

Estrutura Microprocessada com Ação de Controle de Razão Baseada em Lógica Paraconsistente Anotada

Microprocessor Structure with Ratio Control Action Based on Annotated Paraconsistent Logic

Estructura Microprocesada con Acción de Control de Razón Basada en Lógica Paraconsistente Anotada

Recebido: 27/09/2022 | Revisado: 05/10/2022 | Aceitado: 07/10/2022 | Publicado: 13/10/2022

Kelly Cristina Abou Arabi De Mendonça

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6990-3556>

Universidade Santa Cecília, Brasil

E-mail: kellyabou@unisanta.br

Sérgio Luiz da Conceição Matos

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

Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, Brasil

E-mail: sl-matos@uol.com.br

João Inácio da Silva Filho

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9715-8928>

Universidade Santa Cecília, Brasil

E-mail: inacio@unisanta.br

Mauricio Conceição Mario

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1973-2186>

Universidade Santa Cecília, Brasil

E-mail: cmario@unisanta.br

Dorotéia Vilanova Garcia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8769-0328>

Universidade Santa Cecília, Brasil

E-mail: dora@unisanta.br

Hyghor Miranda Côrtes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7508-9404>

Universidade Santa Cecília, Brasil

E-mail: hyghorcortes@gmail.com

Arnaldo de Carvalho Junior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3417-0062>

Instituto Federal de São Paulo, Brasil

E-mail: adecarvalhojr@ifsp.edu.br

Irene Silva Farias

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9685-7265>

Universidade Santa Cecília, Brasil

E-mail: isfarias@unisanta.br

Resumo

Apresenta-se neste artigo a construção de uma estrutura microcontrolada com algoritmos baseados em Lógica Paraconsistente Anotada compondo uma rede de análises de sinais com a finalidade de atuar como uma estação de razão em malhas de controle de mistura. A Estação de Razão Paraconsistente foi implementada em uma placa eletrônica *open-source* Arduino que possui um microControlador ATmega328P. O controle de razão é configurado com dois controladores atuando com ações PID-Proporcional+Integral+Derivativo e vem sendo muito utilizado nas plantas industriais em processos 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* e na variável controlada, ocasionando diferenças percentuais entre as quantidades, o que pode inviabilizar a qualidade do produto final. Portanto, o objetivo da pesquisa foi contribuir para amenizar os efeitos danosos à produção quando são feitas alterações no ponto de ajuste dos controladores. Na estrutura algorítmica proposta utiliza-se algoritmos fundamentados em Lógica Paraconsistente (LP) que é uma lógica não clássica capaz de suportar sinais contraditórios, o que faz com que seja vantajosa a sua aplicação em relação a lógica clássica binária. O *hardware* da Estação de Razão Paraconsistente foi simulado em laboratório e em uma malha de controle experimental apresentando resultados superiores a sistemas de razão que utilizam a lógica convencional.

Palavras-chave: Lógica paraconsistente anotada; Controlador programável; Algoritmo paraconsistente; Controle de razão; Rede de análise paraconsistente.

Abstract

This article presents the construction of a micro-controlled structure with algorithms based on Paraconsistent Annotated Logic composing a network of signal analyzes with the purpose of acting as a reason station in loop control for liquid mixture. The Paraconsistent Ratio Station was implemented on an open-source Arduino electronic board that has an ATmega328P microcontroller. The ratio control is configured with two controllers acting with PID-Proportional+Integral+Derivative actions and this type control action is widely used in industrial mixing processes. One of the main problems in this type of control is that there are imbalances between the communication between two controllers when there are changes that do not adjust the set point and the controlled variable, causing percentage differences between the quantities or that can make the quality of the final product unfeasible. Therefore, the objective of the research was to contribute to mitigate the harmful effects on production when changes are made to the controllers set point. In the proposed algorithmic structure it is used algorithms based on Paraconsistent Logic (PL) that is a non-classical logic capable of supporting contradictory signals that makes it advantageous to its application in relation to classical binary logic. The hardware of Paraconsistent Ratio Station was simulated in the laboratory and in an experimental control scheme, presenting superior results to ratio systems that use conventional logic.

Keywords: Paraconsistent annotated logic; Programmable controller; Ratio control; Paraconsistent analysis network; Paraconsistent red de análisis paraconsistente.

Resumen

Este artículo presenta la construcción de una estructura microcontrolada con algoritmos basados en Lógica Paraconsistente Anotada, componiendo una red de análisis de señales para actuar como estación de relación en lazos de control de mezcla. La estación de relación paraconsistente se implementó en una placa electrónica Arduino de código abierto que tiene un microcontrolador ATmega328P. El control de relación está configurado con dos controladores que actúan con acciones PID-Proporcional+Integral+Derivativo y ha sido ampliamente utilizado en plantas industriales en procesos de mezcla. Uno de los principales problemas en este tipo de control es que existen desequilibrios entre la comunicación de los controladores cuando hay cambios en el ajuste del punto de consigna y en la variable controlada, provocando diferencias porcentuales entre las cantidades, lo que puede hacer que la calidad del producto final inviable. Por lo tanto, el objetivo de la investigación fue contribuir a mitigar los efectos nocivos en la producción cuando se realizan cambios en el punto de ajuste de los controladores. En la estructura algorítmica propuesta se utilizan algoritmos basados en Lógica Paraconsistente (LP) que es una lógica no clásica capaz de soportar señales contradictorias, lo que hace que su aplicación sea ventajosa en relación con la lógica binaria clásica. La Estación de Razón Paraconsistente fue simulada en el laboratorio y en un lazo de control experimental mostrando resultados superiores a los sistemas de razón que usan lógica convencional.

Palabras clave: Lógica paraconsistente anotada; Controlador programable; Control de proporción; Red de análisis paraconsistente.

1. Introdução

O crescente mercado consumidor de produtos industriais tem exigido altos níveis de qualidade e produção com baixos desperdícios de energia e sustentabilidade. Esta tendência traz vários desafios para a engenharia de produção considerando que, a resposta para que tais desafios sejam transpostos, passam por pesquisas que visam a atualização de técnicas de controle de processos industriais. Atualmente as máquinas de produção utilizam os controladores convencionais, dos quais o mais conhecido é o Controlador PID – (proporcional-integral-derivativa). O Controlador PID está entre os mais utilizados nos sistemas de controle tradicionais. Dependendo da finalidade da malha de controle nos processos de produção, a modelagem de sistemas pode ter um grau de complexidade alto o que exige a implementação de controladores mais robustos e adequados para garantir a eficiência do processo (Marlin, 2000).

A automação de processos industriais que utilizam a mistura de líquidos, tais como a indústria farmacêutica e de tratamento de água industrial devem manter a proporção entre os componentes para evitar perda de qualidade no produto final. No entanto este tipo de controle, apresenta problemas de manter a proporção quando ocorrem modificações no controle através de mudanças de *set point* e variações externas (Ogata, 2014).

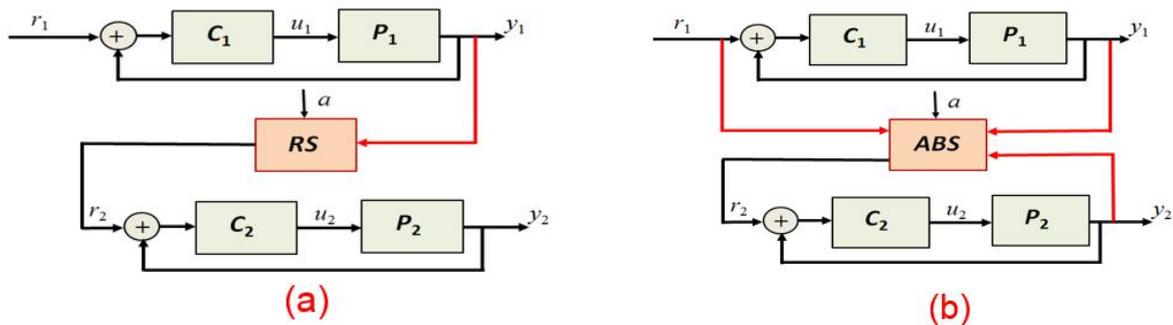
1.1 Controle de Razão em Malhas de automação Industrial

O controle de razão é configurado com dois controladores sendo muito utilizado nas plantas industriais em processos de misturas. Um dos problemas neste tipo de controle é que apresentam desequilíbrios entre a comunicação dos controladores

quando ocorrem mudanças no ajuste de set point e na variável controlada, ocasionando diferenças percentuais entre as quantidades que podem inviabilizar o produto final. Na prática esse tipo de controle é utilizado para a manter o controle proporcional entre dois fluidos. Como exemplo de aplicação desse tipo de controle pode-se destacar, os sistemas em combustão, onde é necessário manter as quantidades entre os fluidos de ar e combustível proporcionais, também sendo utilizados na indústria química e farmacêutica em misturas de ingredientes ou insumos (Shinsky, 1996), (Hägglund, 2001). Basicamente o processo de funcionamento é dado pela existência de duas malhas de controle onde é necessário manter uma constante da razão entre duas variáveis de processo y_1 e y_2 , mesmo havendo condições contraditórias, como o caso da alteração do valor do ponto de ajuste ou fenômenos externos que possam influenciar no processo (Shinsky, 1996), (Hägglund, 2001).

O controle da planta industrial de mistura é feito por intermédio de dois controladores (C1 e C2) que recebem informações sobre a proporção entre os dois produtos através de um módulo denominado Estação de Razão (ES). A Figura 1 mostra os diagramas de dois tipos de ES que atua na forma convencional e na forma adaptativa (Visioli., 2005) (Hägglund., 2001), (OU, YU, & Zang, 2007).

Figura 1: Diagramas de controle de razão em sistemas de mistura. a) Controle de razão convencional. b) Controle de razão do tipo adaptativo.



Fonte: Hägglund. (2001).

O primeiro diagrama (figura 1(a)) é o de um típico controle de razão, onde a *loop* principal consiste no processo P1 e no controlador C1. Nesse tipo convencional de controle de razão a saída (y_1) é o fluxo principal e o ponto de ajuste externo (r_1) define o fluxo principal desejado. O outro *loop*, que consiste no processo P2 e no controlador C2, o controle de Razão tenta controlar o fluxo (y_2) de forma que a fração y_2/y_1 seja igual a um fator a . Nota-se que na Estação Razão (Ratio Station - RS) o *set point* (r_2) é determinado por (Hägglund., 2001), (Visioli., 2005) (OU, YU, & Zang, 2007):

$$r_2(t) = ay_1(t) \quad (1)$$

Enquanto o ganho do segundo *loop* for igual à unidade, a proporção satisfeita no estado estacionário é

$$\frac{y_1(t)}{y_2(t)} = a \quad (2)$$

Nessa configuração convencional, como a saída y_2 está necessariamente atrasada em relação a y_1 , então sempre haverá um atraso na resposta transiente quando houver alteração no *Set-point* r_1 .

Na figura 1(b) é mostrado o bloco da estação de mistura apresentado em (Hägglund., 2001) que tem como característica principal a modificação da estrutura de forma que o valor do *set point* r_2 fosse dependente tanto do valor da saída do processo y_1 , e quanto do ponto de ajuste r_1 . Com isso, ficou definida uma expressão para $r_2(t)$ mostrada na Equação (3) na qual o

parâmetro a que define a proporção com base na equação 2, passou a ser multiplicado por uma função que traz um fator γ denominado de fator de *tunning*.

$$r_2(t) = a[\gamma r_1(t) + (1 - \gamma)y_1(t)] \quad (3)$$

Onde γ é um parâmetro constante que pesa a influência relativa do set point r_1 em r_2 em relação a y_1 .

O fator γ , quando atuando na soma das duas funções que multiplicam o parâmetro a , produz uma linearidade considerada uma ação adaptativa, o que faz com que variações de *set point*, ou da variável controlada, sejam amenizadas em relação ao primeiro tipo de ES mostrada na Figura 1(a). Nesta nova adaptação, os dois controladores, C1 e C2, são selecionados como controladores PI com ponderação de *set point*, ou seja, as variáveis manipuladas u_1 e u_2 da figura 1 (c) podem ser expressas como

$$u_1(t) = K_{p1} \left(b_1 r_1(t) - y_1(t) + \frac{1}{T_{i1}} \int_0^t (r_1(\tau) - y_1(\tau)) d\tau \right) \quad (4)$$

$$u_2(t) = K_{p2} \left(b_2 r_2(t) - y_2(t) + \frac{1}{T_{i2}} \int_0^t (r_2(\tau) - y_2(\tau)) d\tau \right) \quad (5)$$

Onde b_1 e b_2 são os valores do *Set Points*.

No estudo da Estação de Mistura (RS), seguiram-se outras publicações importantes, como os trabalhos vistos em (Visioli., 2005) e (OU, YU, & Zang, 2007). Um problema encontrado para estas aplicações foi a determinação do valor do parâmetro γ de modo que a ER adaptativa mostrada na Figura 1(b) tivesse com bons resultados. Portanto, a forma de obtenção do valor escolhido para o parâmetro γ apresenta-se ainda problemática e as previsões com variações em torno de um valor fixo produz transtornos ao controle da mistura. Considerando este problema em ações de controle de razão esta pesquisa, que trata da aplicação de lógicas não clássicas, tem como objetivo usar como base as configurações e equações que vêm das referências (Hägglund., 2001) e (Visioli., 2005) para a construção de uma rede de Análises e tratamento de sinais para atuar nos controladores da malha. Portanto, este artigo apresenta uma nova abordagem para a estação de controle de razão (ER) utilizando algoritmos baseados em uma lógica não clássica denominada Lógica Paraconsistente Anotada - (LPA) (Abe, Akama, Nakamatsu, & Filho, 2018).

1.2 Lógica Paraconsistente

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 (Filho, Lambert-Torres, & Abe, 2010) e (Mario, Garcia, Filho, Júnior, & Barbuy, 2021).

Neste artigo é apresentada uma proposta de ES 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. Considerando este amplo campo de aplicação em automação, este trabalho tem por objetivo utilizar o algoritmo da Lógica

Paraconsistente Anotada configurado em microcontrolador ATmel328P acoplado a placa de prototipagem Arduino no desenvolvimento do controle de razão com capacidade de ser utilizado na manutenção da proporção entre duas ou mais variáveis em um processo de mistura de líquidos em plantas industriais (Da Silva Filho, et al., 2021) (Corrêa, et al., 2022).

Em relação a metodologia, este trabalho se enquadra na área de automação e Computação aplicada em projetos com implementação de circuitos eletrônicos digitais, sendo, portanto de natureza tecnológica (Jung, 2004). Portanto, foi utilizada uma metodologia considerada, em parte, com abordagem qualitativa, descritiva e de levantamento de dados sistemático no laboratório com um estudo comparativo (Pereira, Shitsuka, Parreira, & Shitsuka, 2018) (Severino, 2018), resultando na construção de uma Estação de Razão representada em placa de *Hardware* e utilizando algoritmos fundamentados em LPA. Dessa forma, esta pesquisa de natureza tecnológica (Jung, 2004) apresenta procedimentos experimentais, com protótipo, simulação e modelagem em laboratório com possibilidades de controlar as variáveis que podem intervir no experimento.

1.2.1 Lógica Paraconsistente Anotada – LPA

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).

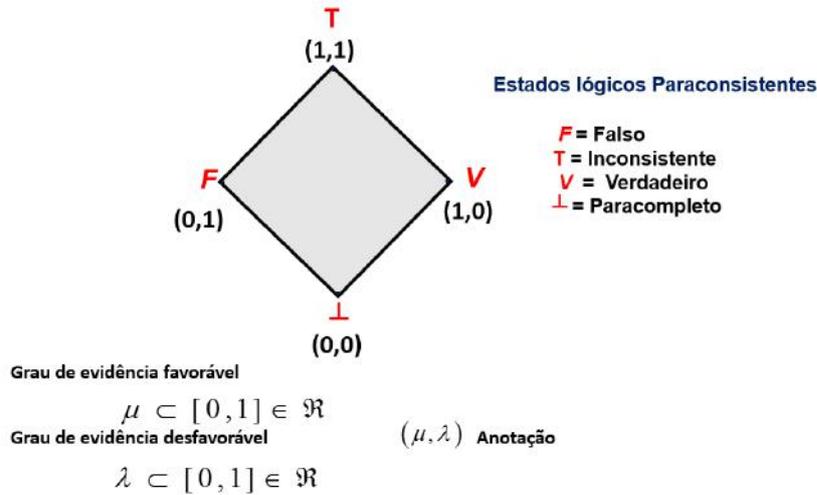
1.2.2 Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de Dois Valores (LPA2v)

Neste trabalho será utilizada a LPA que traz como anotação dois sinais de evidência representados por valores normalizados sendo esta denominada Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores – LPA2v (Filho, Lambert-Torres, & Abe, 2010).

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 2. 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.

Figura 2: Reticulado finito de Hasse associado à LPA2v com estados lógicos paraconsistentes representados em seus vértices.



Fonte: Filho, Lambert-Torres, & Abe (2010).

Portanto, na LPA2v é inicialmente estabelecida uma proposição P cuja anotação, que lhe atribui conotação lógica, é composta por dois graus de evidência compondo um sinal de informação paraconsistente. Dessa forma o sinal de informação paraconsistente corresponde a uma proposição acompanhada por dois valores de evidência denominados: grau de crença (evidência favorável - μ_1) e grau de descrença (evidência desfavorável - μ_2). A partir da análise no reticulado associado da LPA2v se obtém o equacionamento que utiliza os graus de evidências que compõem a anotação para que sejam determinados o grau de Certeza (G_c), através da Equação 6 e o grau de Contradição (G_{ct}), através da Equação 7, ambos expostos nos seus eixos horizontal e vertical, respectivamente (Corrêa, et al., 2022).

$$G_c = \mu_1 - \mu_2 \tag{6}$$

$$G_{ct} = (\mu_1 + \mu_2) - 1 \tag{7}$$

Sendo que: $0 \leq \mu_1 \leq 1$ $0 \leq \mu_2 \leq 1$

Os valores de G_c e G_{ct} , obtidos pelas equações (6) e (7), quando representados nos eixos do Reticulado criam o estado lógico paraconsistente $\epsilon_\tau(G_c, G_{ct})$. Verifica-se que para infinitos valores do grau de certeza (G_c) no eixo das abcissas e do grau de contradição (G_{ct}) no eixo das ordenadas, são compostos infinitos estados lógicos paraconsistentes (ϵ_τ) atribuídos a proposição P que está em análise no reticulado (Filho, Lambert-Torres, & Abe, 2010). As conclusões poderão ser formadas a partir da proximidade do estado lógico paraconsistente ϵ_τ com um dos quatro estados lógicos extremos situados nos vértices do Reticulado.

Os parâmetros que sustentam as conclusões podem ser equacionados através de um valor denominado de grau de Certeza real (G_{cr}) que tem por finalidade otimizar o tratamento das incertezas. Para uma análise paraconsistente mais aprofundada, considera-se no Reticulado associado à LPA2v, uma certa distância D , calculada por (Coelho, et al., 2019):

$$D = \sqrt{(1 - |G_c|)^2 + (G_{ct})^2} \tag{8}$$

Dessa forma, pode-se calcular o valor de G_{cr} pelas condicionais:

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

$$G_{cr} = 1 - \sqrt{(1 - |G_c|)^2 + (G_{ct})^2} \tag{9}$$

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

$$Gcr = \sqrt{(1 - |Gc|)^2 + (Gct)^2} - 1 \quad (10)$$

O grau de certeza real (Gcr) fornece valores que trabalham com uma faixa de trabalho entre -1 e +1, portanto pode-se fazer sua normalização obtendo-se assim o grau de Evidencia Resultante Real - μ_{ER} com valores nos intervalos entre 0 e 1, tal que:

$$\mu_{ER} = \frac{Gcr+1}{2} \quad (11)$$

Da mesma forma, pode-se fazer normalização do grau de Contradição obtido da equação 2, por :

$$\mu_{ctr} = \frac{Gct+1}{2} \quad (12)$$

Com o grau de certeza real- Gcr e o grau de Evidencia Resultante Real - μ_{ER} obtido na equação (11) é possível estabelecer o algoritmo de tratamento de incertezas que traz como informação adicional o grau de contradição normalizado (12). Estes dois valores extraídos das equações da PAL2v permitem que possa ser obtido um algoritmo para análise e tomada de decisão denominado Nó de análise Paraconsistente – NAP. O NAP será o algoritmo utilizado na configuração da Estação de Razão Paraconsistente formando uma Rede de Análise Paraconsistente - RAP (Filho, Lambert-Torres, & Abe, 2010)

O algoritmo NAP em seu modelo descritivo (Da Silva Filho, et al., 2021). é apresentado a seguir:

1.2.3 Algoritmo NAP – Nó de Análise Paraconsistente com saídas μ_{ER} e μ_{ctr}

1. Apresente os dois valores normalizados provenientes das fontes de informação: μ_1 e μ_2

2. Calcule o grau de evidência desfavorável: $\lambda_1 = 1 - \mu_2$.

3. Calcule o grau de certeza: $G_C = \mu_1 - \lambda_1$.

4. Calcule o grau de contradição: $G_{ct} = (\mu_1 + \lambda_1) - 1$

5. Calcule a distância D: $D = \sqrt{(1 - |G_C|)^2 + G_{ct}^2}$

6. Considere a restrição:

Se $D > 1$, então faça $S_1 = 0,5 \rightarrow$ Considerar *indefinição na saída!*

Se não, vá para o próximo item.

7. Determine o Grau de Certeza real:

Se $G_C > 0$, Calcule: $G_{CR} = (1 - D)$

Se $G_C < 0$, Calcule: $G_{CR} = (D - 1)$

8. Calcule o Grau de Evidência resultante: $\mu_{ER} = \frac{G_{CR} + 1}{2}$

9. Calcule o Grau de Contradição normalizado resultante: $\mu_{ctr} = \frac{G_{ct} + 1}{2}$

10. Apresente os resultados nas saídas S_1 e S_2 :

Faça $S_1 = \mu_{ER}$ e $S_2 = \mu_{ctr}$

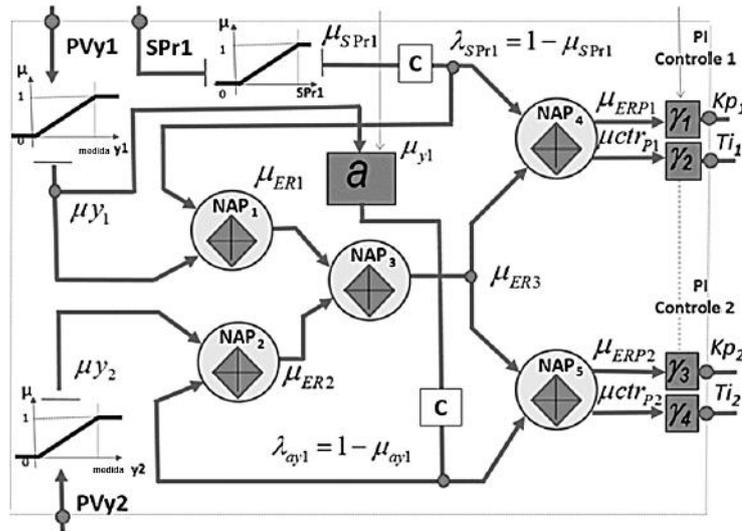
10. Fim.

Os resultados obtidos nas equações indicam que o NAP pode ser utilizado como gerador de Graus de evidencia (figura 2) μ_{ER} para outras proposições, portanto como sinais de entradas de analises por outros NAPs, formando assim uma rede de NAPs interligados (Filho, Lambert-Torres, & Abe, 2010) (Garcia, et al., 2019).

2. Material e Métodos

Inicialmente foi efetuado um estudo para comparar o controle de razão da Estação de Mistura convencional, mostrada na figura 1 (d), e elaborar uma configuração com algoritmos NAPs seguindo as interligações mostradas na figura 1(b). Este estudo preliminar resultou na configuração de NAPs, compondo uma Rede de Análises Paraconsistente (RAPs), conforme mostrada na Figura 3. O funcionamento da estrutura de algoritmos NAPs que compõem a Estação de Razão Paraconsistente é descrito a seguir.

Figura 3: Estrutura de algoritmos NAPs formando a Rede de Análise Paraconsistente RAP da Estação de Razão Paraconsistente.



Fonte: Autores.

Pode se observar que na figura 3 o diagrama da configuração da Rede de algoritmos paraconsistentes que compõem a estação de controle adaptativa de razão microcontrolado, sendo estruturada por tomadas de decisão provenientes de 5 NAPs. Cada NAP possui um algoritmo LPA2v que poderá ser compreendido seu funcionamento lógico, a seguir.

2.1 Funcionamento da RAP da Estação de Razão Paraconsistente

Considerando a estrutura algorítmica da RAP da figura 3, verifica-se inicialmente que no algoritmo denominado NAP1 constam 2 sinais de informação: PVy1 – que será considerado como sinal favorável originado do Transmissor de vazão externo e o λ_{SPR1} – que será considerado como sinal desfavorável originado do valor do *Set Point* portanto, ajustado pelo especialista. O segundo algoritmo NAP2 recebe o sinal de informação do PVy2 – que é considerado como sinal favorável originado dos FIT-101 (Transmissor de Vazão 101) e pelo sinal PVy1 multiplicado pelo valor do fator de razão a ajustado pelo especialista. O resultado é complementado no processo, tornando-se o sinal λ_{ay1} , portanto ajustado ao sinal de grau de evidência desfavorável do algoritmo NAP2.

O NAP3 recebe os sinais de evidência real μ_{ER1} e μ_{ER2} e faz uma análise comparativa entre ambos, sendo que o sinal μ_{ER1} é a informação entre o ponto de ajuste e a variável do processo de *loop* do controlador *master* e o μ_{ER2} é a informação do fluxo que será controlado no processo pelo controlador escravo é proveniente do NAP2. O resultado comparativo através dos NAPs entre estes sinais serve de referência para os graus de evidência real nas entradas dos NAP4 e NAP5, sendo que os seus graus desfavoráveis de evidencia estão relacionados ao ponto de ajuste do *Set Point* complementado sobre o NAP4 e o fluxo de y_1 multiplicado pelo fator de razão a complementado λ_{ay1} sobre o NAP5.

Verifica-se que os algoritmos NAP4 e NAP5 são os responsáveis da finalização da análise da rede paraconsistente montada para este processo. Dessa forma a RAP funciona considerando as informações sobre as incertezas nos fluxos y_1 e y_2 e as variações que venham a ocorrer no *Set Point*.

Os resultados de saídas dos NAPs irão gerar sinais dos graus de evidência resultante (μ_{ER}) para atuar diretamente nos ganhos proporcionais de saída (K_{p1} e K_{p2}) e de graus de contradição normalizados (μ_{ctr}) para atuar nos tempos interativos (T_{i1} e T_{i2}) dos controladores. Portanto, com a configuração da Estação de Razão Paraconsistente da Figura 3, as equações (4) e (5) de ações de controle que atuam nos Controladores ficam modificadas, conforme as equações (13) e (14), mostradas a seguir:

$$u_1(t) = \gamma_1 \mu_{ERP1}(t) K_{p1} \left(r_1(t) - y_1(t) + \frac{1}{\gamma_2 \mu_{ctr_{P1}}(t) T_{i1}} \int_0^t (r_1(\tau) - y_1(\tau)) d\tau \right) \quad (13)$$

$$u_2(t) = \gamma_3 \mu_{ERP2}(t) K_{p2} \left(r_2(t) - y_2(t) + \frac{1}{\gamma_4 \mu_{ctr_{P2}}(t) T_{i2}} \int_0^t (r_2(\tau) - y_2(\tau)) d\tau \right) \quad (14)$$

Onde:

$\mu_{ERP1}(t)$ é o Grau de Evidência resultante do NAP na saída da Estação de Razão Paraconsistente que direciona os sinais para o ganho proporcional (K_{p1}) do Controlador PI (FY-101) que atua no processo P1.

$\mu_{ctr_{P1}}(t)$ é o grau normalizado de contradição resultante do NAP da saída da Estação de Razão Paraconsistente que direciona os sinais para o tempo integrativo do Controlador PI (T_{i1}) do Controlador PI (FY-101) que atua no processo P1.

$\mu_{ERP2}(t)$ é o Grau de Evidência resultante do NAP na saída da Estação de Razão Paraconsistente que direciona os sinais para o ganho proporcional (K_{p2}) do Controlador PI (FY-102) que atua no processo P2.

$\mu_{ctr_{P2}}(t)$ é o grau normalizado de contradição resultante do NAP da saída da Estação de Razão Paraconsistente que direciona os sinais para o tempo integrativo do Controlador PI (T_{i2}) do Controlador PI (FY-102) que atua no processo P2.

2.2 Calculo dos Parâmetros da RAP

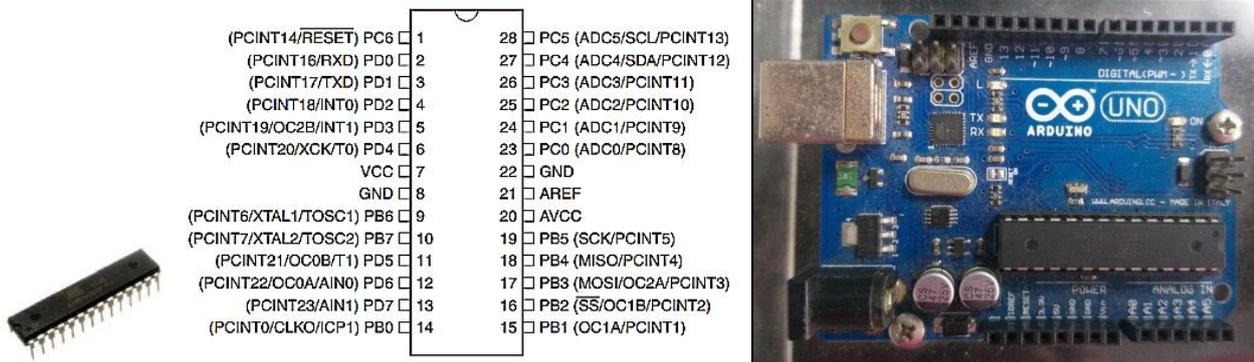
Para a obtenção dos parâmetros γ das equações (13) e (14) foram feitos cálculos através das equações do NAP, considerando suas interligações, na Rede de análise Paraconsistente mostrada na figura 3.

2.3 Hardware da Estação de Razão Paraconsistente

Após as simulações iniciais em computador foi desenvolvida a programação com o *software* da RAP implementado no microcontrolador Atmel328P para atuar como o componente principal na composição física da Estação de Razão Paraconsistente de controle de mistura. Na construção do *hardware* foram utilizados potenciômetros para os ajustes de *Set Point*, fator multiplicador de razão (a) e instalados os terminais para os sinais (K_{p1} e K_{p2}) dos ganhos proporcionais de saída e para os tempos interativos (T_{i1} e T_{i2}). Na Placa da Estação de Razão Paraconsistente foi também montado um display LCD 16x2 (colunas, linhas) para visualizar em tempo real os ajustes e demais sinais resultantes do controle de mistura.

A Figura 4 mostra a Estação de Razão Paraconsistente montada em *Hardware* nos sistemas microcontrolado.

Figura 4: Hardware da Estação de Razão Paraconsistente com o chip ATmega328P e placa construída.



Fonte: ATmega328P [Datasheet] 7810D-AVR-01/15.

Nas análises para o desenvolvimento do diagrama (figura 3) foram obtidos valores de sintonia através de testes realizados no Controle de Fluxo do Piloto da Planta Industrial verificado assim o comportamento das estruturas computacionais e a parte eletrônica microcontrolada desenvolvida na placa da Estação de Razão Paraconsistente.

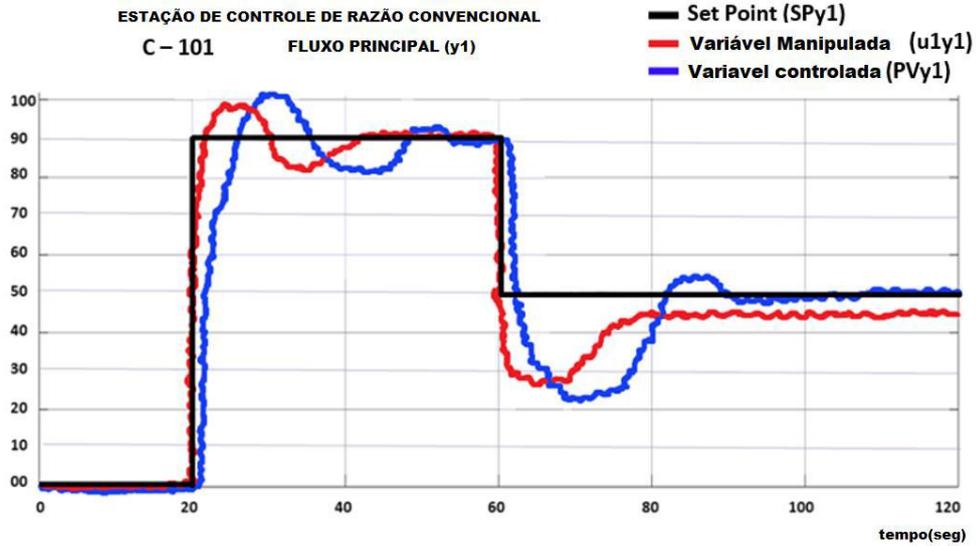
3. Resultados e Discussão

Os testes da Estação de Razão Paraconsistente foram feitos em uma planta experimental atuando no controle de dois líquidos que se misturavam em um tanque de produto final. Nesta planta experimental foram efetuados vários testes e medições do comportamento das variáveis quando se fazia mudanças no valor do set point e nas variáveis de realimentação.

Neste artigo mostra-se dois resultados relevantes que demonstram a eficiência da Estação de Razão Paraconsistente, onde foram feitas as variações de 0% a 90% e de 90% a 50% nos valores do ponto de ajuste (set point) em diferentes etapas.

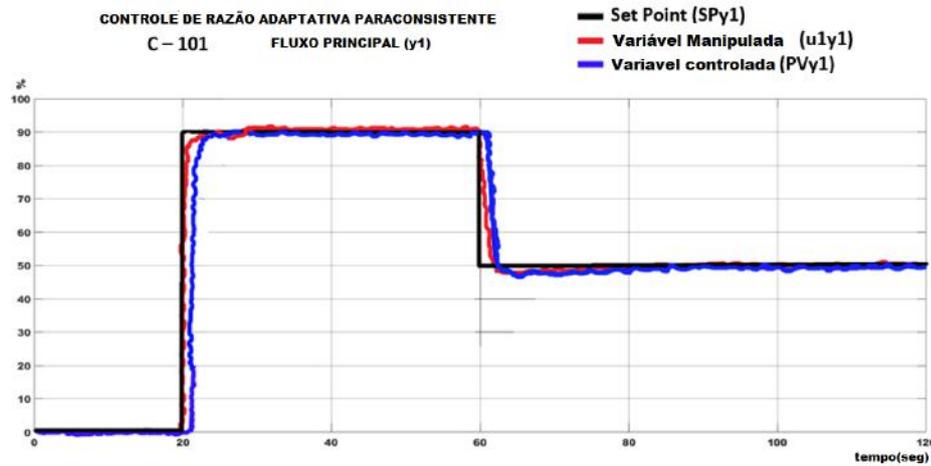
Para cada etapa de variação do *Set Point*, foram observados graficamente o comportamento das respostas dos fluxos (y_1 e y_2) – que são sinais considerados como graus de evidência desfavoráveis e também as variáveis manipuladas (u_1 e u_2) que são os sinais considerados como graus de evidência favoráveis. Ainda no desempenho da Estação de Razão construída, foram observados nos testes as variações nos valores dos graus de evidência e os graus normalizados de contradição que atuam nos ganhos proporcionais (K_p) e tempos integrativos (T_i) dos controladores FY-101 e FY-102 da Planta Piloto de Processo Industrial utilizados. Portanto, para as comparações, na figura 5 estão expostos os gráficos resultantes obtidos do comportamento das variáveis de controle utilizando a estação de razão convencional com variação no valor do *Set Point* de 0% a 90% e finalizando com a variação de 90% a 50%. E na figura 6 estão expostos os gráficos resultantes obtidos do comportamento das variáveis de controle utilizando a estação de razão paraconsistente com variação no valor do *Set Point* de 0% a 90% e finalizando com a variação de 90% a 50%.

Figura 5: Gráficos dos resultados obtidos do comportamento das variáveis de controle utilizando a estação de razão convencional com variação no valor do *Set Point* de 0% a 90% e finalizando com a variação de 90% a 50%.



Fonte: Autores.

Figura 6: Gráficos dos resultados obtidos do comportamento das variáveis de controle utilizando a Estação de Razão Paraconsistente com variação no valor do *Set Point* de 0% a 90% e finalizando com a variação de 90% a 50%.



Fonte: Autores.

Pode-se observar através dos gráficos das figuras 5 e 6 que quando ocorrem as variações do *Set point*, o problema de desconexão de valores entre os dois processos P1-principal – Mestre e P2-controlado-Escravo aparece de forma muito mais agressiva na aplicação da Estação Razão convencional quando comparado ao comportamento das mesmas variáveis na aplicação da Estação de Razão Paraconsistente.

Para comparar os valores dos fluxos 1 e 2 e obter o erro relativo em cada estação de Razão, foi considerado o mesmo fator multiplicativo da razão ($a = 0,5$) e como referência, o mesmo instante de início da variação do *set point* foi considerado. Em relação ao controle Razão Convencional, Estação de Razão Paraconsistente apresentou menores valores de *overshooting* e *undershooting*. Considerando estas condições, pode-se observar nos gráficos da figura 5 que a variável controlada na estação convencional apresentou um tempo de 52 segundos para entrar em equilíbrio com um *overshooting* de 10% e 8% de

undershooting na Vazão P1. E conforme é visto na figura 6 o controle de Razão Paraconsistente teve um tempo de 12 segundos para controlar os dois fluxos com um *overshooting* de 1% e *undershooting* de 0% no fluxo P1.

4. Conclusões

Na área industrial, o controle das malhas dos processos, por meio de ações corretivas, é essencial para que a produção mantenha os níveis de qualidade exigidos pelo mercado. Na automação o controle de proporção é um tipo especial que permite a construção de processos industriais onde, por exemplo, dois produtos são misturados proporcionalmente para produzir um terceiro produto dentro das condições de projeto otimizadas. Para isto, o controle de fluxo utiliza dois controladores com ações PI-Proporcional Integral atuando nos dois processos P1 e P2, onde o controle principal - Mestre (C1) atua sobre o controle secundário - escravo (C2) mantendo os produtos dentro da proporcionalidade desejada. De acordo com a literatura, o maior problema em sistemas que utilizam controle de razão são as dissimilaridades que acontecem com a proporção dos valores dos fluxos na ocorrência das variações do *Set point* e de perturbações inesperadas nas variáveis de saída. Com o objetivo de propor novas técnicas para amenizar este problema, foi desenvolvido nesta pesquisa uma estrutura computacional que utiliza redes de análise construídas com algoritmos baseados em Lógica Paraconsistente e implementada em plataforma de sistemas microcontrolados. Os resultados do protótipo construído em microcontrolador, denominado de Estação de Razão Paraconsistente, foi comparado a uma Estação de Razão convencional e apresentou bons resultados no controle da malha do sistema de controle de mistura, apresentando a qualidade de atuar diretamente nos ganhos proporcionais (K_p s) e nos tempos de integração (T_i s) dos dois controladores de malha. Portanto, de forma geral, o método paraconsistente aplicado na Estação de Razão mostrou-se mais eficiente que o método convencional e permitiu detectar mudanças ocorridas no *set point* e nos fluxos, ajustando rapidamente as diferenças com boa uniformidade entre os dois processos. Essa pesquisa contribui, portanto, para que novas configurações sejam investigadas utilizando os algoritmos da Lógica Paraconsistente como uma melhor alternativa em controle de mistura de processos industriais, no desenvolvimento de novas implementações de controles com microprocessadores mais potentes como RaspberryPI interagindo com modernas linguagens de programação C++ e Python.

Referências

- Abe, J. M., Akama, S., Nakamatsu, K., & Filho, J. I. (2018). Some Aspects on Complementarity and Heterodoxy in Non-Classical Logics. *Procedia Computer Science*, 126, 1253-1260. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.08.068>
- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2005). *Advanced PID Control* ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- Coelho, M. S., Filho, J. I., Côrtes, H. M., Junior, A. d., Blos, M. F., Mario, M. C., & Rocco, A. (2019). Hybrid PI controller constructed with paraconsistent annotated logic. *Control Engineering Practice*, 84, 112-124. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.11.007>
- Corrêa, M. P., Machado, A. C., Filho, J. I., Garcia, D. V., Mario, M. C., & Sedano, C. T. (2022). Paraconsistent annotated logic applied to industry assets condition monitoring and failure prevention based on vibration signatures. *Research Society and Development*, 11(1). doi:<https://doi.org/10.33448/rsd-v11i1.25104>
- COSTA, N. d., & ABE, J. (1991). Remarks on annotated logic. *Zeitschrift für mathematische Logik und Grundlagen der Mathematik*, 37, 561-570.
- Da Silva Filho, J., Abe, J., Marreiro, A., Martinez, A., Torres, C., Rocco, A., & Blos, M. (2021). Paraconsistent Annotated Logic Algorithms Applied in Management and Control of Communication Network Routes. *21*(12). doi:<https://doi.org/10.3390/s21124219>
- Filho, J. D., Lambert-Torres, G., & Abe, J. M. (2010). *Uncertainty treatment using paraconsisten logic introducing paraconsistent artificial neural networks*. Ios Pr Inc .
- Filho, J. I. (1999). *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.
- Filho, J. I., Abe, J. M., & Lambert, G. T. (2008). *Inteligencia Neural com as Redes de Análises Paraconsistentes*. LTC.
- Garcia, D. V., Filho, J. I., Junior, L. S., Pacheco, M. T., Abe, J. M., Junior, A. C., & Mario, M. C. (2019). Analysis of Raman spectroscopy data with algorithms based on paraconsistent logic for characterization of skin cancer lesions. *Vibrational Spectroscopy*, 103(1), 10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2019.102929>

- Hägglund, T. (2001). The future of PID control. *Control Engineering Practice*, 1163-1175. doi:[https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(01\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(01)00062-4)
- Hägglund, T. (2017). The Tracking Ratio Station. *Control Engineering Practice*, 69, 122-130. Fonte: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2017.09.016>
- Hägglund., T. (2001). The Blend Station - A new ratio control structure. *Control Engineering Practice*, pp. 1215-1220. doi:<https://doi.org/10.1016/S0967-0661>
- Jung, C. F. (2004). Metodologia para Pesquisa & Desenvolvimento: aplicada a novas tecnologias, produtos e processos. *Axcel Books do Brasil*.
- Mario, M. C., Garcia, D. V., Filho, J. I., Júnior, L. S., & Barbuy, H. S. (2021). Characterization and classification of numerical data patterns using Annotated Paraconsistent Logic and the effect of contradiction. *Research, Society and Development*, 10(13). doi:<https://doi.org/10.33448/rsd-v10i13.20830>
- Marlin, T. E. (2000). *Process Control: Designing processes and control systems for dynamic performance* (2ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Ogata, K. (2014). *Modern control engineering* (5ª ed.). Prentice Hall Inc.
- OU, L., YU, L., & Zang, W. (2007). A ratio control scheme decoupling disturbance response from set-point response ISA Transactions. 46(3). doi:<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2006.11.002>
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da Pesquisa Científica*. Santa Maria: Ed.UAB/NTE/UFSM.
- Severino, A. J. (2018). *Metodologia do trabalho científico*. São Paulo: Cortez Editora.
- Shinskey, F. G. (1996). *Process Control Systems: Application, Design, and Tuning* (4th ed.). New York: McGraw-Hill Professional.
- SUBRAHMANIAN, V. (1987). On the semantics of quantitative logic programs. (pp. 173-182). Washington: IEEE.
- Visioli., A. (2005). Design and tuning of ratio controller. *Control Engineering Practice*, 13(4), pp. 485-497. Fonte: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2004.04.010>