

REDE DE ANÁLISE PARACONSISTENTE COM COMPENSADOR DE TEMPO MORTO APLICADO EM SINTONIA DE CONTROLADORES PARA UM PROCESSO INDUSTRIAL**PARACONSISTENT ANALYSIS NETWORK WITH DEAD TIME COMPENSATOR APPLIED IN CONTROLLER TUNING FOR AN INDUSTRIAL PROCESS****Sérgio Luiz da Conceição Matos¹ i****Roberto Blanco Lorenzo² ii**

Data de Submissão: 14/06/2022 Data de aprovação: 06/04/2023

RESUMO:

Neste artigo apresenta-se a construção de uma estrutura com algoritmos baseados em Lógica Paraconsistente Anotada (LPA) compondo uma rede de análises de sinais. A finalidade de atuar como uma estação paraconsistente nas malhas de controle em cascata integrada ao compensador de tempo morto *Preditor de Smith*. A Estação de Lógica Paraconsistente e *Preditor de Smith* foram implementadas no *Matlab/Simulink* e o controle em cascata no Controlador Lógico Programável (CLP) Altus XP325. O controle em cascata é configurado com dois controladores atuando com ações Proporcional Integral Derivativo (PID) e vem sendo muito utilizado nas plantas industriais em processos quando as perturbações afetam diretamente à variável de processo manipulada de misturas. Um dos principais problemas neste tipo de controle é que apresentam desequilíbrios entre a comunicação dos controladores quando ocorrem mudanças no ajuste de set point local, distúrbios na variável controlada, atraso de transporte (tempo morto referente a variável controlada) ocasionando diferenças percentuais entre as quantidades, o que pode inviabilizar a qualidade do produto final. A estrutura algorítmica proposta utiliza algoritmos baseados em Lógica Paraconsistente (LP) que é uma lógica não clássica capaz de resistir a sinais contraditórios o que faz com que seja vantajosa a sua aplicação em relação a lógica clássica binária. Os resultados desta pesquisa apresentaram o comportamento do algoritmo Nó de Análise Paraconsistente (NAP) integrado com *Preditor de Smith* confiável, demonstrando uma nova alternativa para estratégias de controle com enormes atrasos de tempo em processos industriais.

Palavras-chave: Lógica Paraconsistente Anotada; Controlador Lógico Programável; Algoritmo Paraconsistente; Controle Cascata; *Preditor de Smith*; Rede de Análise Paraconsistente.

ABSTRACT:

This paper presents the construction of a structure with algorithms based on Annotated Paraconsistent Logic (APL) composing a signal analysis network. The purpose of acting as a paraconsistent station in the cascaded control loops integrated with the Smith Predictor dead time compensator. The Paraconsistent Logic Station and Smith's Predictor were implemented

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

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

in Matlab/Simulink and the cascade control in the Programmable Logic Controller (PLC) Altus XP325. Cascade control is configured with two controllers acting with Proportional Integral Derivative (PID) actions and has been widely used in industrial plants in processes when disturbances directly affect the manipulated process variable of mixtures. One of the main problems in this type of control is that there are imbalances between the communication of the controllers when changes occur in the local set point adjustment, disturbances in the controlled variable, transport delay (dead time referring to the controlled variable) causing percentage differences between the quantities, which can derail the quality of the final product. The proposed algorithmic structure uses algorithms based on Paraconsistent Logic (LP), which is a non-classical logic capable of resisting contradictory signals, which makes its application advantageous over classical binary logic.

The results of this research presented the behavior of the Paraconsistent Analysis Node (NAP) algorithm integrated with a reliable Smith Predictor, demonstrating a new alternative for control strategies with enormous time delays in industrial processes.

Keywords: Annotated Paraconsistent Logic; Programmable logical controller; Paraconsistent Algorithm; Cascade Control; *Smith predictor*; Paraconsistent Analysis Network

1 INTRODUÇÃO

O controle automático possibilita a existência de processos extremamente complexos, impossíveis de existirem apenas com o controle manual.

Segundo Matos (2022, p.96); em um trabalho realizado no ano de 2022, para os resultados alcançados em função das respostas transitórias no simulador de RPA aplicada a estratégia de controle em Cascata, a LPA2v poderá ser desenvolvida a outras estratégias de controle avançada utilizando controladores digitais em tempo real nas plantas didáticas com a finalidade de comparar a Rede de análise paraconsistente (sintonia dinâmica) a outros métodos de sintonia aplicados em processos industriais.

Segundo Fernandes (2012), em uma pesquisa realizada em 2012, 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.

O desenvolvimento tecnológico dos equipamentos de controle, tem como finalidade de melhor processamento referente as informações provenientes dos transdutores otimizando controle de processos mais exigentes e precisos.

Em função da evolução da aplicação de lógicas não clássicas aplicadas nos controladores de processo industrial, percebe-se que sua real utilização nos sistemas industriais se encontra limitada a um número pequeno de casos, quando comparada à utilização de sistemas de controle PID.

Segundo Desborough (2002, p. 169); em uma pesquisa realizada no ano de 2002, com mais de 11.000 malhas de controle analisadas em diversas plantas tais como: refinarias, indústrias químicas, de papel, etc., cerca de 97% eram controladas com o algoritmo PID, justificando a necessidade da aplicação de métodos de sintonia nas estratégias de controle, alguns controladores introduziram em seu desenvolvimento, algoritmos baseados em lógica não clássica

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 normaliza as variáveis medidas, tempo morto aplicados ao NAP faz-se desenvolver algoritmos em RPA” (SILVA FILHO et. al. 2021);

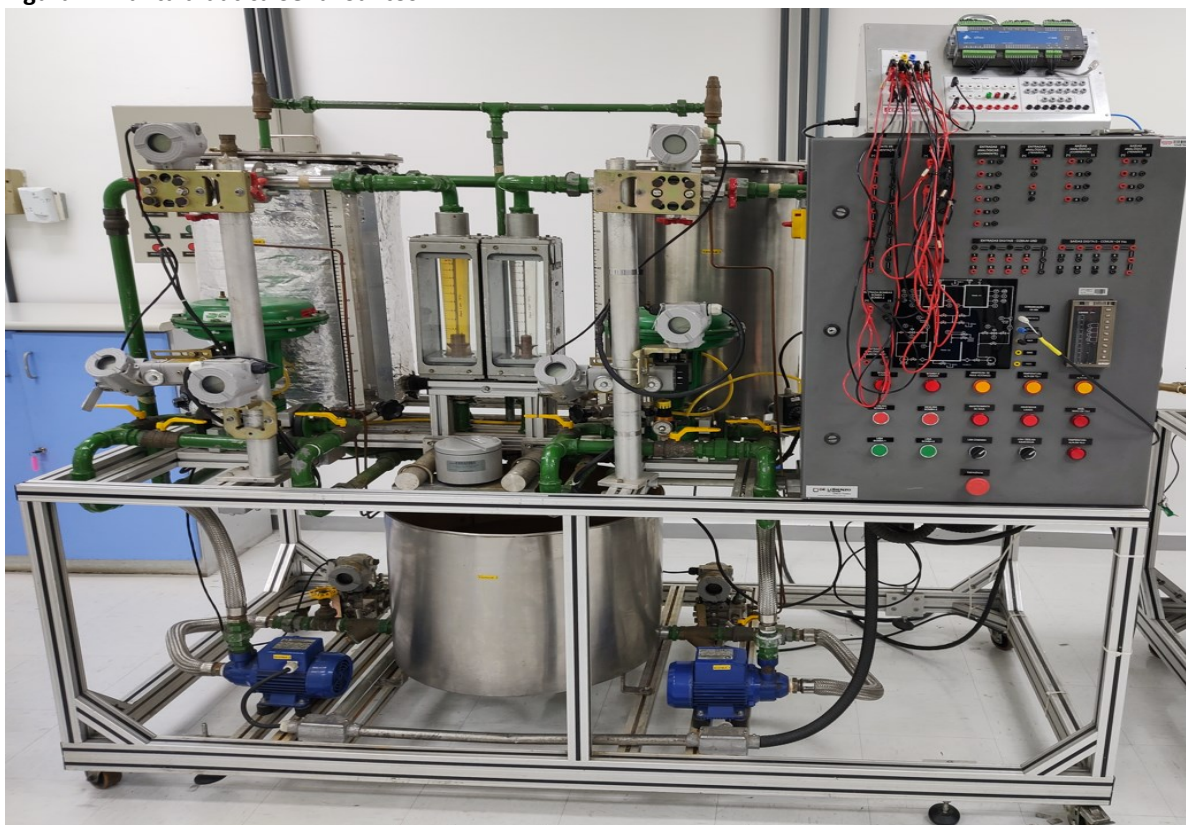
“A presença de tempo morto em processos industriais é proveniente do transporte de energia nos processos industriais” (NORMEY-RICO, BORDONS e CAMACHO, 1997);

Neste trabalho foi desenvolvido a lógica paraconsistente integrado ao *Preditor de Smith* como ajuste adaptativo de PID para amplo valores de tempo morto.

1.1 Objetivos

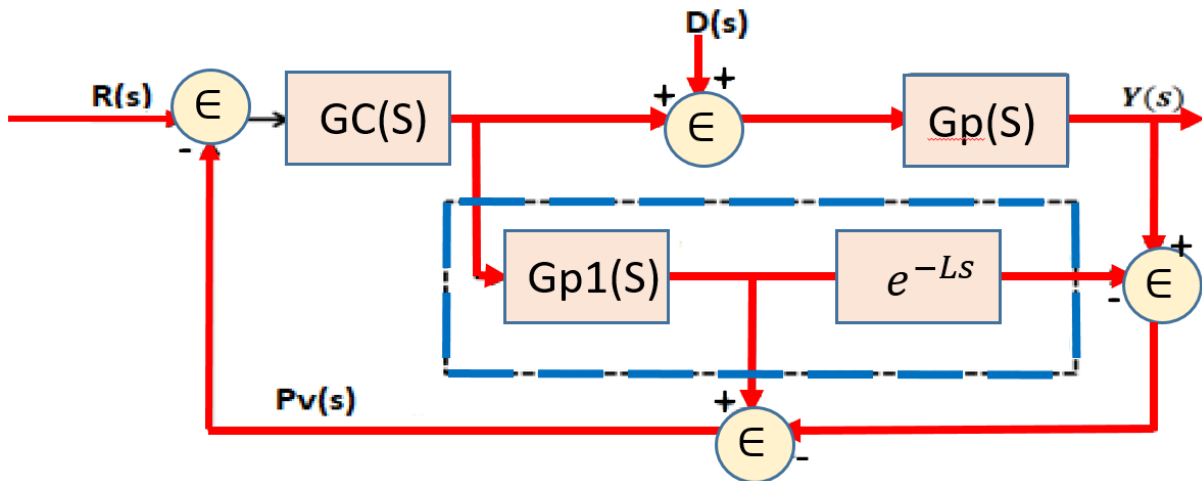
O principal objetivo deste trabalho é a aplicação do algoritmo NAP integrado com *Preditor de Smith* como uma nova alternativa para sintonia em estratégias de controle com altos valores de atraso de tempo em processos industriais. O desenvolvimento do trabalho foi realizado na planta didática figura 1 integrada a figura 2 e 3.

Figura 1- Planta didática Senai Santos.



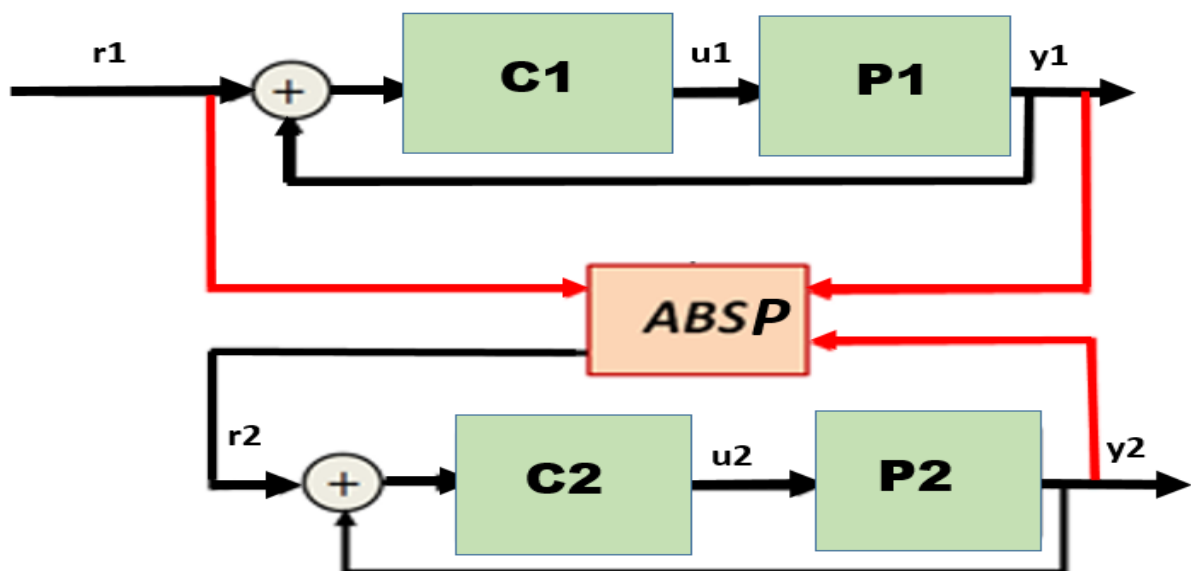
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 2 - Diagrama da estrutura do *Preditor de Smith*



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 3- Controle Cascata Adaptativo com Lógica Paraconsistente integrada ao *Preditor de Smith*



Fonte: Elaborado pelo autor 2022

1.2 Justificativa e relevância do tema

Neste trabalho foi aplicado a RAP (Rede de Análise Paraconsistente) com o *Preditor de Smith* na estratégia de controle em Cascata na medição de nível e vazão, interligando os transmissores existentes na planta didática, aprimorando o estudo para compensação do tempo morto existentes em processos com respostas transitórias em atraso. Para isso as investigações foram realizadas com verificações dos comportamentos da estratégia em controle de Cascata (tempo morto e constante de tempo) utilizando a Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPA2v).

Nestes conceitos desenvolveu-se os algoritmos denominados de nós de análises paraconsistentes (NAP) interligados em redes de análises paraconsistentes (RAP).

Segundo Matos (2022, p.96) a RAP LPA2v foi modificada e aplicada em plantas

industriais em diversas situações de tempo morto e constante de tempo conforme demonstrada na simulação em função da função de transferência obtida e configurada no simulador na qual o algoritmo foi implementado neste trabalho.

A utilização de algoritmos fundamentados na Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPA2v) em controle de processo “...apresentou-se como inovação para os softwares bloqueados utilizados como simulação e controle no tempo real sobre as variáveis a serem controladas em futuras estratégias de controle” (ESPIRITO SANTO et. al., 2022).

2 REVISÃO DE LITERATURA

A Lógica Paraconsistente (LP) tem por objetivo oferecer novas formas de tratar condições contraditórias, inconsistências, ambiguidades. A LP é fundamentada em conceitos que se opõem “... as leis estritamente binárias da lógica clássica e permite que informações contraditórias possam receber um tratamento mais adequado... (MARIO et al., 2021).

Neste artigo é apresentada uma proposta de estação de controle construída com os algoritmos fundamentados em LP com o objetivo de adequar os sinais que atuam nos parâmetros dos controladores quando ocorrem as variações de set point e/ou externas.

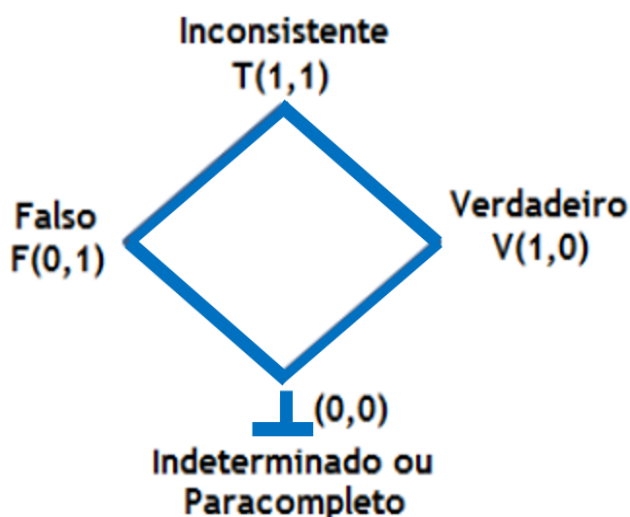
Uma forma de aplicar a LP em processos de controle industrial é “...utilizando o método onde os algoritmos são fundamentados em uma de suas extensões denominada de Lógica Paraconsistente Anotada – LPA” (GARCIA et al, 2019).

Neste trabalho desenvolveu-se a LPA demonstrando a comparação dois sinais de grau de evidência favorável e desfavorável representados pelos transmissores de vazão e nível “...por valores normalizados sendo esta denominada Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores – LPA2v” (SILVA FILHO et. al, 2021).

A LPA2v, pertence a uma família de Lógicas Paraconsistentes, que possui a propriedade de ser associada a um reticulado, que pode ser o diagrama de Hasse, de quatro vértices, conforme mostrado na Figura 4. Nesse tipo de associação, os estados lógicos extremos de uma proposição (P) são representados em seus vértices. A proposição vem acompanhada por anotações pertencentes a um reticulado finito, onde cada anotação, está relacionada a um estado lógico extremo da proposição P, que por sua vez, está localizado no vértice do reticulado, tal que: T= Inconsistente, V= Verdadeiro, F= Falso e \perp = Paracompleto ou Indeterminado.

O algoritmo LPA e *Preditor de Smith* desenvolvido otimizou as respostas transitórias (nível e vazão) existentes nas figuras 17 e 18 em função atraso de transporte de energia (tempo morto) de 570s.

Figura 4- Reticulado associado à lógica paraconsistente anotada de anotação com dois valores LPA2v.



Fonte: Elaborado pelo autor 2022

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 (Controladores Lógicos Programáveis) e SDCDs (Sistemas Digitais de Controle Distribuídos) 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" (NISE, 2012).

Segundo ABE et. al. (2018) 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.

A LPA2v será utilizada como base para a construção da simulação da estratégia de controle em cascata. Entre os algoritmos da LPA2v destaca-se o Nó de Análise Paraconsistente (NAP).

Segundo SILVA FILHO et. al., (2021), 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).

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).

Para Coelho et. al. (2019), o Nó de Análise Paraconsistente – NAP, trata-se de um novo algoritmo de tratamento de incertezas, fundamentado em Lógica Paraconsistente Anotada LPA2v.

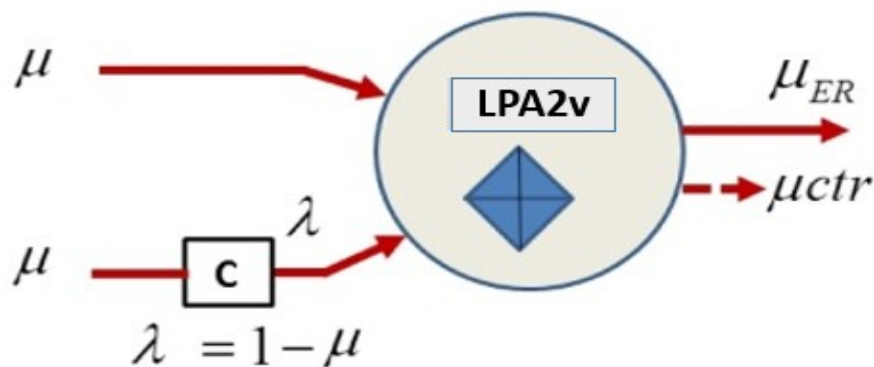
Em várias situações reais onde se utiliza a LPA2v, “...os graus de evidência favorável (crença) e desfavorável (descrença) são considerados informações de entrada do sistema (exemplo: sinais analógicos em corrente e tensão referentes a medidas de variáveis de processos, leituras de protocolos em redes industriais, etc.) (MENDONÇA et. al., 2022) .

“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” (COELHO, 2019).

Apresenta também duas saídas de resultados:

- O Grau de evidência real (μ_{ER}) e o grau de contradição normalizado (μ_{ctr}), conforme mostra a figura 5.

Figura 5- Representação simbólica de um NAP- nó de análise Paraconsistente.



Fonte: Elaborado pelo autor 2022

Segundo Corrêa et. al. (2022), 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 NAP's, formando assim uma rede de NAP's interligados.

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 abaixo e desenvolvida neste trabalho no *MATLAB SIMULINK*” (MATOS, 2018).

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

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

Calcule o Intervalo de Evidência resultante

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

Calcule o Grau de Certeza

$$G_c = \mu - \lambda \quad (3)$$

Calcule o Grau de Contradição

$$G_{ct} = ((\mu + \lambda) - 1) \quad (4)$$

Calcule a distância D

$$D = \sqrt{(1 - |G_c|)^2 + (G_{ct})^2} \quad (5)$$

Determine o Grau de Certeza real

Se $G_c > 0$, $G_{cr} = (1 - D)$

Se $G_c < 0$, $G_{cr} = (D - 1)$

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

$$\mu_{ER} = \frac{G_{cr} + 1}{2} \quad (6)$$

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

3 METODOLOGIA

Implementado o *Preditor de Smith* figura 2 no *Matlab Simulink* integrado a figura 3 sendo desenvolvido a estratégia de controle em cascata adaptativo no CLP com o objetivo de obter as respostas transitórias de controle referentes ao amplo valor de tempo morto existente em e^{-ls} .

Sendo $GC=P1$ (controlador mestre proporcional mais integral), $P1=GP$ (s) medição de nível da planta sobre a ação da constante de tempo e tempo morto, $GP1(s)$ = a Função de transferência de 1^o ordem (variável mestre nível). $C2$ (controlador escravo Proporcional + integral) e $P2$ a medição de vazão, energia a ser manipulada pelo controlador a ser desenvolvido no PLC ALTUS.

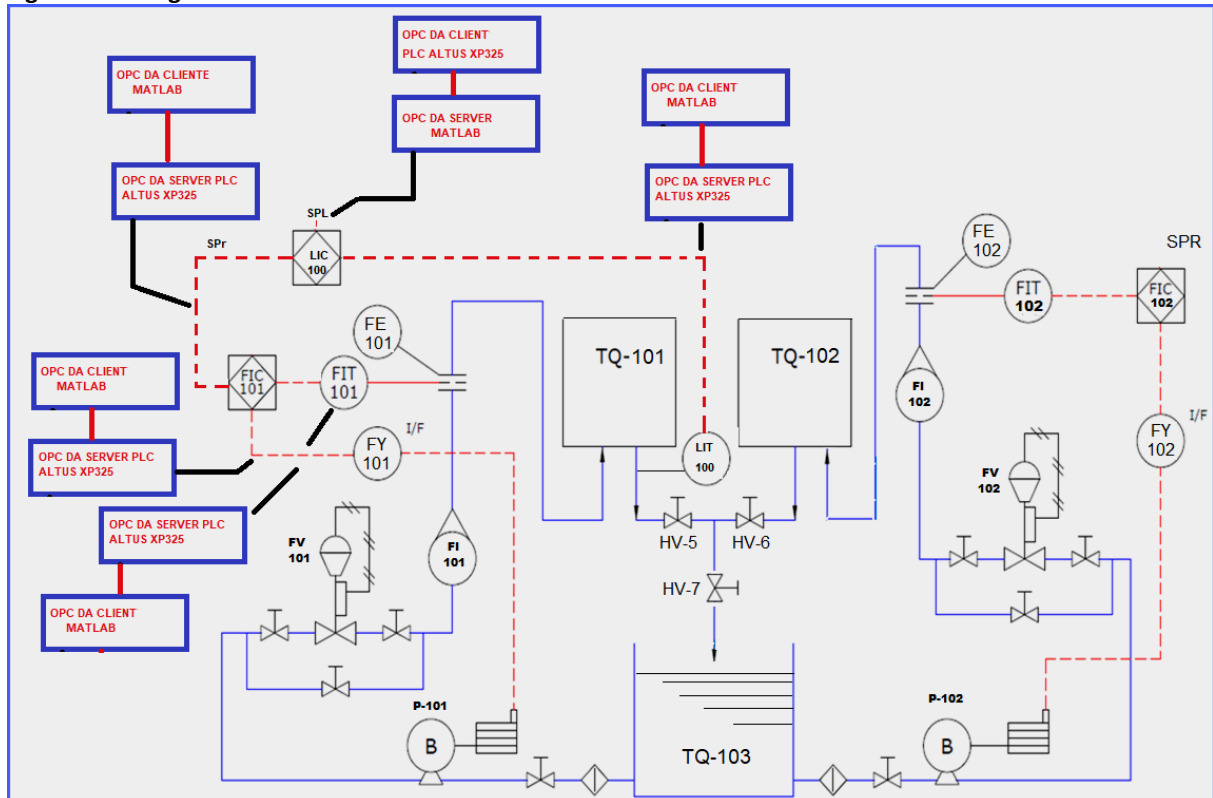
Sendo $GC=P1$ (controlador mestre proporcional mais integral), $P1=GP$ (s) medição de nível da planta sobre a ação da constante de tempo e tempo morto, $GP1(s)$ = a Função de transferência de 1^o ordem (variável mestre nível). $C2$ (controlador escravo Proporcional + integral) e $P2$ a medição de vazão, energia a ser manipulada pelo controlador a ser

desenvolvido no PLC ALTUS.

O *Preditor de Smith* é o primeiro sistema de controle proposto “...que induz um compensador de atraso baseado na inclusão do modelo do processo com atraso na malha de controle” (HENZ, 2013).

O desenvolvimento do sistema foi elaborado a partir do fluxograma da planta de processo figura 6.

Figura 6- Fluxograma Planta didática de Processo

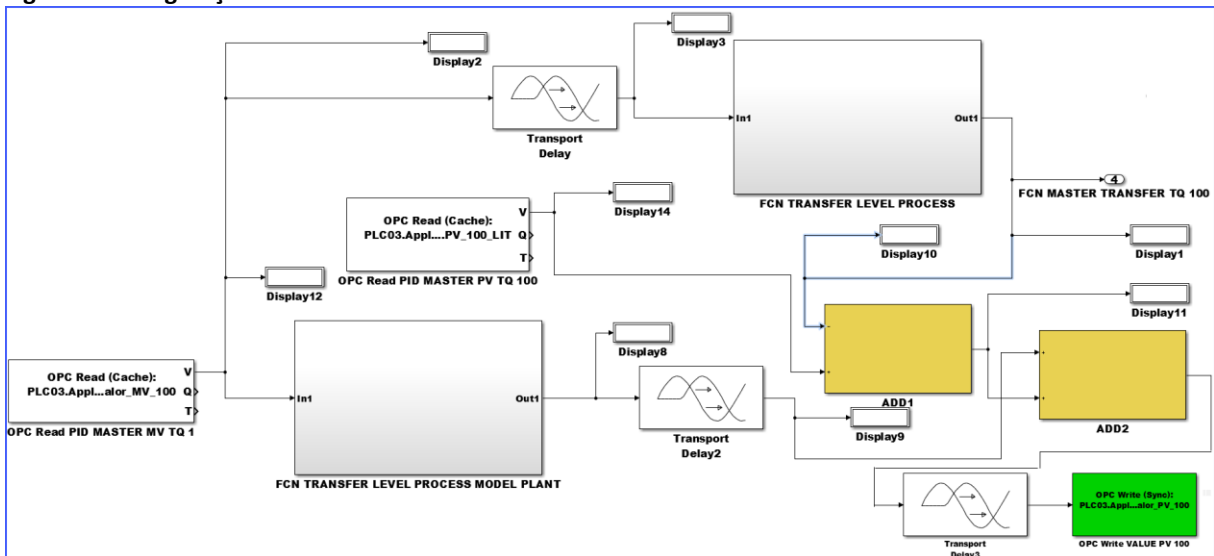


Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme Silva Filho et. al., (2021), “A valorização das evidências é expressa pelo seu valor lógico paraconsistente, ou Grau, que é um número pertencente ao conjunto dos reais no intervalo fechado entre 0 e 1”.

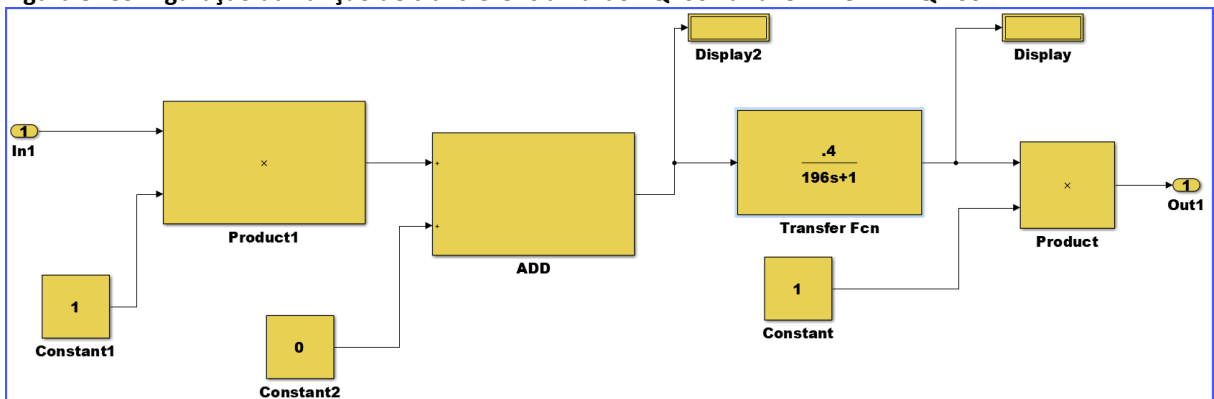
Desenvolvido o *Preditor de Smith no Matlab Simulink* figura 7 utilizando a telemetria de sinal devidamente modelada com o *OPC CLIENT PID MASTER MV e PID MASTER PV*.

Figura 7- Configuração do *Preditor de Smith MATLAB SIMULINK OPC Client PID Master MV e PID Master PV*



Fonte: Elaborado pelo autor

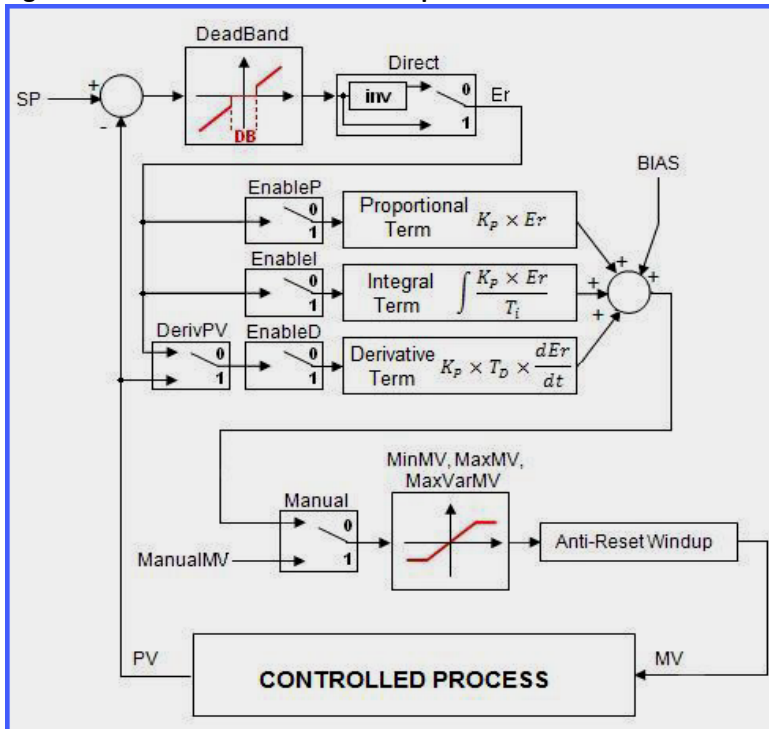
Figura 8- Configuração da Função de transferência Vazão TQ100 variável nível PV TQ 100



Fonte: Elaborado pelo autor

Configurou-se o *Preditor de Smith* no *Matlab Simulink* com a finalidade em compensar o tempo morto da variável nível da planta mais o atraso configurado ao modelamento da planta e a função de transferência de primeira ordem existente figura 8. Os tempos mortos 570s e a constante de tempo do transdutor capacitivo do transmissor pressão diferencial de 0,2s estão integrados ao *Preditor de Smith* e a Rede de análise paraconsistente desenvolvida no *Matlab Simulink* com a finalidade de realizar a telemetria digital na estrutura do Bloco PID KP (ganho proporcional) e TI (tempo integral) do Bloco PID ISA (figura 9) configurado no PLC ALTUS xp325.

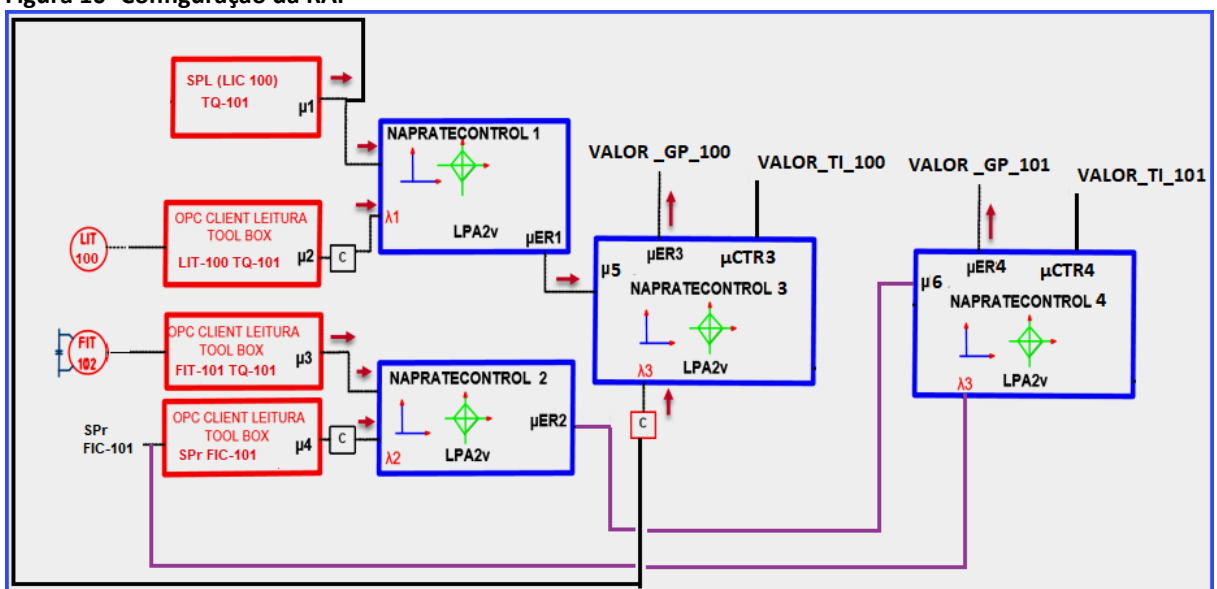
Figura 9-Estrutura Bloco PID ISA PLC xp325 ALTUS



Fonte: Elaborado pelo autor

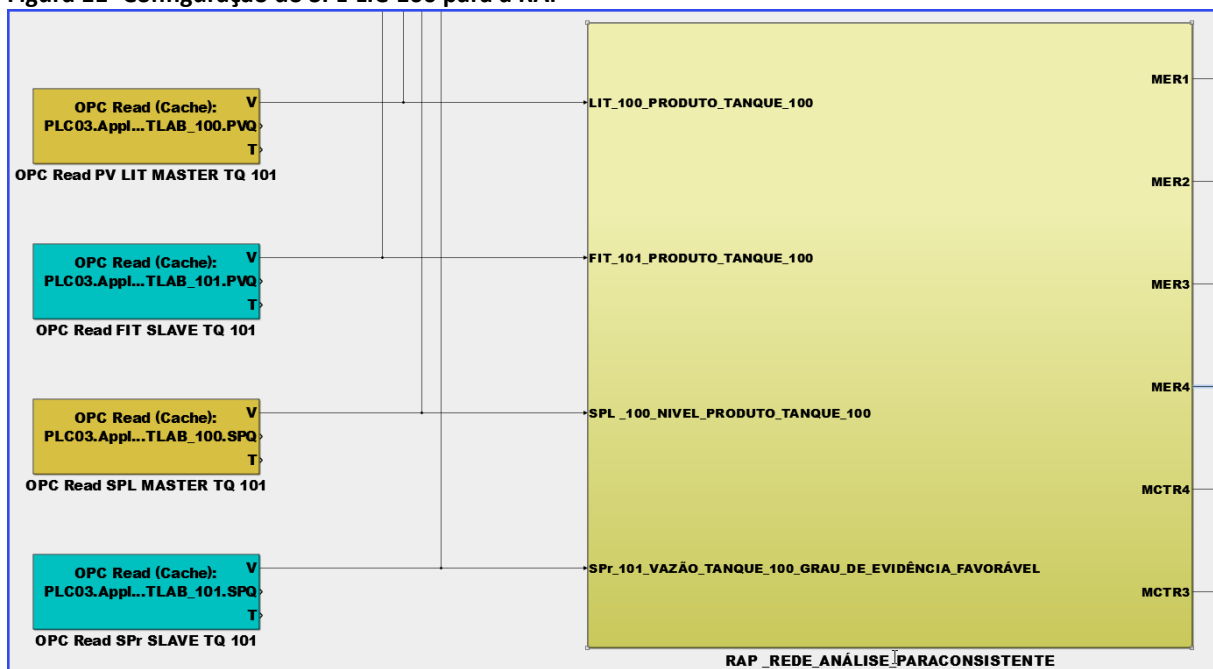
A RAP (Rede de Análise Paraconsistente) contendo 3 NAP's (Nó de Análise Paraconsistente) foi desenvolvida no *MATLAB SIMULINK* para realizar a telemetria digital em função dos *devices* LIT 100, FIT 101 como graus de evidência desfavoráveis e SPL (LIC 100), SPr (FIC 101) como grau de evidência favorável para elaborar a RAP conforme a figura 10 e 11.

Figura 10- Configuração da RAP



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 11- Configuração do SPL-LIC-100 para a RAP



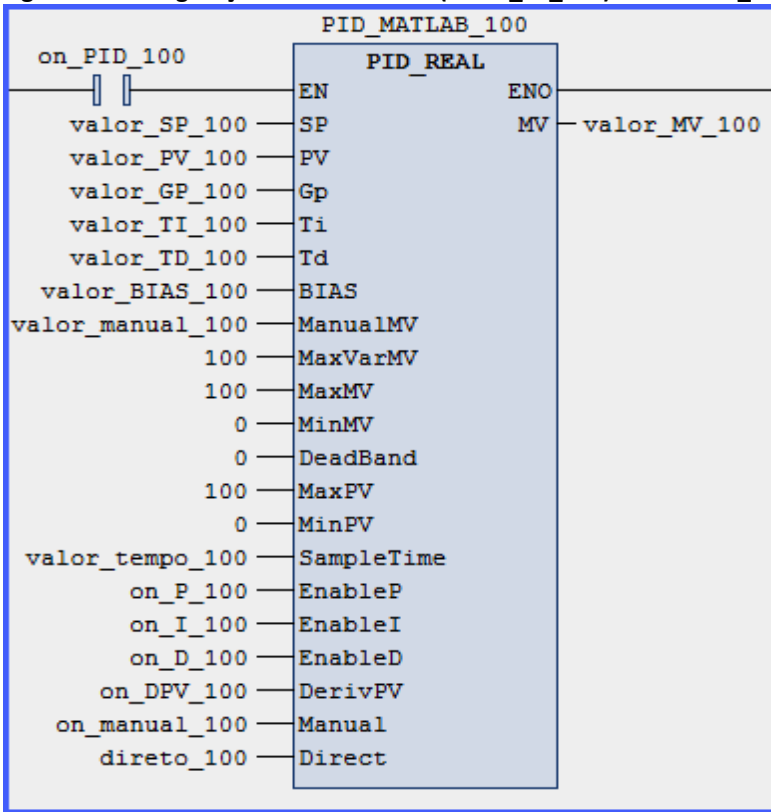
Fonte: Elaborado pelo autor

O SPL LIC-100 é inserido ao *Matlab Simulink* com a finalidade de ser disponibilizado ao BLOCO PID_100_MATLAB configurado no PLC Altus xp325 figura 10 e na RAP conforme figura 11.

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

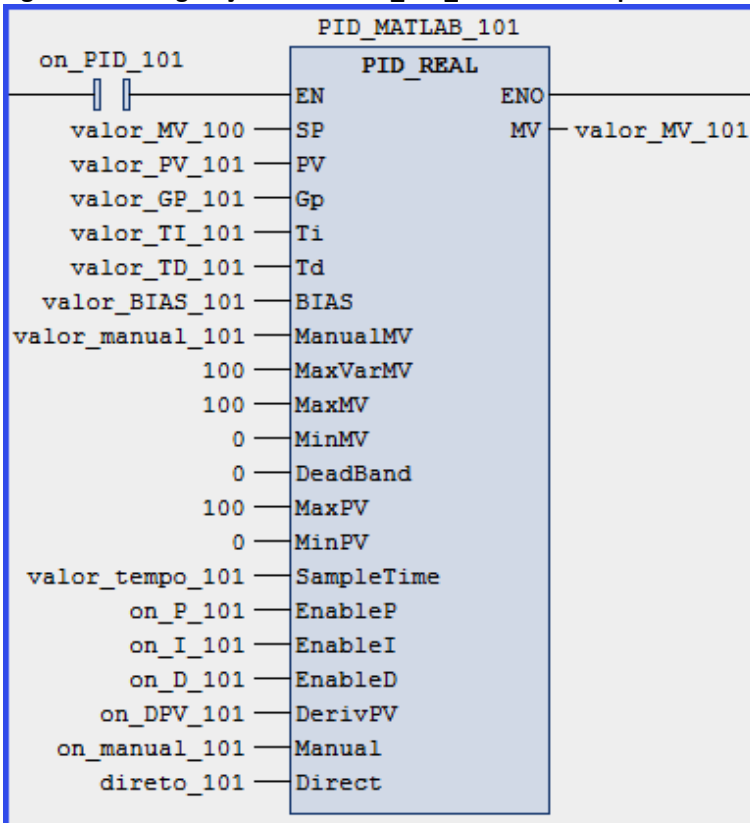
O terceiro nó *NAPRATECONTROL 3* terá como fonte de evidência favorável a saída do grau de evidência resultante real μ_{ER1} do *NAPRATECONTROL 1* e a fonte de evidência favorável do *NAPRATECONTROL 4* será saída do grau de evidência resultante real μ_{ER2} do *NAPRATECONTROL 2*. Tendo finalidade tratar as incertezas dos graus de evidências favoráveis SPL LIC -100 SPr FIC-101, assim como os graus de evidências desfavoráveis, dados por LIT-101 e FIT-101, estabelecendo a RAP que irá disponibilizar os parâmetros referentes a sintonia PID_100_MATLAB figura 12 e PID_MATLAB_101 figuras 13.

Figura 12- Configuração do SPL-LIC-100 (valor _SP_100) BLOCO PID_100_MATLAB PLC xp325



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13- Configuração BLOCO PID_101_MATLAB PLC xp325

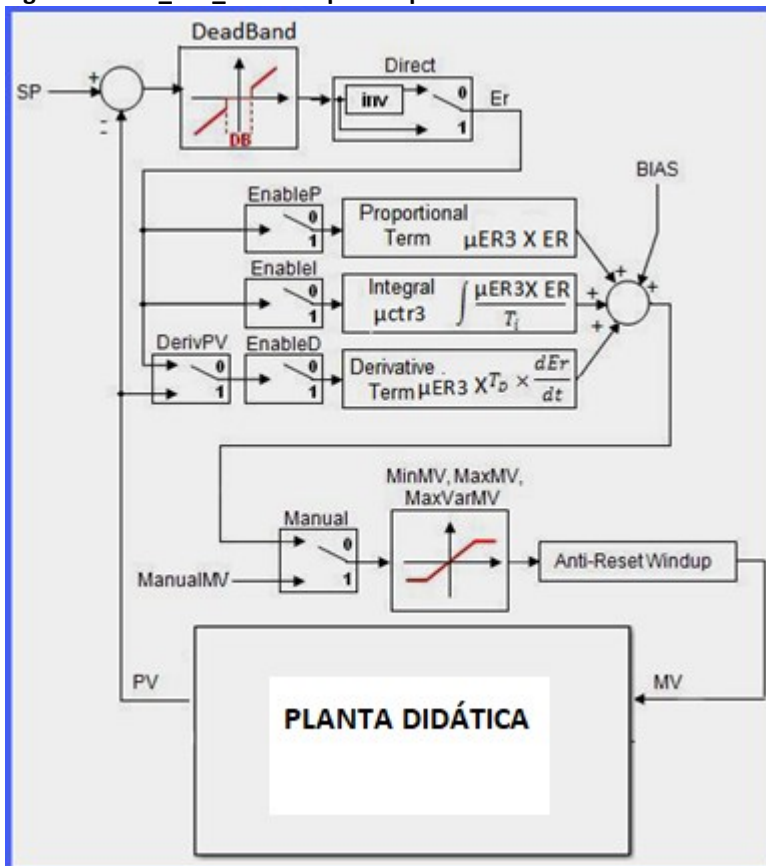


Fonte: Elaborado pelo autor

Os parâmetros MER3 ($\mu ER3$) e MCTR3($\mu ctr3$) fornecem a sintonia valor_GP_100 (ganho proporcional) e valor_TI_100(tempo integral) ao BLOCO PID_100_MATLAB, MER4 ($\mu ER4$) e MCTR4($\mu ctr4$) fornecem a sintonia valor_GP_101 (ganho proporcional) e valor_TI_101(tempo integral) ao BLOCO PID_101_MATLAB.

A finalidade dessa interação construída no *Matlab Simulink* é aplicar a sintonia aos BLOCOS PI mestre 100 e PI escravo 101 conforme a figura 14 e 15.

Figura 14- PID_100_MATLAB $\mu ER3$ e $\mu ctr3$



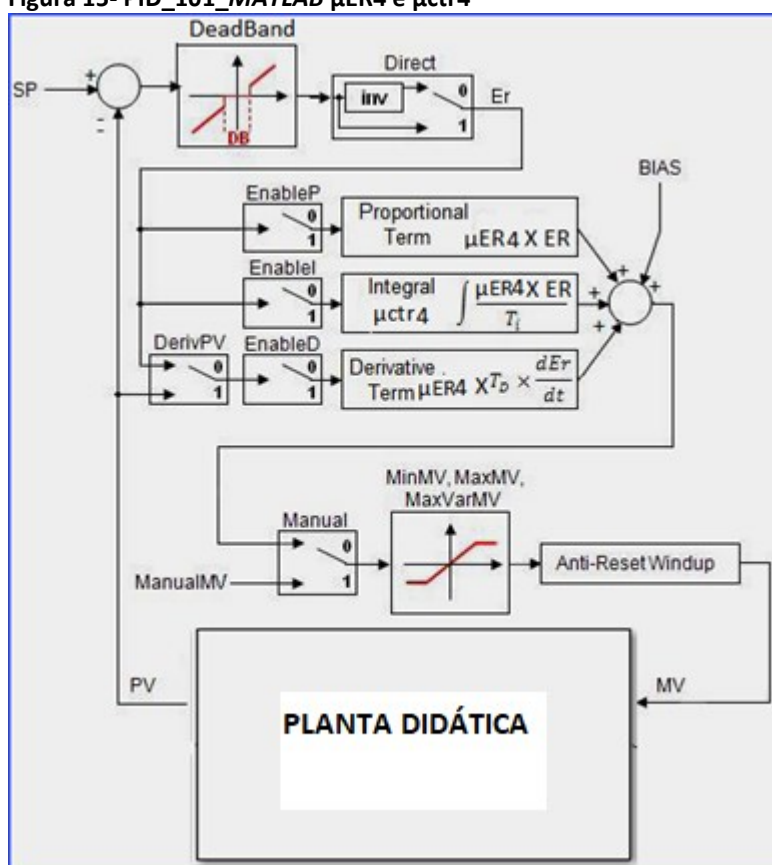
Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo Matos (2016) o cálculo da resposta do controlador) é apresentado na equação 7 e 8, demonstrando uma variante dessa equação chamada de modelo série ou ISA, onde a ação proporcional tem efeito nas ações integral e derivativa.

Desse modo a equação PID ISA referente ao PID_100_MATLAB e PID_101_MATLAB será em função da RAP (Rede de Análise Paraconsistente) aplicada, sendo igual:

$$\text{PID}_{100_MATLAB} \, mv(t) = \mu ER3 \left[e(t) + \mu ctr3 \int e(t) + Td \frac{de}{dt} \right] + \text{Bias} \quad (7)$$

$$\text{PID}_{101_MATLAB} \, mv(t) = \mu ER4 \left[e(t) + \mu ctr4 \int e(t) + Td \frac{de}{dt} \right] + \text{Bias} \quad (8)$$

Figura 15- PID_101_MATLAB μ ER4 e μ ctr4

Fonte: Elaborado pelo autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

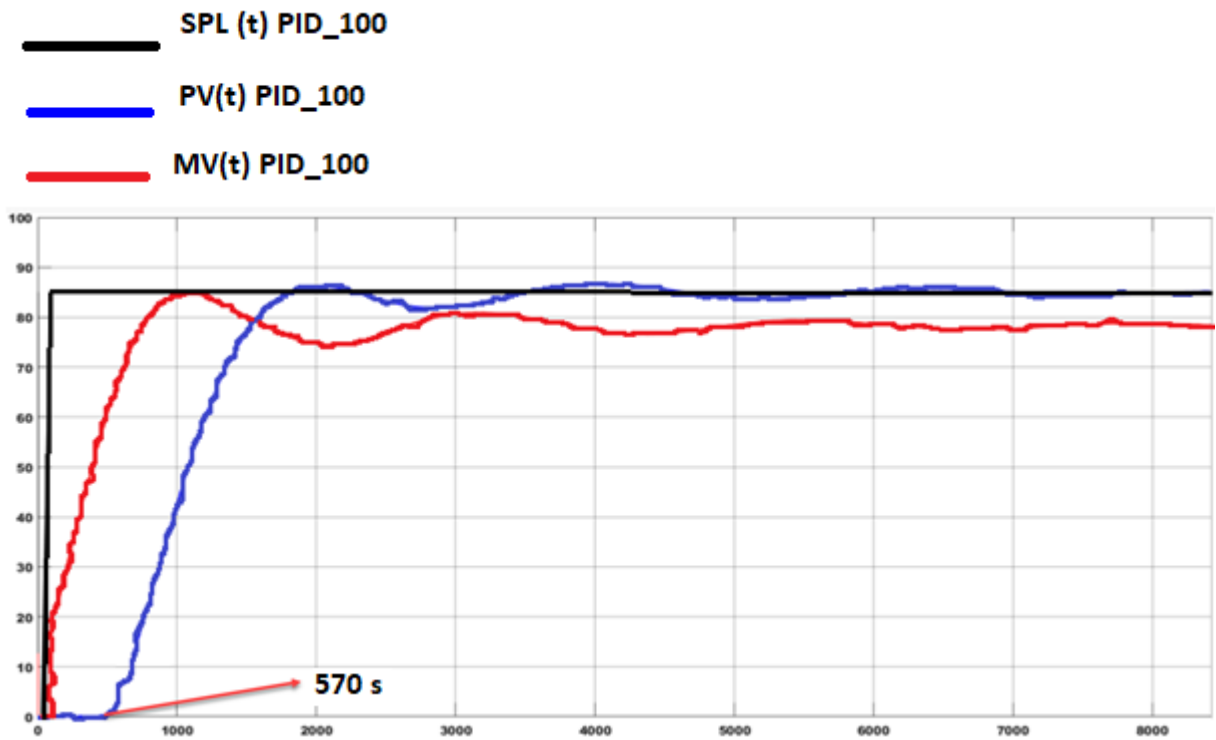
Os resultados obtidos com a aplicação do desenvolvimento da RPA no *Matlab Simulink* como servidor dos parâmetros aos Blocos PID configurado em cascata no Master tools IEC XE estão demonstrados em respostas transitórias para estudo do comportamento de μ ER1, μ ER2, μ ER3, μ ER4, μ ctr3 e μ ctr4 em função das funções de transferências elaboradas nesse trabalho (tempo morto e constante de tempo)

Em função das respostas transitórias obtidas em função do SPL 100 (valor_SP_100, LIC_100) como fonte de grau favorável a RPA pode-se observar que o tempo de acomodação da PV no PID_100_MATLAB e PID_101_MATLAB não apresentam *overshooting* e *undershooting*, ou seja, dentro dos limites de +/- 3 a 5%. (OGATA, 2014)

As respostas transitórias estão demonstradas abaixo, estabelecendo a telemetria digital faixa 0 a 1 para sintonia dinâmica aos blocos PID_100 e 101.

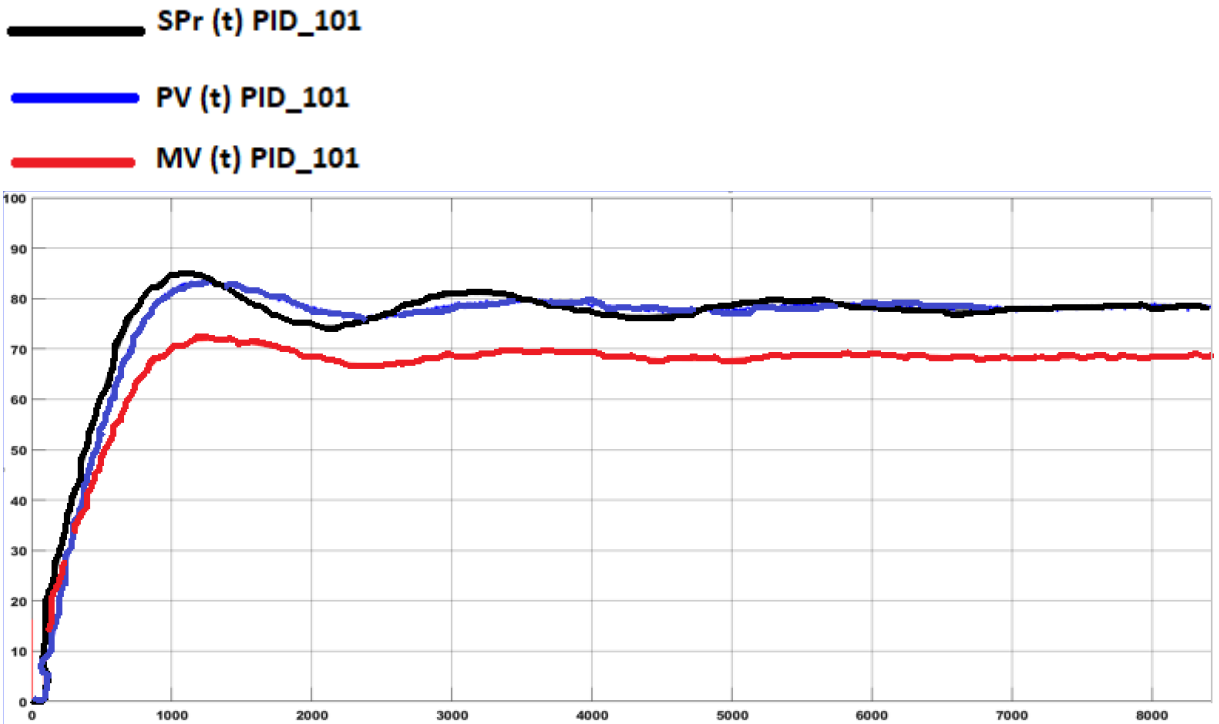
Portanto a RAP integrada ao *Preditor de Smith* poderá ser comparada em trabalhos futuros a outros métodos de sintonia aplicados a otimização de estratégias de controle com amplos valores de tempo morto.

Figura 16- Resposta transitória PID_100_MATLAB Nível tempo morto 570s



Fonte: Elaborado pelo autor

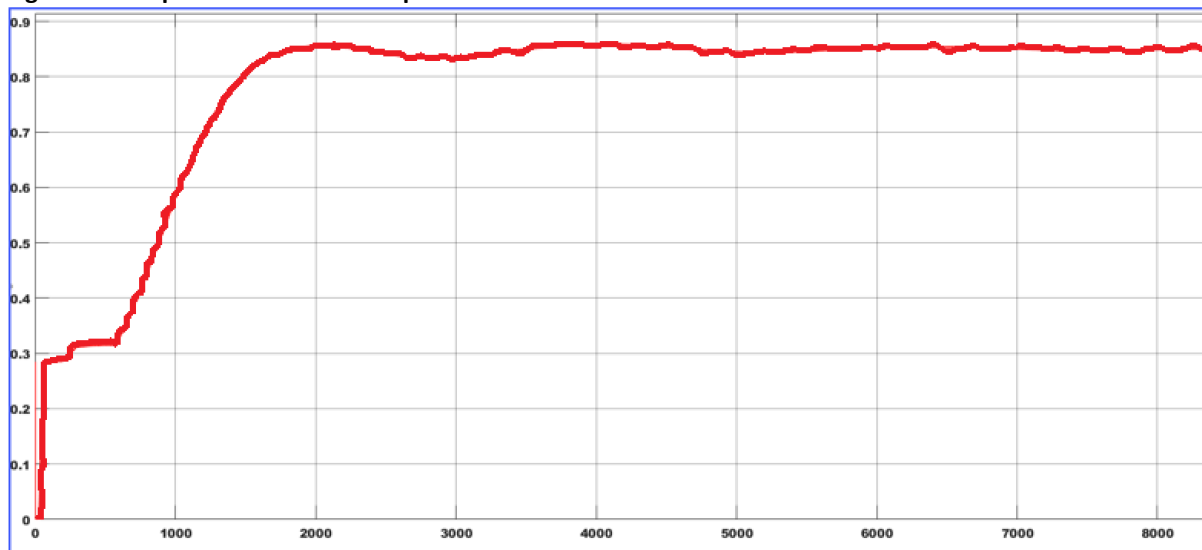
Figura 17- Resposta transitória PID_101_MATLAB Vazão



Fonte: Elaborado pelo autor

Neste método de sintonia utilizando a LPA2v “...as respostas transitórias figura 16 e 17 apresentam *overshooting* e *undershooting* abaixo dos limites de +/- 3 a 5%” (OGATA, 2014).

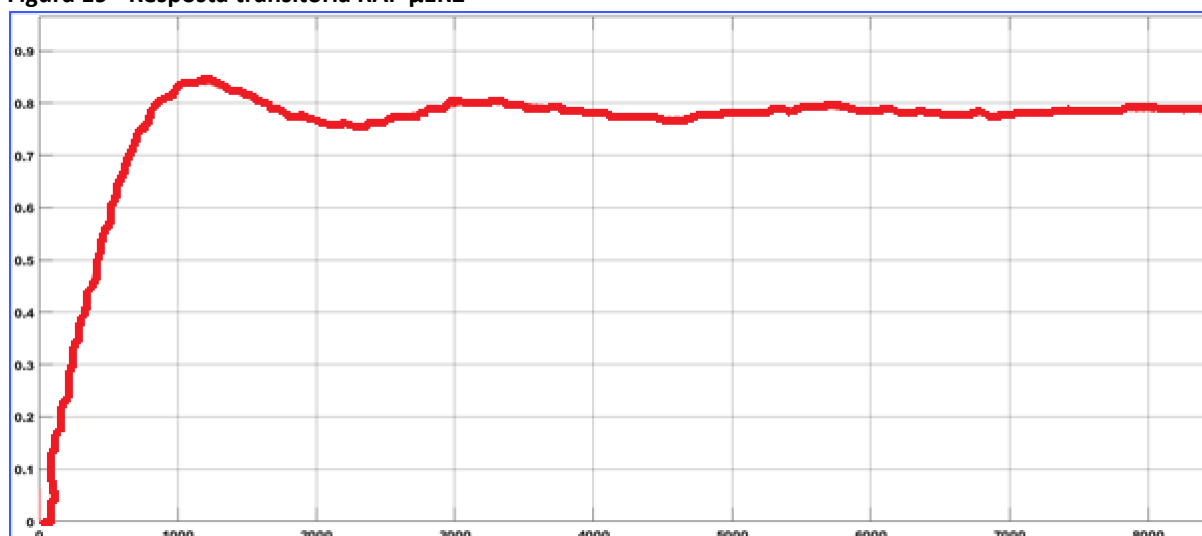
Figura 18- Resposta transitória RAP $\mu ER1$



Fonte: Elaborado pelo autor

A resposta transitória $\mu ER1$ corresponde à representação do condicionamento do grau de evidência favorável SPL (set-point local) e o grau de evidência desfavorável do LIT-100 (nível) ao valor de 0.85 estabelecendo excelente normalização na escala de 0 a 1 estabelecendo o critério de estabilidade.

Figura 19 - Resposta transitória RAP $\mu ER2$

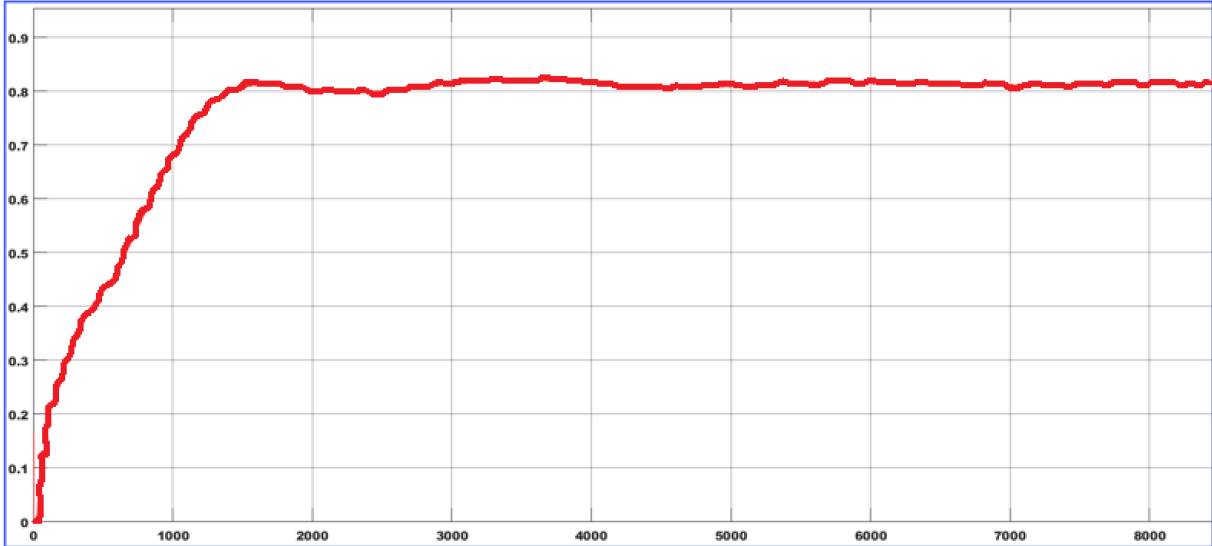


Fonte: Elaborado pelo autor

A resposta transitória $\mu ER2$ corresponde à representação do condicionamento do grau de evidência desfavorável SP (set-point remoto) e o grau de evidência favorável do FIT-101

(vazão) ao valor de 0.85 estabelecendo excelente normalização na escala de 0 a 1.

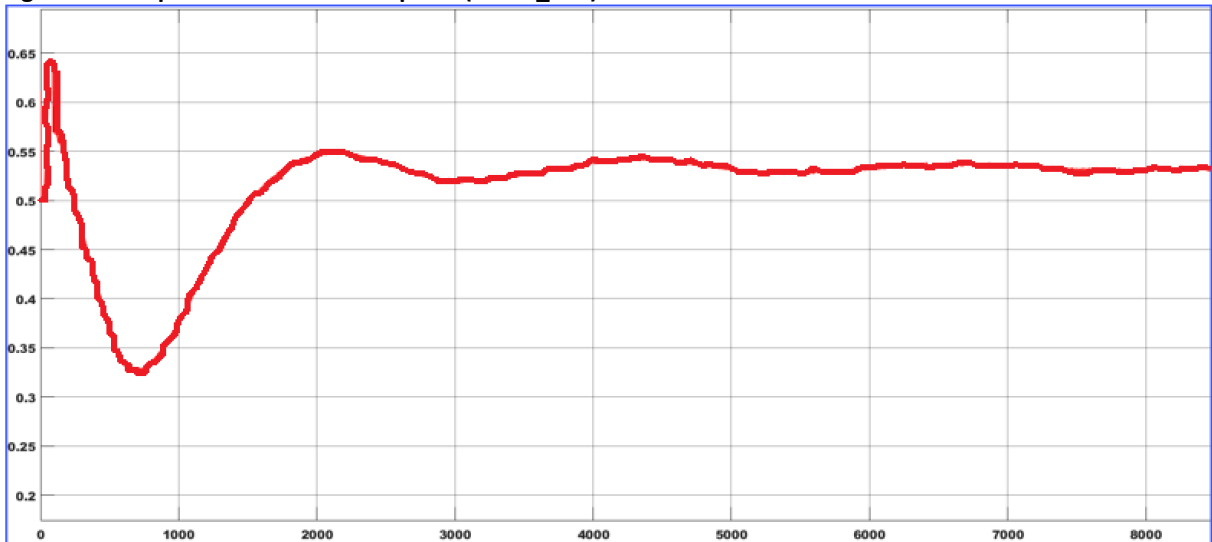
Figura 20 - Resposta transitória RAP $\mu ER3$ (KP PID_100)



Fonte: Elaborado pelo autor

A resposta transitória $\mu ER3$ corresponde à representação do condicionamento com resposta dinâmica em critério de estabilidade referente ao valor a ser aplicado na ação proporcional KP PID 100 *Matlab* mestre na escala de 0 a estrutura PI do PID Altus.

Figura 21- Resposta transitória RAP $\mu ctr3$ (TI PID_100)



Fonte: Elaborado pelo autor

A resposta transitória $\mu ctr3$ corresponde à normalização da resposta dinâmica em critério de estabilidade referente ao valor a ser aplicado na ação integral TI PID 100 mestre na escala de 0 a 1 referente a estrutura PI do PID Altus para a normalização da variável nível a ser controlada.

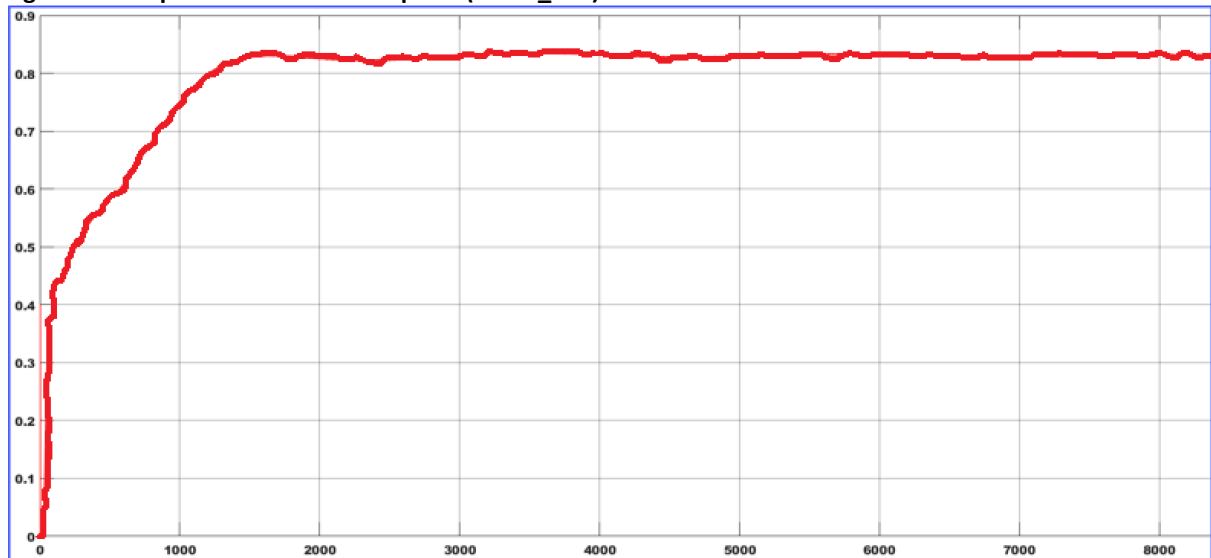
Figura 22- Resposta transitória RAP $\mu ER4$ (KP PID_101)



Fonte: Elaborado pelo autor

A resposta transitória $\mu ER4$ corresponde à representação do condicionamento do valor da ação proporcional KP PID 101 *Matlab* escravo na escala de 0 a 1 em regime amortecido para otimizar o *overshooting* e *undershooting* referente a variável vazão.

Figura 23- Resposta transitória RAP $\mu tr4$ (TI PID_101)



Fonte: Elaborado pelo autor

A resposta transitória $\mu tr4$ corresponde à normalização do valor da ação integral TI PID 101 *Matlab* escravo no valor de 0,85 não atingindo o valor de saturação, ou seja, foi otimizado a variável na escala de 0 a 1 evitando que fizesse ocorrer o *overshooting* e *undershooting* na variável vazão. A sintonia dinâmica apresentada em $\mu tr4$ evita que ocorra *overshooting* e *undershooting* no PID 100 Altus, otimizando o tempo morto apresentado em 570s.

5 CONCLUSÃO

Para os resultados alcançados em função das respostas transitórias em função da RPA e o *Preditor de Smith* aplicado a estratégia de controle em Cascata, as figuras 17 e 18 apresentam overshooting e undershooting abaixo dos limites de +/- 3 a 5%

A LPA2v poderá ser desenvolvida a outras estratégias de controle avançada com grande tempo morto utilizando controladores digitais em tempo real nas plantas didáticas ou processos industriais com a finalidade de comparar a rede de análise paraconsistente (sintonia dinâmica) a outros métodos de sintonia.

A RAP poderá ser modificada e aplicada em diversas situações de tempo morto / constante de tempo conforme foi demonstrado durante as respostas transitórias figura 16 e 17, na qual apresenta-se a recuperação cíclica em função do degrau aplicado ao SPL (t) *PID_100 Matlab*.

O SPL(t) aplicado ao *PID_100 Matlab* estabeleceu a integração entre o LPA2v (Lógica Paraconsistente Anotada com 2 valores) as equações $PID_100_MATLAB\ mv(t) = \mu ER3 \left[e(t) + \mu ctr3 \int e(t) + Td \frac{de}{dt} \right] + Bias$ e $PID_101_MATLAB\ mv(t) = \mu ER4 \left[e(t) + \mu ctr4 \int e(t) + Td \frac{de}{dt} \right] + Bias$.

Para trabalhos futuros pode-se aplicar a RAP em PLC's Siemens s71500/s71512 com remota integrados ao Matlab/Simulink/*Node Red* para otimização do tempo morto.

REFERÊNCIAS

ABE, J. M., et. al. Some Aspects on Complementarity and Heterodoxy in Non-Classical Logics. **Procedia Computer Science**, v.126, p. 1253–1260, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.08.068>. Acesso em: 10 nov. 2022.

CORRÊA, M. P., et. al. Paraconsistent annotated logic applied to industry assets condition monitoring and failure prevention based on vibration signatures. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 1, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i1.25104. Acesso em: 10 jan. 2023.

COELHO, M.S. et al. Hybrid PI controller constructed with paraconsistent annotated logic. **Control Engineering Practice**, v.84, p. 112-124, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.11.007>. Acesso em: 10 jan. 2023.

DESBOROUGH, L; Miller, R. Increasing customer value of industrial control performance monitoring - Honeywell's experience. **AICHE Symposium Series**, n. 326, pp. 169-189, 2002.

ESPIRITO SANTO, L. et. al. Um Sistema de Controle Utilizando Algoritmo NAP Aplicado a uma Unidade Experimental no Controle de Vazão **Journal of Applied Instrumentation and Control** v.10, n. 2, p. 1-10. 2022. DOI: 10.3895/jaic.v10n2. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/bjic/article/view/14455> . Acesso em: 10 nov. 2022.

FERNANDES, C. L. M., MARIO C. M., SILVA FILHO, J. I. da. Study for inclusion of paraconsistent annotated logic in specific standards for use in programmable controllers. *Science and Technology*. v.1. n. 2. P. 49-53, 2012

GARCIA, D.V., et. al. Analysis of Raman spectroscopy data with algorithms based on paraconsistent logic for characterization of skin cancer lesions. **Vibrational Spectroscopy**, v. 103, n.102929, 10p. 2019.

HENZ, Mateus E. **Controle de temperatura com compensação de tempo morto em aquecedores de água baseados em chamas modulante**. Monografia (Graduação. Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 45p. 2013. Disponível em: <https://goo.gl/vWpxdh>. Acesso em: 22 jul. 2015.

MENDONÇA, K. C. A. A. de .; MATOS, S. L. da C. .; SILVA FILHO, J. I. da.; MARIO, M. C. .; GARCIA, D. V. .; CÔRTEZ, H. M.; CARVALHO JUNIOR, A. de; FARIAS, I. S. Microprocessor Structure with Ratio Control Action Based on Annotated Paraconsistent Logic. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 13, p. 01-12, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i13.35850. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/35850>. Acesso em: 10 mar 2023.

MARIO, M. C.; GARCIA, D. V.; SILVA FILHO, J. I. da .; SILVEIRA JÚNIOR, L.; BARBUY, H. S. Characterization and classification of numerical data patterns using Annotated Paraconsistent Logic and the effect of contradiction. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 13, p. e283101320830, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i13.20830. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/20830>. Acesso em: 19 nov. 2022.

MATOS, Sérgio Luiz da Conceição. **Rede de Análise Paraconsistente Aplicada em malha de Controle de Razão para um processo industrial**, 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Santa Cecília, Santos, 2018.

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

MATOS, **Rede de Análise Paraconsistente aplicada em sintonia de controladores para um processo industrial**. *Revista Brasileira de Mecatrônica*, São Caetano do Sul, SP, v. 5, n. 2, p.79-98, outubro-dezembro, 2022. Disponível em: <https://revistabrmecatronica.sp.senai.br/ojs/index.php/revistabrmecatronica/article/view/188>. Acesso em: 19 jan. 2023.

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

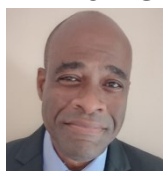
NORMEY-RICO, J.E.; BORDONS, C.; CAMACHO, E.F. Improving the robustness of dead-time compensating pi controllers. **Control Engineering Practice**, v. 5, p. 801–810, 1997. Disponível em: <http://goo.gl/LZGMOU>. Acesso em: 20 dez. 2015.

OGATA, K. **Modern control engineering**, 5. ed. Prentice Hall Inc, [s. l.], 2014.

SILVA FILHO, J.I. et. al. Paraconsistent annotated logic algorithms applied in management and control of communication network routes **Sensors**, v. 21, n. 12, 4219, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s21124219>. Acesso em: 10 nov. 2022.

SOBRE OS AUTORES:

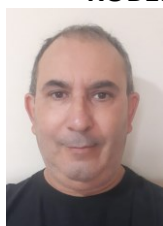
SERGIO LUIZ DA CONCEIÇÃO MATOS



Mestre em Eng. Mecânica pela universidade Santa Cecília (2018). Possui graduação em Eng. Elétrica pela Universidade do Vale do Paraíba (2002), Pós-graduação em Eng. de Segurança do Trabalho pela Universidade Santa Cecília (2010), Licenciatura em Física pela Universidade Metropolitana de Santos (2007) e Técnico de Instrumentação pelo Senai Santos (1989). Professor da Faculdade SENAI Santos no curso de tecnologia em Automação Industrial.

<https://orcid.org/0000-0002-5595-3947>

ROBERTO BLANCO LORENZO



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

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