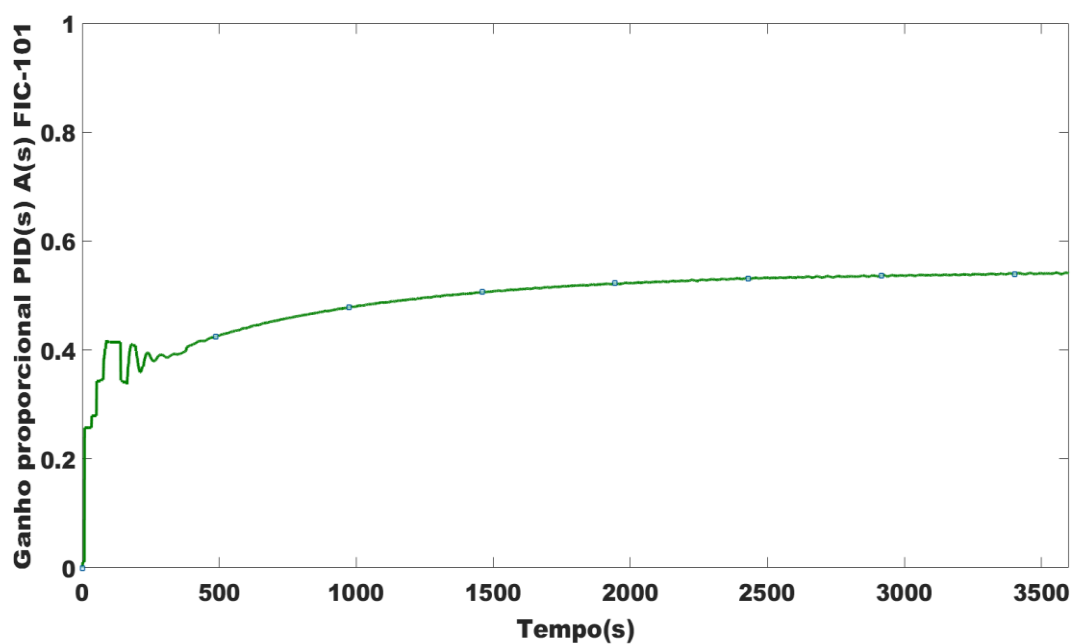


Figura 89 - Ensaio 2 gráfico P ganho proporcional PI(s) A(s) FIC-101.

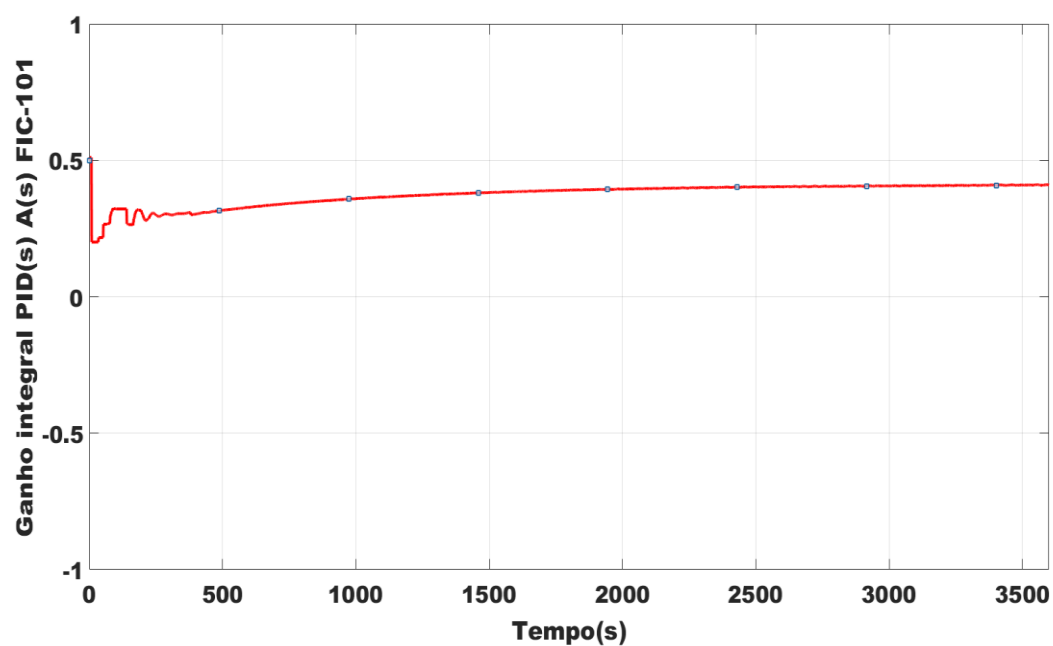


Figura 90 - Ensaio 2 gráfico I ganho integral PI(s) A(s) FIC-101.

A telemetria paraconsistente NAPRATECONTROL 5 apresenta excelente desempenho devido à informação de que $\mu_{ER5} = P$ ganho proporcional e $\mu_{ctr5} = I$ ganho integral são as entradas de sintonia PI(s) G(s) FIC-102, como mostram as figuras 91 e 92.

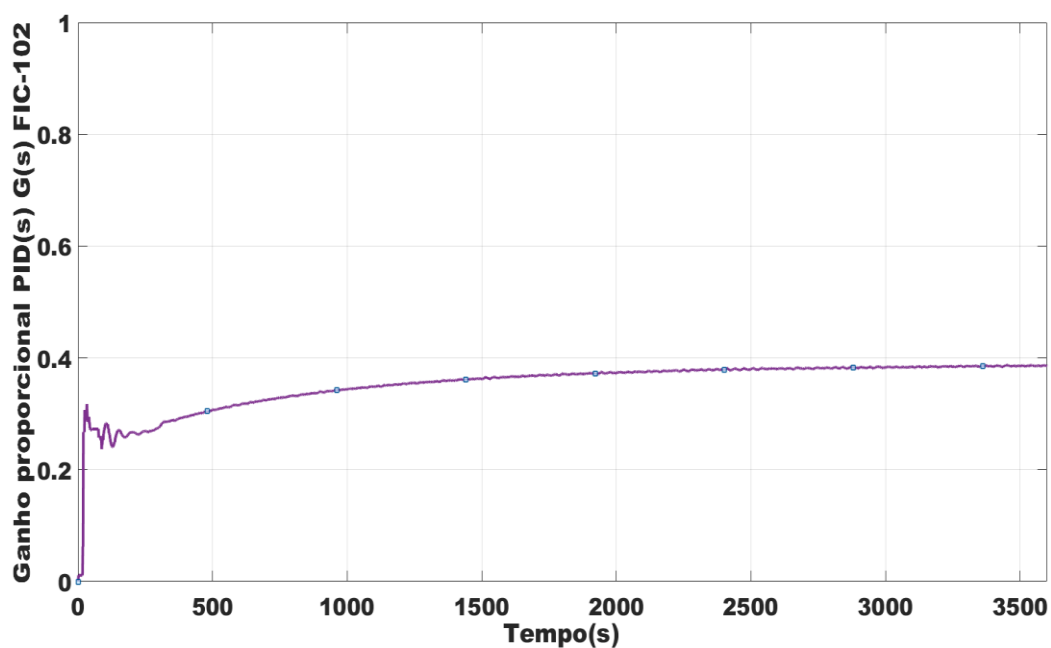


Figura 91 - Ensaio 2 gráfico P ganho proporcional PI(s) G(s) FIC-102.

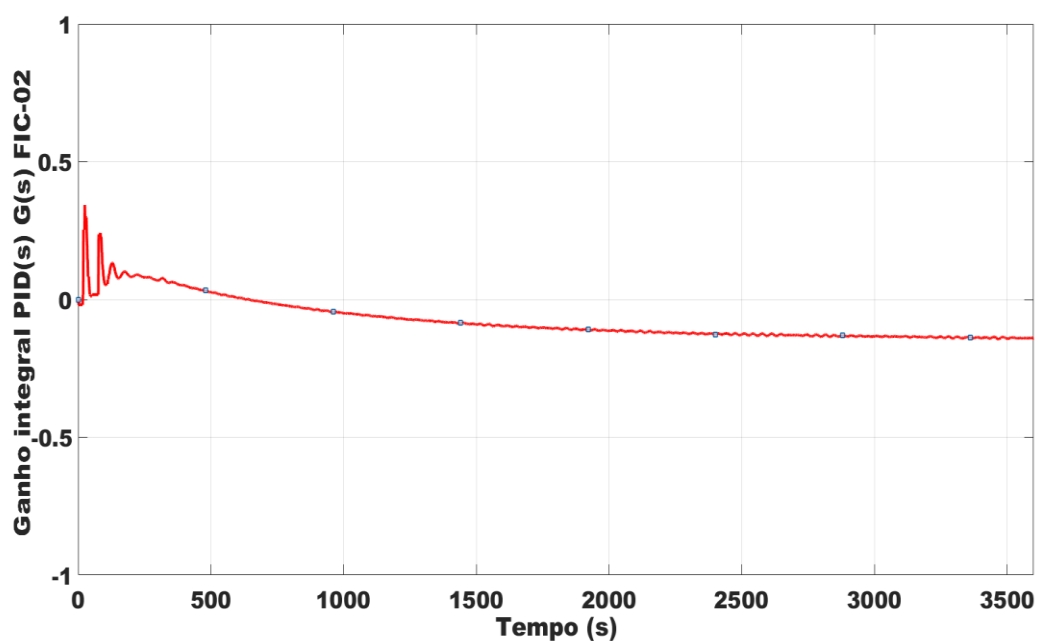


Figura 92 - . Ensaio 2 gráfico I ganho integral PI(s) G(s) FIC-102.

Os gráficos constantes nas figuras 93 e 94 representam a resposta do PI(s) A(s) FIC-101 em função dos distúrbios e degrau de SPL (λ 4).

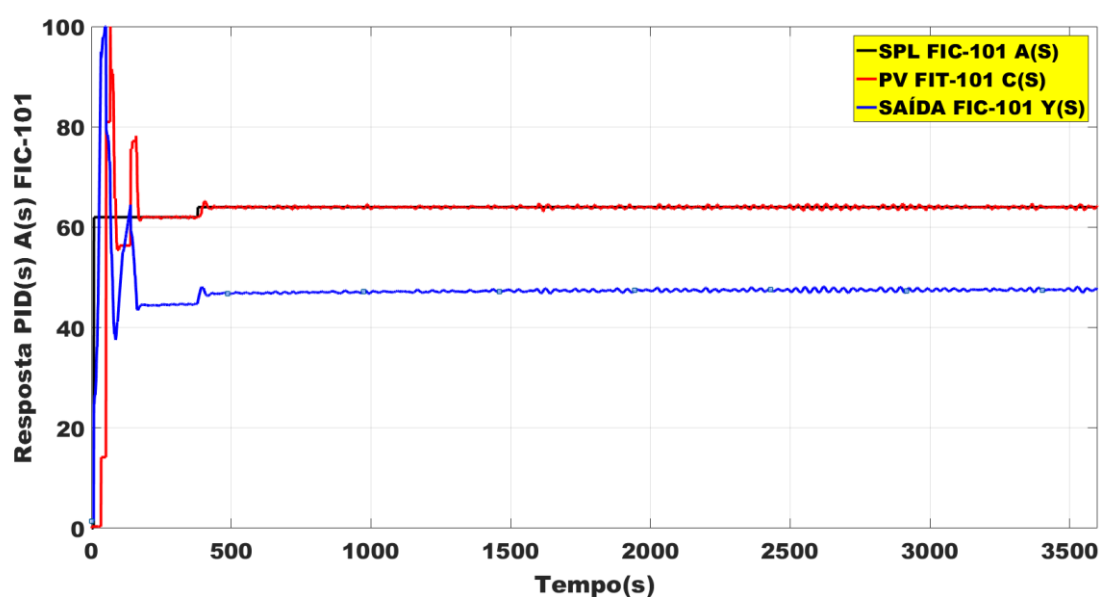


Figura 93 - Ensaio 2 gráfico resposta PI(s) A(s) FIC-101.

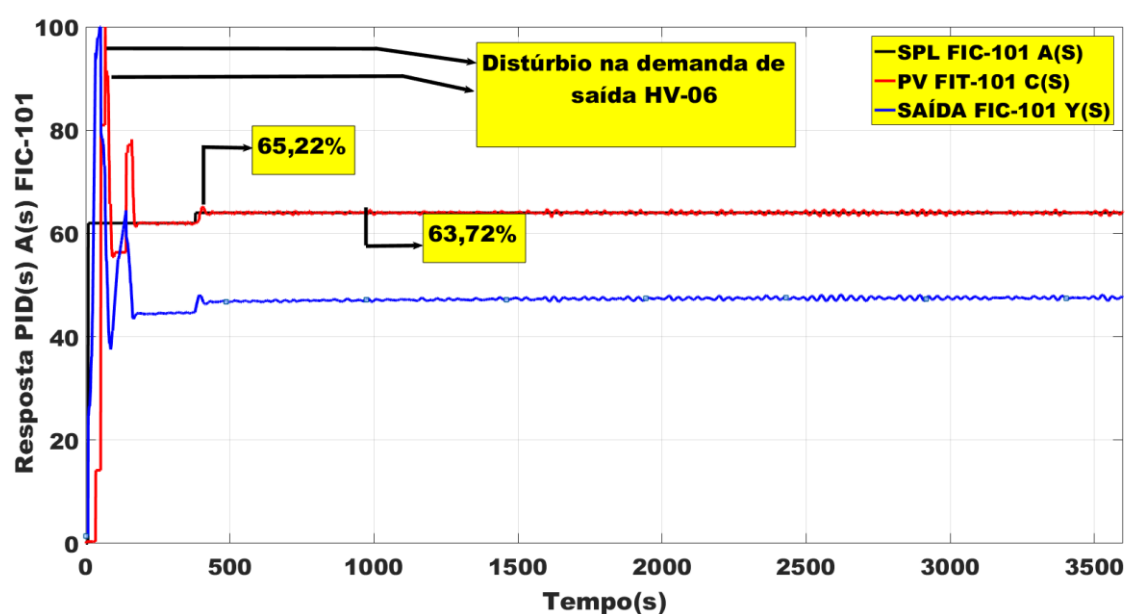


Figura 94 - . Ensaio 2 gráfico resposta (+/-5%) PI(s) A(s) FIC-101.

Portanto, para a variação de 65,22% consta um valor de +1,22% acima do SPL ($\lambda_4 = 0,36$) e 63,72% (-0,28%) abaixo do ponto de controle, estabelecendo que a rede de análise paraconsistente projetada informe os parâmetros padronizados de ganho P (proporcional) e I (integral) ao PI(s) A(s) FIC 101 que estabiliza a PV FIT-101 C(s) em regime permanente dentro do limite +/-5% (OGATA, 2011).

As Figuras 95 e 96 exibem a resposta do PI(s) G(s) FIC-102 em função do SPR (λ_5) estabelecido pelo fator de ajuste de razão em 50%.

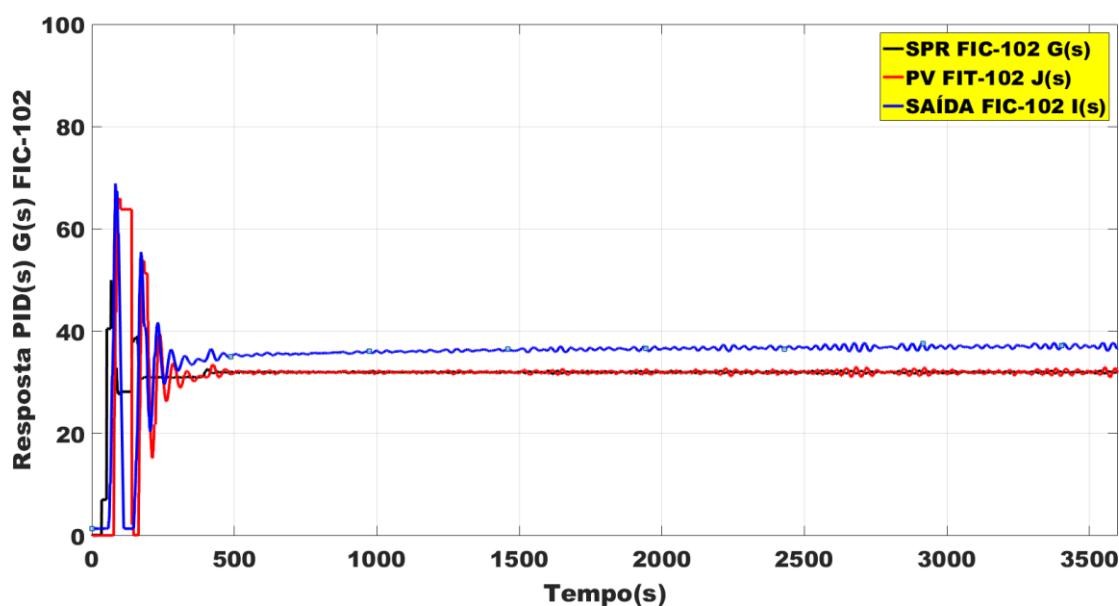


Figura 95 - Ensaio 2 gráfico resposta PI(s) G(s) FIC-102.

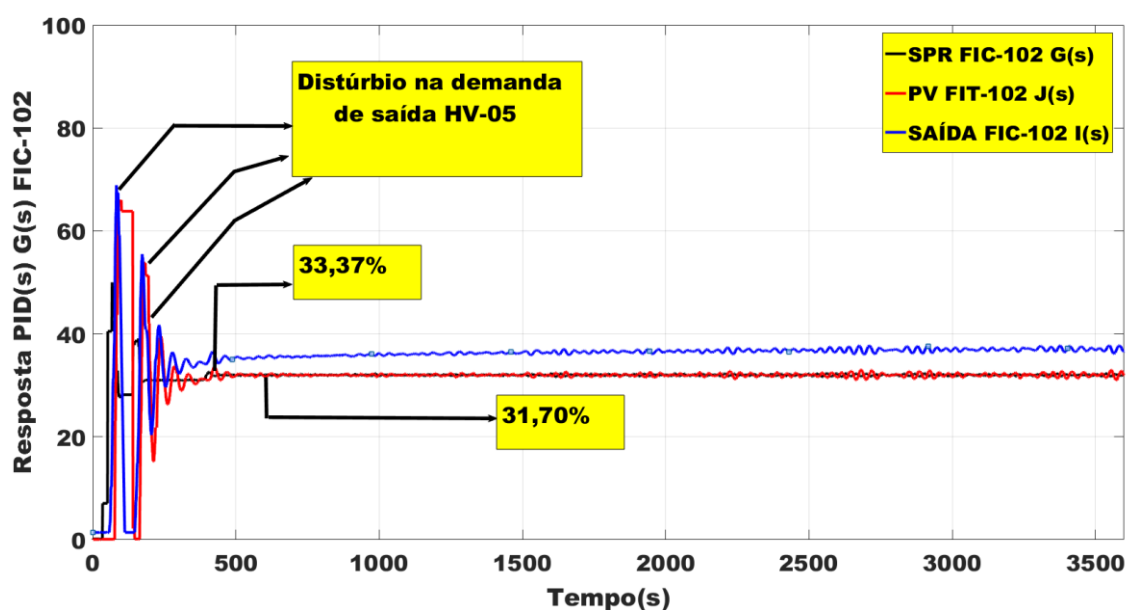


Figura 96 - Ensaio 2 gráfico resposta (+/-5%) PI(s) G(s) FIC-102.

Conforme a figura 96, na variação de 33,37% consta um valor de +1,37% acima do SPR ($\lambda 5 = 0,68$) e 31,70% (-0,30%) abaixo do ponto de controle, estabelecendo que a rede de análise paraconsistente projetada informe os parâmetros padronizados de ganho P (proporcional) e I (integral) ao PI(s) G(s) FIC 102 na qual estabiliza a PV FIT-102 J(s) em regime permanente dentro do limite +/- 5% (OGATA, 2011).

7.1 ESTUDO COMPARATIVO DOS RESULTADOS COM MÉTODO DE SINTONIA MODELAGEM INTERNA DO CONTROLADOR (IMC)

A presente dissertação apresenta o comparativo entre os valores da variação máxima e mínima da PV(s) FIT-101 C(s) e FIT-102 J(s) em relação ao SPL (14) e SPR (15). Variação obtida em função da dinâmica em análise LPA2v padronizada (figuras 94 a 96).

O método IMC é obtido a partir do descrito no tópico: **Levantamento da característica do processo vazão e nível TQ-101 e TQ-102 (item 4.3.)**.

Os valores calculados P(ganho proporcional) e I (ganho Integral) estão parametrizados aos PI(s) A(s) FIC-101 e G(s) FIC-102 conforme **figuras 97 e 98**:

Controlador PI(s) A(s) FIC-101 (figura 97):

- P(ganho proporcional) = 0,37489
- I (ganho integral) = 0,016min/rep

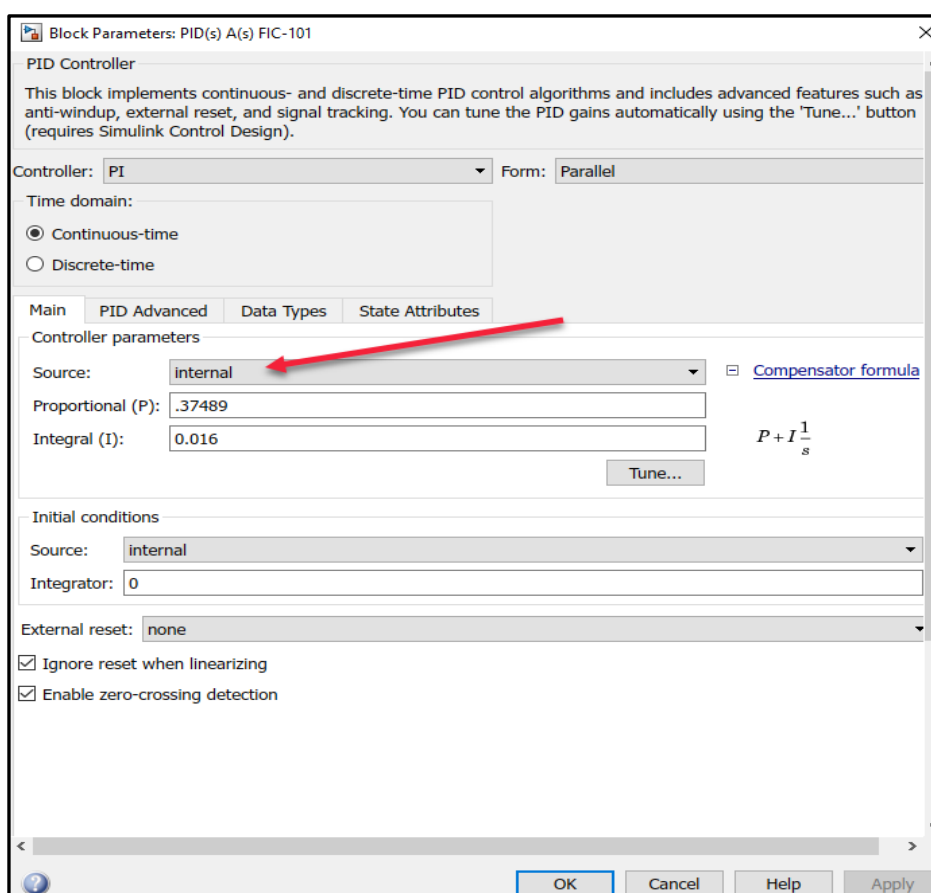


Figura 97 - Parametrização método IMC PI(s) A(s) FIC-101.

Controlador PI(s) G(s) FIC-102 (figura 98):

- P(ganho proporcional) = 0,80043
- I (ganho integral) = 0,016min/rep

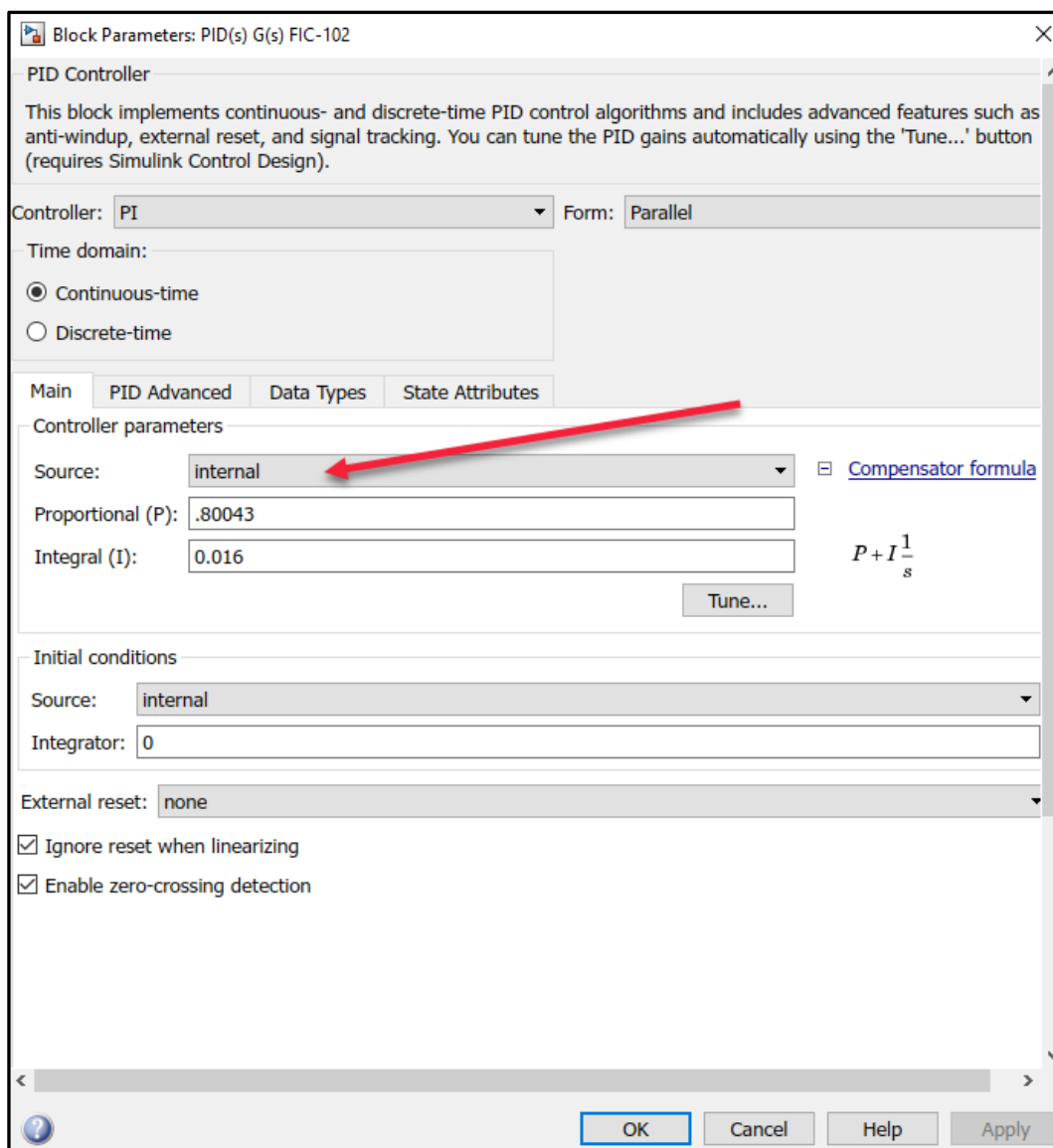


Figura 98 - Parametrização método IMC PI(s) G(s) FIC-102.

A figura 99 confirma a variação máxima 75,22% (+11,22%) e a mínima 59,72% (-4,28%), ambas obtidas pelo método IMC, comparadas ao SPL (64%; $\lambda = 0,36$), e resposta do PI(s) A(s) FIC-101(figura 94).

A variação máxima está fora do limite de $\pm 5\%$ (OGATA, 2011), assim como a variação mínima sofreu um decremento maior que o apresentado na figura 94, estabilizando fora do ponto de controle de 64%, concretizando que a rede de análise LPA2v projetada a PV (s) FIT-101 C(s) apresenta um regime permanente abaixo do limite de variação ($\pm 5\%$).

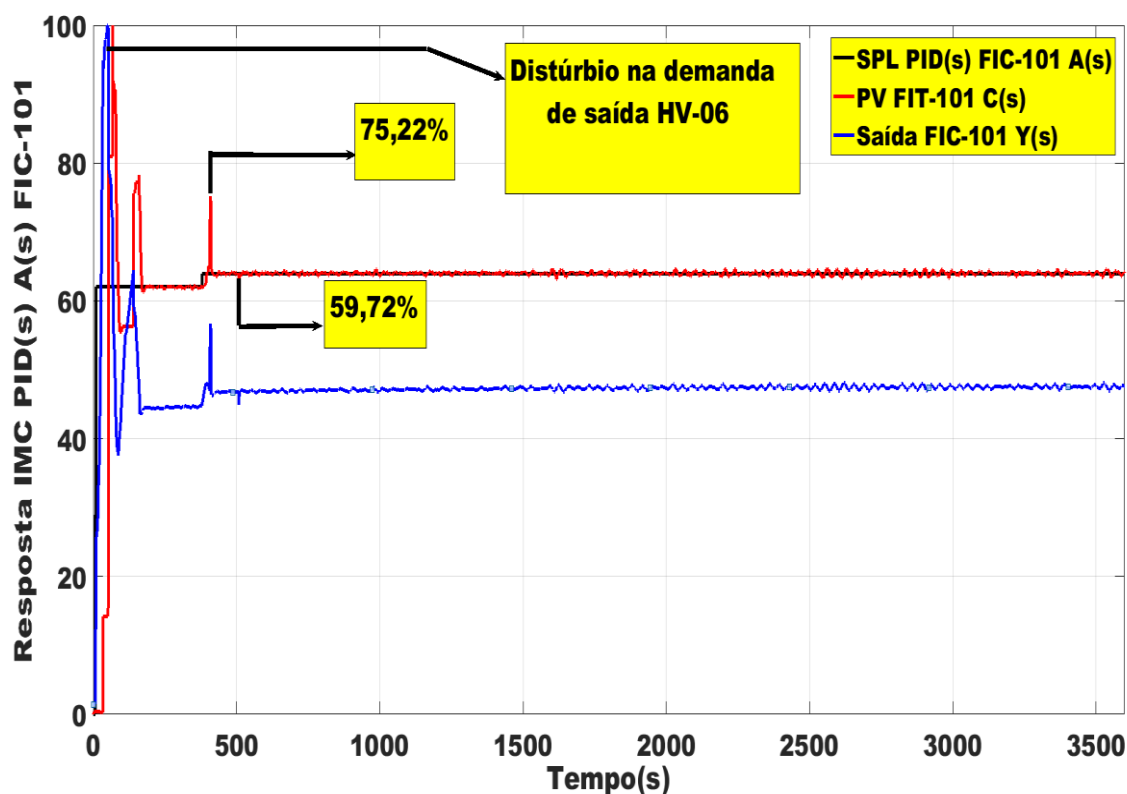


Figura 99 - Ensaio 3 gráfico resposta IMC ($\pm 5\%$) PI(s) A(s) FIC-101.

A figura 100 apresenta o ensaio 3, onde o gráfico resposta IMC ($\pm 5\%$) PI(s) G(s) FIC-102 mostra a variação máxima, 40,71% (+8,71%), e a mínima, 30,12% (-1,88%), obtidas pelo método IMC comparado ao SPR (32%; $\lambda = 0,68$) e a resposta do PI(s) G(s) FIC-102 (figura 96).

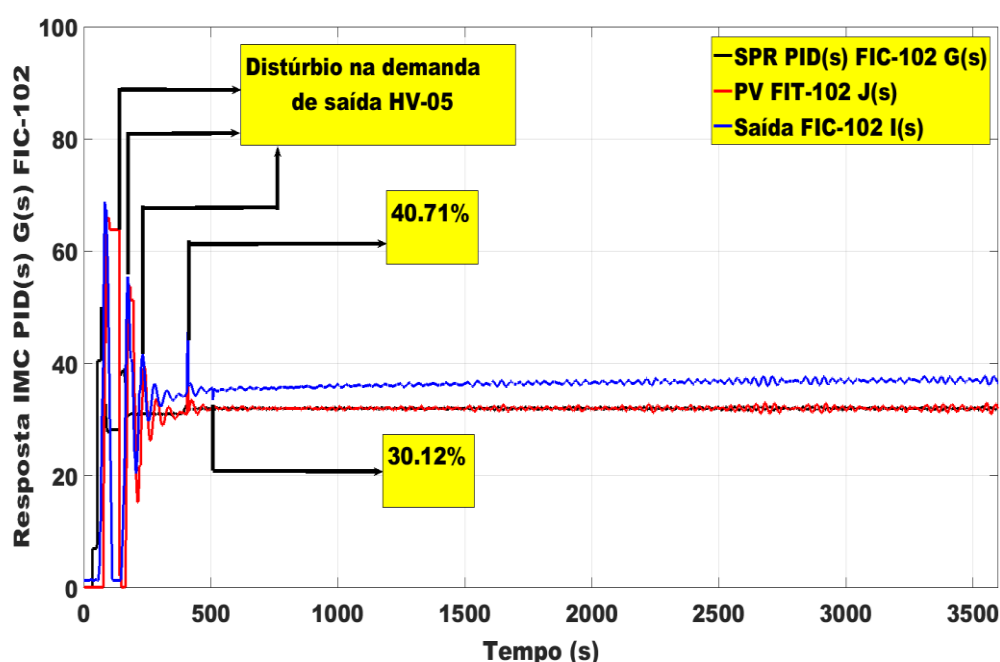


Figura 100 - Ensaio 3 gráfico resposta IMC (+/-5%) PI(s) G(s) FIC-102.

A variação máxima está fora do limite de +/-5% (OGATA, 2011) e a variação mínima sofreu decremento maior que a figura 96 estabilizando fora do (SPR(s) =32%), estabelecendo que a rede de análise LPA2v projetada a PV (s) FIT-102 J(s) apresenta 31,70% (-0,30%), um regime permanente dentro do limite de variação (+/-5%) e com erro menor em relação ao ponto de controle.

Em discussão o projeto da rede paraconsistente, adequado à análise LPA2v, apresenta melhor desempenho nas atribuições do ganho P proporcional e I, ganho integral à telemetria externa aos blocos PI do *OPC tool box* Matlab *Simulink* comparado aos valores estático de P e I, atribuídos internamente à estrutura do bloco PI(s) A(s) FIC-101 e G(s) FIC-102 pelo método IMC.

Destacam-se aqui que as respostas de controle PI(s) FIC-101 A(s) e FIC-102 G(s) em função da saída NAPRATECONTROL 4 $\mu ER4$ (P ganho proporcional), $\mu ctr4$ (I ganho integral) e PI(s) FIC-102 G(s) referente à saída NAPRATECONTROL 5 $\mu ER5$ (P ganho proporcional), $\mu ctr5$ (I ganho integral) mostrou que para pequenas variações de distúrbio na demanda e SPL (14) e SPR (15), a sintonia dinâmica atribuída ao projeto da estratégia controle de razão entre duas variáveis, obteve melhor resultado no controle da variação (+/- 5%) da PV(s) FIT-101 C(s) e PV(s) FIT-102 J(s) comparado ao método IMC em função das constantes de tempo do processo e tempo morto dos *devices* utilizados em medição de vazão e nível.

8 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada a aplicação de uma Rede de Análise Paraconsistente (RAP) à malha de controle de razão de nível e vazão entre dois produtos utilizando o *OPC tool box Matlab Simulink*.

O *OPC tool box Matlab*, utilizado nesse projeto, atualmente tem se revelado fundamental na integração com o *OPC's server's* e telemetria dos *devices* (diversos fabricantes) interligados em protocolos de redes industriais.

A linearização da telemetria *OPC tool box*, leitura e escrita, adotada no presente projeto disponibiliza dados que podem ser arquivados em banco de dados Histórico de Aquisição de Dados (HDA). Dados estes que foram utilizados como grau de evidência favoráveis e desfavoráveis na rede de análise paraconsistente.

Os resultados deste desenvolvimento evidenciam a função dos PI(s) projetados nesta dissertação, estratégias avançadas de controle poderão ser integradas à rede de análise paraconsistente com o tratamento do grau de evidência favorável (μ), desfavorável (λ), contradição (G_{ct}), certeza (G_c) para a finalidade de se obter o grau de evidência resultante (μ_{ER}) e grau de contradição normalizado (μ_{ctr}). Dessa forma, os PI(s) projetados e parametrizados à telemetria externa dos parâmetros P(ganho proporcional) e I (integral) proporcionam, com a inclusão da LPA2v, um novo método de sintonia dinâmica para estabelecer a condição da proposição anotada para controle da PV(s) FIT-101 C(s) em função do SPL (14) e PV(s) FIT-102 J(s) comparado ao SPR (15).

Para os resultados alcançados, foi importante o desenvolvimento da estratégia de controle avançada de razão entre duas variáveis integrada à sintonia dinâmica PI(s) em função da rede de análise paraconsistente LPA2v, μ_{ER} e μ_{ctr} como telemetria externa referente ao ganho P proporcional e I integral.

A sintonia dinâmica criada em função dos *OPC's CLIENTS* e o tratamento das evidências FIT-101 C(s), FIT-102 J(s), LIT-101 e LIT-102 pela rede de análise paraconsistente LPA2v, contribuem para que tais dados sejam usados como fontes promissoras de aplicações em outras estratégias avançadas de controle de razão e limites, ou ainda em tipos de controle tais como: duplos limites cruzados em otimização de combustão de caldeiras, controle em cascata, controle seletor de maior ou menor sinal ao elemento final de controle, controle em *range* ou faixa dividida, *feedback*, controle de velocidade e posição de energia ativa aos motores

em malhas de velocidades e controle de receitas de produtos alimentícios e medicinais.

Sugestões para trabalhos futuros:

- A. Aplicação, em processos industriais, da Rede de Análise Paraconsistente (RAP-) utilizando a integração dos diversos tipos de protocolos indústrias (fabricantes) com a rede corporativa ETHERNET à telemetria dos *devices* para medição das variáveis físicas e analítica: condutibilidade térmica, teor de oxigênio em amostras gasosas, cromatografia líquida e gasosa, umidade, pH de uma solução e ORP (óxido-redução) e condutividade elétrica;
- B. Integração do *OPC CLIENT tool box Matlab Simulink* com *OPC SERVERS* de outros fabricantes de automação. O Histórico de Dados Acessados (*HDA*) pode ser aplicado em variáveis do processo industrial desenvolvido em plataforma *Matlab*, com registro de variáveis linearizadas a n evidências favoráveis e n evidências desfavoráveis padronizadas na faixa de 0 a 1 e utilizadas em lógicas de CLP's (controladores lógicos programáveis) SDCD's (sistemas digitais de controle distribuídos) aplicados em: variáveis analíticas de processos industriais, trabalhos de manutenção preventiva, preditiva, corretiva aos dispositivos de campo utilizados para leitura e manipulação de variáveis de controle.

REFERÊNCIAS

- ABE, J. M. **Aspecto de Computação Inteligente Paraconsistente**. 238 p. Instituto de Estudos Avançados (IEA) da Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2013.
- CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles Típicos de equipamentos e processos industriais**. São Paulo: Ed. Editora Blucher, 2010.
- DA COSTA, N. C. A.; SUBRAHMANIAN, V. S. ***Paraconsistent logics as a formalism for reasoning about inconsistent knowledge bases***. In: *Artificial Intelligence in Medicine*, v.1, 1989, p. 167-174.
- DA COSTA, N. C. A.; HENSCHEN, L. J.; LU, J. J.; SUBRAHMANIAN, V. S., ***Automatic theorem proving in paraconsistent logics: foundations and implementation***. In *Proceedings of the 10th International Conference on Automated Deduction, Springer Lecture Notes in Computer Science* 449, 1990, pp. 72-86.
- DA COSTA, N.C.A. V. S.; SUBRAHMANIAN E. C. V. ***The Paraconsistent Logic PT***. *Journal of Mathematical Logic and Fundamentals of Mathematics*, Vol.37, 1991, p.139-148.
- DA COSTA, N. C. A.; ABE, J.M.; SUBRAHMANIAN, V. S. ***Remarks on Annotated Logic***. *Journal of Mathematical Logic and Fundamentals of Mathematics*, v. 37, 1991, p.561-570.
- DA SILVA FILHO, J. I. **Métodos de Aplicações da Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores-LPA2v com construção de Algoritmo e Implementação de Circuitos Eletrônicos**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais. São Paulo, 1999, 250 p.
- DA SILVA FILHO, J. I.; ABE, J. M. **Introdução à lógica paraconsistente anotada com ilustrações**. 1ª. Ed.. Santos: Editora Emmy, 2000.
- DA SILVA FILHO, J. I. & ABE, J. M., **Fundamentos das Redes Neurais Paraconsistentes – Destacando Aplicações em Neurocomputação**. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 2001.
- DA SILVA FILHO, J. I. **Métodos de Aplicações da Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores-LPA2v**. Revista Seleção Documental, Santos. 2006.
- DA SILVA FILHO, J. I.; ABE, J. M.; LAMBERT, T. G. **Inteligência Artificial com as Redes de Análises Paraconsistentes**. 1ª. Ed . Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008.

DA SILVA FILHO, J. I.; OLIVEIRA, D. B.; DE AGUIAR, A. L. L.; FERRARA, L. F. P.; GARCIA, D. V.; MARIO, M. C. **Algoritmos fundamentados em Lógica Paraconsistente anotada aplicados em análises de variáveis físicas de um processo industrial**. Revista Seleção Documental, Santos. 2012.

DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**. 3ª Ed. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 2003.

FERNANDES, C. L. M. **Lógica Paraconsistente aplicada em Sistemas de Automação e Controle**. São Paulo: Universidade Santa Cecília. Tese (Mestrado) – Programa de Pós Graduação na área de Automação e Controle de Processos do Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia Mecânica, Santos, 2013.

FERNANDES, C. L. M., MARIO C. M., DA SILVA FILHO, J. I. **Study for inclusion of Paraconsistent Annotated logic in specific Standards for use in Programmable Controllers**. *Science and Technology*. Vol 1. No 2. pág.49-53. 2012.

FRANCHI, C. M. **Controle de processos industriais. Princípios e aplicações**. 1ª Ed.. São Paulo: Editora Érica, 2011.

GARCIA, D. V.; **Apostila de MATLAB® – Noções de MATLAB®**, Universidade Santa Cecília. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Santos, 2013, 84 p.

MARTINS, H. G. **A Lógica Paraconsistente Anotada de Quatro Valores: LPA4v aplicada em Sistema de Raciocínio Baseado em Casos para o Restabelecimento de Subestações Elétricas**. Tese (Ph D). Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI. Itajubá, 2003. 145 fl.

NUNES, V. C.; **Aplicação da Lógica Paraconsistente Anotada de Anotação com dois valores - LPA2v em tomada de decisão de um Manipulador Robótico Industrial no processo de paletização**. São Paulo: Universidade Santa Cecília. Tese (Mestrado) – Programa de Pós Graduação na área de Engenharia Mecânica, Santos, 2015

NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 6ª. Ed. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2012, 1285 p.

OGATA, K., **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª Ed. São Paulo: Editora PEARSON, 2011, 808 p.

RIBEIRO, M. A., **Medição de Petróleo e Gás Natural**, 4ª. Ed. Apostila de treinamento Petrobrás. Salvador, 2010, 287 p.

RIVERA, D. E.; MORARI, M.; SKOGESTAD, S., **Internal Model Control, 4. PID Controller Design**. *Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1986, V. 25, pp. 252-265.

**ANEXO I –. Histórico de Banco de Dados (HDA) OPC Tool Box Matlab
Simulink μ ER1 NAPRATECONTROL 1.**

Tabela A 1 - Comportamento do μ ER1 grau de evidência do NAPRATECONTROL 1.

Tempo(s)	μ ER1	Tempo(s)	μ ER1
0	0	3581	0.4634
0.5000	0	3.5815e+03	0.4634
1	0	3582	0.4630
1.5000	0	3.5825e+03	0.4630
2	0	3583	0.4630
2.5000	0	3.5835e+03	0.4639
3	0	3584	0.4639
3.5000	0	3.5845e+03	0.4635
4	0	3585	0.4632
4.5000	0	3.5855e+03	0.4632
5	0	3586	0.4631
5.5000	0	3.5865e+03	0.4631
6	0	3587	0.4630
6.5000	0	3.5875e+03	0.4630
7	0	3588	0.4625
7.5000	0	3.5885e+03	0.4625
8	0	3589	0.4627
8.5000	0	3.5895e+03	0.4636
9	0	3590	0.4632
9.5000	0	3.5905e+03	0.4633
10	0	3591	0.4633
10.5000	0.0091	3.5915e+03	0.4627
11	0.0109	3592	0.4632
11.5000	0.0109	3.5925e+03	0.4634
12	0.0107	3593	0.4634
12.5000	0.0107	3.5935e+03	0.4637
13	0.0107	3594	0.4637
13.5000	0.0107	3.5945e+03	0.4635
14	0.0107	3595	0.4635
14.5000	0.0107	3.5955e+03	0.4634
15	0.0107	3596	0.4634
15.5000	0.0107	3.5965e+03	0.4631
16	0.0109	3597	0.4631
16.5000	0.0109	3.5975e+03	0.4635
17	0.0110	3598	0.4635
17.5000	0.0110	3.5985e+03	0.4634
18	0.0111	3599	0.4634
18.5000	0.0111	3.5995e+03	0.4625
19	0.0111	3600	0.4625

(A)

(B)

**ANEXO II –.Histórico de Banco de Dados (HDA) OPC Tool Box Matlab
Simulink μ ER2 NAPRATECONTROL 2.**

Tabela A 2 - Comportamento do μ ER2 grau de evidência do NAPRATECONTROL 2.

Tempo(s)	μER2	Tempo(s)	μER2
0	0	3581	0.2882
0.5000	0	3.5815e+03	0.2882
1	0	3582	0.2890
1.5000	0	3.5825e+03	0.2890
2	0	3583	0.2906
2.5000	0	3.5835e+03	0.2906
3	0	3584	0.2903
3.5000	0	3.5845e+03	0.2903
4	0	3585	0.2907
4.5000	0	3.5855e+03	0.2907
5	0	3586	0.2899
5.5000	0	3.5865e+03	0.2899
6	0	3587	0.2906
6.5000	0	3.5875e+03	0.2906
7	0	3588	0.2898
7.5000	0	3.5885e+03	0.2898
8	0	3589	0.2897
8.5000	0	3.5895e+03	0.2897
9	0	3590	0.2893
9.5000	0	3.5905e+03	0.2893
10	0	3591	0.2881
10.5000	0.0247	3.5915e+03	0.2881
11	0.0247	3592	0.2883
11.5000	0.0244	3.5925e+03	0.2883
12	0.0244	3593	0.2882
12.5000	0.0244	3.5935e+03	0.2882
13	0.0244	3594	0.2864
13.5000	0.0244	3.5945e+03	0.2864
14	0.0244	3595	0.2858
14.5000	0.0244	3.5955e+03	0.2858
15	0.0245	3596	0.2863
15.5000	0.0247	3.5965e+03	0.2863
16	0.0247	3597	0.2869
16.5000	0.0247	3.5975e+03	0.2869
17	0.0246	3598	0.2865
17.5000	0.0246	3.5985e+03	0.2865
18	0.0246	3599	0.2863
18.5000	0.0246	3.5995e+03	0.2863
19	0.0246	3600	0.2867

(A)

(B)

**ANEXO III –.Histórico de Banco de Dados (HDA) OPC Tool Box Matlab
Simulink μ ER3 NAPRATECONTROL 3.**

Tabela A 3 - Comportamento do μ ER3 grau de evidência do NAPRATECONTROL 3.

Tempo(s)	μER3	Tempo(s)	μER3
0	0	3581	0.3697
0.5000	0	3.5815e+03	0.3697
1	0	3582	0.3699
1.5000	0	3.5825e+03	0.3699
2	0	3583	0.3708
2.5000	0	3.5835e+03	0.3712
3	0	3584	0.3711
3.5000	0	3.5845e+03	0.3709
4	0	3585	0.3710
4.5000	0	3.5855e+03	0.3710
5	0	3586	0.3705
5.5000	0	3.5865e+03	0.3705
6	0	3587	0.3708
6.5000	0	3.5875e+03	0.3708
7	0	3588	0.3702
7.5000	0	3.5885e+03	0.3702
8	0	3589	0.3703
8.5000	0	3.5895e+03	0.3706
9	0	3590	0.3702
9.5000	0	3.5905e+03	0.3703
10	0	3591	0.3696
10.5000	0.0168	3.5915e+03	0.3693
11	0.0178	3592	0.3697
11.5000	0.0176	3.5925e+03	0.3697
12	0.0175	3593	0.3697
12.5000	0.0175	3.5935e+03	0.3698
13	0.0175	3594	0.3688
13.5000	0.0175	3.5945e+03	0.3687
14	0.0175	3595	0.3683
14.5000	0.0175	3.5955e+03	0.3683
15	0.0176	3596	0.3686
15.5000	0.0176	3.5965e+03	0.3685
16	0.0178	3597	0.3688
16.5000	0.0178	3.5975e+03	0.3690
17	0.0177	3598	0.3688
17.5000	0.0177	3.5985e+03	0.3688
18	0.0178	3599	0.3686
18.5000	0.0178	3.5995e+03	0.3682
19	0.0178	3600	0.3684

(A)**(B)**

**ANEXO IV –.Histórico de Banco de Dados (HDA) OPC Tool Box Matlab
Simulink μ ER4 NAPRATECONTROL 4.**

Tabela A 4 - Comportamento do μ ER4 grau de evidência do NAPRATECONTROL 4.

Tempo(s)	μER4	Tempo(s)	μER4
0	0	3581	0.4564
0.5000	0	3.5815e+03	0.4564
1	0	3582	0.4566
1	0.2576	3.5825e+03	0.4566
1	0.2576	3583	0.4571
1.5000	0.2576	3.5835e+03	0.4573
2	0.2576	3584	0.4573
2.0294	0.2576	3.5845e+03	0.4572
2.0294	0.2576	3585	0.4572
2.5000	0.2576	3.5855e+03	0.4572
3	0.2576	3586	0.4569
3.5000	0.2576	3.5865e+03	0.4569
4	0.2576	3587	0.4571
4.5000	0.2576	3.5875e+03	0.4571
5	0.2576	3588	0.4567
5.5000	0.2576	3.5885e+03	0.4567
6	0.2576	3589	0.4568
6.5000	0.2576	3.5895e+03	0.4570
7	0.2576	3590	0.4568
7.2666	0.2576	3.5905e+03	0.4568
7.2666	0.2576	3591	0.4564
7.2666	0.2576	3.5915e+03	0.4562
7.5000	0.2576	3592	0.4564
7.7334	0.2576	3.5925e+03	0.4565
8	0.2576	3593	0.4564
8.5000	0.2576	3.5935e+03	0.4565
9	0.2576	3594	0.4559
9.5000	0.2576	3.5945e+03	0.4559
10	0.2576	3595	0.4557
10.5000	0.2689	3.5955e+03	0.4557
11	0.2695	3596	0.4558
11.0518	0.2695	3.5965e+03	0.4557
11.1037	0.2695	3597	0.4559
11.1850	0.2695	3.5975e+03	0.4560
11.2782	0.2695	3598	0.4559
11.3892	0.2695	3.5985e+03	0.4559
11.5000	0.2694	3599	0.4558
11.5858	0.2694	3.5995e+03	0.4556
11.6716	0.2694	3600	0.4557

(A)

(B)

**ANEXO V –.Histórico de Banco de Dados (HDA) OPC Tool Box Matlab
Simulink μ ctr4 NAPRATECONTROL 4.**

Tabela A 5 - Comportamento do μ ctr4 grau de evidência do NAPRATECONTROL 4.

Tempo(s)	μctr4	Tempo(s)	μctr4
0	0	3581	0.4048
0	0.5000	3.5815e+03	0.4048
0.5000	0.5000	3582	0.4050
1	0.5000	3.5825e+03	0.4050
1	0.1600	3583	0.4054
1	0.1600	3.5835e+03	0.4056
1.5000	0.1600	3584	0.4055
2	0.1600	3.5845e+03	0.4055
2.0294	0.1600	3585	0.4055
2.0294	0.1600	3.5855e+03	0.4055
2.5000	0.1600	3586	0.4053
3	0.1600	3.5865e+03	0.4053
3.5000	0.1600	3587	0.4054
4	0.1600	3.5875e+03	0.4054
4.5000	0.1600	3588	0.4051
5	0.1600	3.5885e+03	0.4051
5.5000	0.1600	3589	0.4051
6	0.1600	3.5895e+03	0.4053
6.5000	0.1600	3590	0.4051
7	0.1600	3.5905e+03	0.4051
7.2666	0.1600	3591	0.4048
7.2666	0.1600	3.5915e+03	0.4047
7.2666	0.1600	3592	0.4048
7.5000	0.1600	3.5925e+03	0.4049
7.7334	0.1600	3593	0.4048
8	0.1600	3.5935e+03	0.4049
8.5000	0.1600	3594	0.4044
9	0.1600	3.5945e+03	0.4043
9.5000	0.1600	3595	0.4042
10	0.1600	3.5955e+03	0.4042
10.5000	0.1684	3596	0.4043
11	0.1689	3.5965e+03	0.4042
11.0518	0.1689	3597	0.4044
11.1037	0.1689	3.5975e+03	0.4045
11.1850	0.1689	3598	0.4044
11.2782	0.1689	3.5985e+03	0.4044
11.3892	0.1689	3599	0.4043
11.5000	0.1688	3.5995e+03	0.4041
11.5858	0.1688	3600	0.4042

(A)

(B)

**ANEXO VI –.Histórico de Banco de Dados (HDA) OPC Tool Box Matlab
Simulink μ ER5 NAPRATECONTROL 5.**

Tabela A 6 - Comportamento do μ ER5 grau de evidência do NAPRATECONTROL 5.

Tempo(s)	μER5	Tempo(s)	μER5
0	0	3581	0.3234
0.5000	0	3.5815e+03	0.3234
1	0	3582	0.3232
1.5000	0	3.5825e+03	0.3232
2	0	3583	0.3236
2.5000	0	3.5835e+03	0.3244
3	0	3584	0.3243
3.5000	0	3.5845e+03	0.3240
4	0	3585	0.3238
4.5000	0	3.5855e+03	0.3238
5	0	3586	0.3238
5.5000	0	3.5865e+03	0.3238
6	0	3587	0.3238
6.5000	0	3.5875e+03	0.3238
7	0	3588	0.3231
7.5000	0	3.5885e+03	0.3231
8	0	3589	0.3231
8.5000	0	3.5895e+03	0.3239
9	0	3590	0.3237
9.5000	0	3.5905e+03	0.3238
10	0	3591	0.3235
10.5000	0.0084	3.5915e+03	0.3230
11	0.0098	3592	0.3231
11.5000	0.0097	3.5925e+03	0.3232
12	0.0096	3593	0.3232
12.5000	0.0096	3.5935e+03	0.3234
13	0.0096	3594	0.3229
13.5000	0.0096	3.5945e+03	0.3229
14	0.0096	3595	0.3228
14.5000	0.0096	3.5955e+03	0.3226
15	0.0096	3596	0.3228
15.5000	0.0097	3.5965e+03	0.3228
16	0.0098	3597	0.3229
16.5000	0.0098	3.5975e+03	0.3231
17	0.0098	3598	0.3230
17.5000	0.0098	3.5985e+03	0.3228
18	0.0099	3599	0.3228
18.5000	0.0099	3.5995e+03	0.3221
19	0.0098	3600	0.3222

(A)

(B)

**ANEXO VII –.Histórico de Banco de Dados (HDA) OPC Tool Box Matlab
Simulink μ ctr5 NAPRATECONTROL 5.**

Tabela A 7 - Comportamento do μ ctr5 grau de evidência do NAPRATECONTROL 5.

Tempo(s)	μctr5	Tempo(s)	μctr5
0	0	3581	-0.0896
0.5000	0	3.5815e+03	-0.0896
1	0	3582	-0.0904
1.5000	0	3.5825e+03	-0.0904
2	0	3583	-0.0913
2.5000	0	3.5835e+03	-0.0906
3	0	3584	-0.0905
3.5000	0	3.5845e+03	-0.0908
4	0	3585	-0.0912
4.5000	0	3.5855e+03	-0.0912
5	0	3586	-0.0904
5.5000	0	3.5865e+03	-0.0904
6	0	3587	-0.0910
6.5000	0	3.5875e+03	-0.0910
7	0	3588	-0.0912
7.5000	0	3.5885e+03	-0.0912
8	0	3589	-0.0913
8.5000	0	3.5895e+03	-0.0905
9	0	3590	-0.0901
9.5000	0	3.5905e+03	-0.0900
10	0	3591	-0.0894
10.5000	-0.0168	3.5915e+03	-0.0897
11	-0.0159	3592	-0.0901
11.5000	-0.0158	3.5925e+03	-0.0900
12	-0.0158	3593	-0.0899
12.5000	-0.0158	3.5935e+03	-0.0898
13	-0.0158	3594	-0.0888
13.5000	-0.0158	3.5945e+03	-0.0886
14	-0.0158	3595	-0.0882
14.5000	-0.0158	3.5955e+03	-0.0885
15	-0.0158	3596	-0.0888
15.5000	-0.0158	3.5965e+03	-0.0885
16	-0.0159	3597	-0.0888
16.5000	-0.0159	3.5975e+03	-0.0889
17	-0.0157	3598	-0.0887
17.5000	-0.0157	3.5985e+03	-0.0889
18	-0.0158	3599	-0.0888
18.5000	-0.0158	3.5995e+03	-0.0892
19	-0.0159	3600	-0.0894

(A)
(B)

**ANEXO VIII –.Histórico de Banco de Dados (HDA) OPC Tool Box Matlab
Simulink SPR $\lambda 5$ NAPRATECONTROL 5.**

Tabela A 8 - Comportamento do $\lambda 5$ grau de evidência do NAPRATECONTROL 5.

Tempo(s)	$\lambda 5$	Tempo(s)	$\lambda 5$
0	1	3581	0.7199
0.5000	1	3.5815e+03	0.7199
1.0000	1	3582	0.7205
1	1	3.5825e+03	0.7205
1.0000	1	3583	0.7205
1.5000	1	3.5835e+03	0.7194
2	1	3584	0.7194
2.0294	1	3.5845e+03	0.7199
2.0294	1	3585	0.7203
2.5000	1	3.5855e+03	0.7203
3	1	3586	0.7199
3.5000	1	3.5865e+03	0.7199
4	1	3587	0.7202
4.5000	1	3.5875e+03	0.7202
5	1	3588	0.7210
5.5000	1	3.5885e+03	0.7210
6	1	3589	0.7210
6.5000	1	3.5895e+03	0.7199
7	1	3590	0.7199
7.2666	1	3.5905e+03	0.7198
7.2666	1	3591	0.7198
7.2666	1	3.5915e+03	0.7204
7.5000	1	3592	0.7204
7.7334	1	3.5925e+03	0.7203
8	1	3593	0.7203
8.5000	1	3.5935e+03	0.7200
9	1	3594	0.7200
9.5000	1	3.5945e+03	0.7199
10	1	3595	0.7199
10.5000	1	3.5955e+03	0.7202
11	0.9982	3596	0.7202
11.0518	0.9982	3.5965e+03	0.7200
11.1037	0.9982	3597	0.7200
11.1850	0.9982	3.5975e+03	0.7199
11.2782	0.9982	3598	0.7199
11.3892	0.9982	3.5985e+03	0.7202
11.5000	0.9982	3599	0.7202
11.5858	0.9982	3.5995e+03	0.7210
11.6716	0.9982	3600	0.7210

(A)

(B)

**ANEXO IX –.Histórico de Banco de Dados (HDA) OPC Tool Box Matlab
Simulink $\phi E4$ NAPRATECONTROL 4.**

Tabela A 9 - Comportamento do $\phi E4$ grau de evidência do NAPRATECONTROL 4.

Tempo(s)	$\phi E4$	Tempo(s)	$\phi E4$
0	1	3581	0.8097
0.5000	1	3.5815e+03	0.8097
1	1	3582	0.8099
1	0.3200	3.5825e+03	0.8099
1	0.3200	3583	0.8108
1.5000	0.3200	3.5835e+03	0.8112
2	0.3200	3584	0.8111
2.0294	0.3200	3.5845e+03	0.8109
2.0294	0.3200	3585	0.8110
2.5000	0.3200	3.5855e+03	0.8110
3	0.3200	3586	0.8105
3.5000	0.3200	3.5865e+03	0.8105
4	0.3200	3587	0.8108
4.5000	0.3200	3.5875e+03	0.8108
5	0.3200	3588	0.8102
5.5000	0.3200	3.5885e+03	0.8102
6	0.3200	3589	0.8103
6.5000	0.3200	3.5895e+03	0.8106
7	0.3200	3590	0.8102
7.2666	0.3200	3.5905e+03	0.8103
7.2666	0.3200	3591	0.8096
7.2666	0.3200	3.5915e+03	0.8093
7.5000	0.3200	3592	0.8097
7.7334	0.3200	3.5925e+03	0.8097
8	0.3200	3593	0.8097
8.5000	0.3200	3.5935e+03	0.8098
9	0.3200	3594	0.8088
9.5000	0.3200	3.5945e+03	0.8087
10	0.3200	3595	0.8083
10.5000	0.3368	3.5955e+03	0.8083
11	0.3378	3596	0.8086
11.0518	0.3378	3.5965e+03	0.8085
11.1037	0.3378	3597	0.8088
11.1850	0.3378	3.5975e+03	0.8090
11.2782	0.3378	3598	0.8088
11.3892	0.3378	3.5985e+03	0.8088
11.5000	0.3376	3599	0.8086
11.5858	0.3376	3.5995e+03	0.8082
11.6716	0.3376	3600	0.8084

(A)

(B)

**ANEXO X –.Histórico de Banco de Dados (HDA) OPC Tool Box Matlab
Simulink $\phi E5$ NAPRATECONTROL 5.**

Tabela A 10 - Comportamento do $\phi E5$ grau de evidência do NAPRATECONTROL 5.

Tempo(s)	$\phi E5$	Tempo(s)	$\phi E5$
0	1	3581	0.9104
0.5000	1	3.5815e+03	0.9104
1	1	3582	0.9096
1.5000	1	3.5825e+03	0.9096
2	1	3583	0.9087
2.5000	1	3.5835e+03	0.9094
3	1	3584	0.9095
3.5000	1	3.5845e+03	0.9092
4	1	3585	0.9088
4.5000	1	3.5855e+03	0.9088
5	1	3586	0.9096
5.5000	1	3.5865e+03	0.9096
6	1	3587	0.9090
6.5000	1	3.5875e+03	0.9090
7	1	3588	0.9088
7.5000	1	3.5885e+03	0.9088
8	1	3589	0.9087
8.5000	1	3.5895e+03	0.9095
9	1	3590	0.9099
9.5000	1	3.5905e+03	0.9100
10	1	3591	0.9106
10.5000	0.9832	3.5915e+03	0.9103
11	0.9841	3592	0.9099
11.5000	0.9842	3.5925e+03	0.9100
12	0.9842	3593	0.9101
12.5000	0.9842	3.5935e+03	0.9102
13	0.9842	3594	0.9112
13.5000	0.9842	3.5945e+03	0.9114
14	0.9842	3595	0.9118
14.5000	0.9842	3.5955e+03	0.9115
15	0.9842	3596	0.9112
15.5000	0.9842	3.5965e+03	0.9115
16	0.9841	3597	0.9112
16.5000	0.9841	3.5975e+03	0.9111
17	0.9843	3598	0.9113
17.5000	0.9843	3.5985e+03	0.9111
18	0.9842	3599	0.9112
18.5000	0.9842	3.5995e+03	0.9108
19	0.9841	3600	0.9106

(A)

(B)