ISSN:2594-6153

Controle PID Paraconsistente para Fusão de Sensores Redundantes em Sistemas de Segunda Ordem

Paulino Machado Gomes

[1]Unisanta - Universidade Santa Cecília - Rua Oswaldo Cruz, 266- Santos-SP, Brasil

[2]FATEF - Faculdade de Tecnologia de São Vicente - Av. Presidente Wilson, 1013, Itararé, São Vicente, Brasil

[3]SENAI - "Antonio Souza Noschese" Av. Senador Feijo, 421 - Vila Matias - Santos-SP, Brasil e-mail: Email: paulino.machado.g@gmail.com

Resumo: Este trabalho apresenta um controlador PID Paraconsistente baseado na LPA2v para tratamento de informações contraditórias em sistemas com sensores redundantes. O método utiliza graus de evidência para ajustar a ação de controle por meio de um fator de confiança. Simulações em uma planta de segunda ordem, sob diferentes níveis de contradição e falhas de sensores, foram avaliadas pelos índices IAE, ISE, ITAE, tempo de acomodação e sobressinal. Os resultados demonstraram estabilidade e robustez frente a informações inconsistentes, evidenciando potencial para aplicações industriais tolerantes a falhas.

Palavras-chave: Lógica Paraconsistente; Controle PID; Tolerância a Falhas; Sensores Redundantes; Indústria 4.0.

Paraconsistent PID Control for Redundant Sensor Fusion in Second-Order Systems

Abstract: This paper presents a Paraconsistent PID controller based on Two-Valued Annotated Paraconsistent Logic (LPA2v) for handling contradictory information in systems with redundant sensors. The method employs evidence degrees to adjust the control action through a confidence factor. Simulations on a second-order plant under different contradiction levels and sensor fault conditions were evaluated using IAE, ISE, ITAE, settling time, and overshoot metrics. Results demonstrated stability and robustness under inconsistent information, indicating potential applications in fault-tolerant industrial systems.

Keywords: Paraconsistent Logic; PID Control; Fault Tolerance; Redundant Sensors; Industry 4.0.

Introdução

Os controladores PID permanecem amplamente empregados na indústria devido à sua simplicidade e robustez [1-3]. Com a Indústria 4.0, a confiabilidade das informações de sensores tornou-se essencial, especialmente em sistemas com sensores redundantes sujeitos a falhas e divergências [8]. Nesse contexto, a LPA2v [5-7] permite tratar informações contraditórias por meio dos graus de evidência favorável e desfavorável, aumentando a robustez dos sistemas de controle.

Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPA$_2$v)

A LPA$_2$v representa informações por meio dos graus de evidência favorável (μ) e desfavorável (λ), permitindo quantificar certeza e contradição sem interromper o processo inferencial. Essa característica a torna adequada para sistemas de controle com sensores redundantes sujeitos a falhas e inconsistências.

$$\lambda = 1 - \mu 2 \quad (1)$$
$$G_C = \mu 1 - \lambda \quad (2)$$
$$G_{CT} = \mu 1 + \lambda - 1 \quad (3)$$
$$\mu_E \frac{G_C+1}{2} \Rightarrow \mu_E \frac{\mu-\lambda+1}{2} \quad (4)$$
$$\mu_{CTR} \frac{\mu+\lambda}{2} \quad (5)$$
$$D = \sqrt{(1-|G_C|)^2 + G_{CT}{}^2} \quad (6)$$
$$\text{Se } G_C > 0$$
$$G_C > 0 \rightarrow G_{CR} = 1 - D; \quad G_C < 0 \rightarrow G_{CR} = D - 1; \quad (7)$$
$$\emptyset = 1 - |G_{CT}| \quad (8)$$
$$\mu_{ER} = \frac{G_{CR}+1}{2} \quad (9)$$
$$\varphi_E = 1 - |2 * \mu_{CTR} - 1| \quad (10)$$

Figura 1. Equações da LPA2v.;
Fonte: Da Costa, Abe e Silva Filho [5-7]

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e avaliar um controlador PID Paraconsistente, fundamentado na Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores, aplicado a sistemas dinâmicos de segunda ordem, investigando seu desempenho sob diferentes níveis de contradição entre sensores redundantes, e comparando seus resultados com aqueles obtidos por um controlador PID clássico.

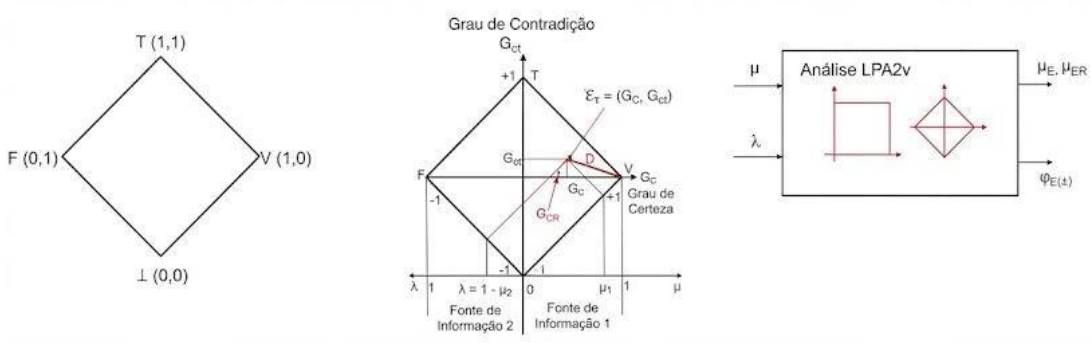


Figura 2. Reticulado de Hasse e Representação Gráfica da LPA$_2$v
Fonte: Da Costa, Abe e Silva Filho [5-7]

Objetivos

Desenvolver e avaliar um controlador PID Paraconsistente baseado na LPA2v para fusão de sensores redundantes em sistemas de segunda ordem, comparando seu desempenho ao de um controlador PID clássico sob diferentes condições de inconsistência dos dados.

Material e Métodos

Planta Controlada

Foi considerada uma planta linear de segunda ordem representada pela função de transferência:

$$G(s) = \frac{1}{s^2+10s+20} \quad (1)$$

Arquitetura de Sensores Redundantes

O sistema utiliza dois sensores redundantes para medir a saída da planta. Divergências causadas por ruídos, falhas ou degradação podem gerar informações conflitantes, tratadas por meio da Análise Paraconsistente baseada na LPA2v.

Análise Paraconsistente

O modelo paraconsistente utiliza dois sensores redundantes, responsáveis pela geração dos graus de evidência favorável **(μ)** e desfavorável **(λ)**:

$$\mu = \frac{|S_1|+|S_2|}{2} \quad (2)$$

$$\lambda = | S_1 - S_2 | \quad (3)$$

A partir desses valores são calculados:

$$G_c = \mu - \lambda \quad (4)$$

$$G_{ct} = \mu + \lambda - 1 \quad (5)$$

$$F_c = 1 - | G_{ct} | \quad (6)$$

onde Gc representa o grau de certeza, Gct o grau de contradição e Fc o fator de confiança paraconsistente.

O Grau de Certeza representa a confiabilidade associada à informação recebida, enquanto o Grau de Contradição quantifica o conflito entre as evidências obtidas dos sensores redundantes. Quando a contradição aumenta, o fator de confiança reduz automaticamente a intensidade da ação de controle, evitando que decisões sejam tomadas com base em informações potencialmente incorretas.

Controlador PID Paraconsistente

A lei de controle proposta é definida por:

$$\boldsymbol{u(t) = F_c(t)\,[K_p\,G_c(t) + K_i \int G_c\,(t)\,dt + K_d\,\frac{dG_c(t)}{dt}]} \quad (7)$$

Ambiente Computacional

As simulações computacionais e o ambiente de desenvolvimento, foram estruturados com as seguintes ferramentas e métodos detalhados:

- **Linguagem:** Python 3.x;
- **Biblioteca Numérica:** NumPy;
- **Biblioteca Científica:** SciPy;
- **Rotina de Integração:** solve_ivp;
- **Método Numérico:** Método RK45 (Runge-Kutta de ordem 4/5).

Foram analisados quatro cenários operacionais:

1. Sensores consistentes;
2. Contradição moderada;
3. Contradição elevada;
4. Falha parcial de sensor redundante.

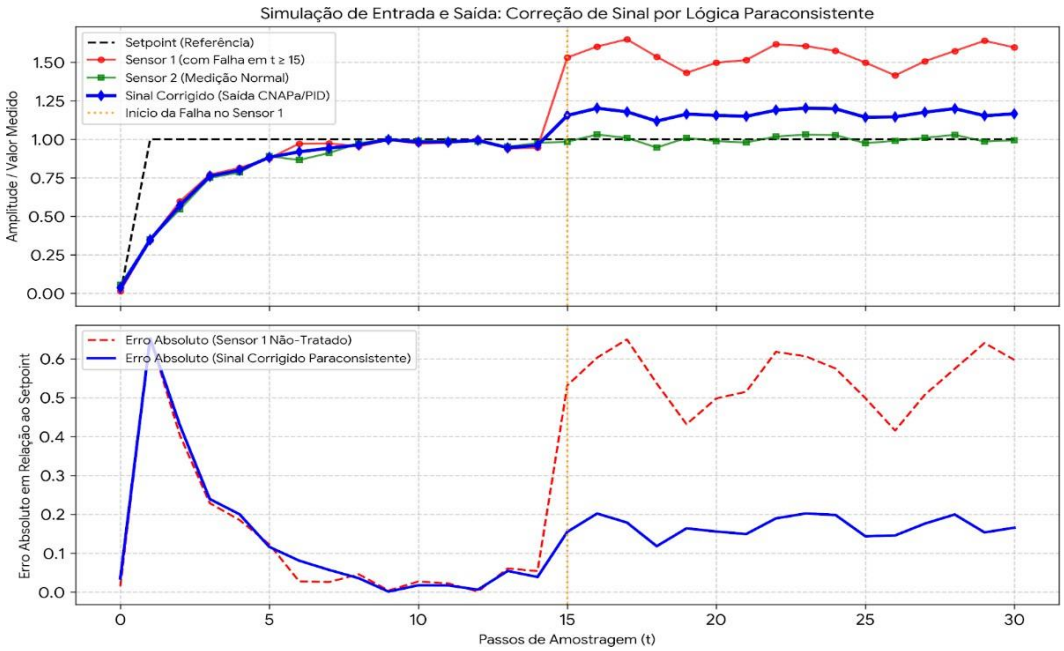


Figura 3. Simulação da fusão de sensores redundantes

Os parâmetros utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de Configuração da Simulação

Parâmetro	Valor
Planta	$1 / (s^2 + 10s + 20)$
Tempo de simulação	20 s
Referência	Degrau unitário
Kp	18
Ki	12
Kd	2
Método Integrador	RK45 (solve_ivp)

O desempenho foi avaliado por meio dos índices:

- **IAE** (Integral Absolute Error);
- **ISE** (Integral Squared Error);
- **ITAE** (Integral Time Absolute Error);
- **Tempo de acomodação** (Ts);
- **Sobressinal** (OS).

Os índices de desempenho foram obtidos por simulações computacionais realizadas sob as mesmas condições de sintonia e configuração da planta, permitindo a comparação direta entre os diferentes cenários de contradição e falha.

Resultados

Os resultados obtidos para o controlador proposto são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Desempenho do PID Paraconsistente

Cenário	OS (%)	Ts (s)	IAE	ISE	ITAE
Consistente	0,00	1,42	1,250	0,412	2,150
Contradição Moderada	0,00	1,85	1,640	0,530	3,020
Contradição Elevada	0,00	2,40	2,180	0,710	4,450
Falha Parcial	0,25	2,95	2,850	0,940	6,100

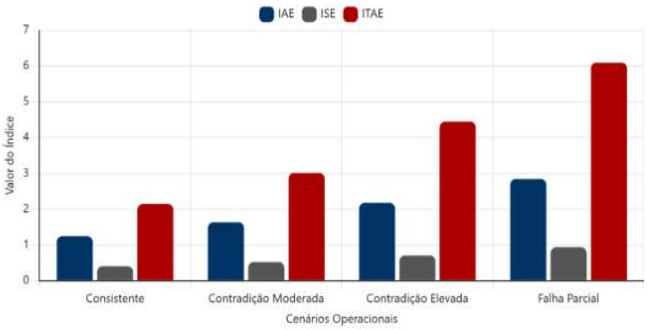


Figura 4. Comparação temporal das respostas do controlador PID Paraconsistente

Os ganhos do controlador foram obtidos por sintonia empírica visando minimizar o sobressinal e o tempo de acomodação. A comparação com o controlador PID clássico é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Comparação entre Controladores

Métrica	PID Clássico	PID Paraconsistente
Ts (s)	1,20	1,42
IAE	1,10	1,25
ISE	0,38	0,41
ITAE	1,90	2,15

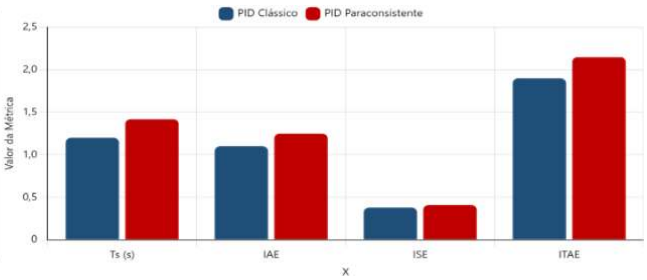


Figura 5. Comparação entre PID clássico e PID Paraconsistente.

Discussão

Os resultados mostram que a lógica paraconsistente aumenta a robustez do controlador frente a informações contraditórias, mantendo estabilidade mesmo com falhas de sensores. Embora o PID clássico apresente melhor desempenho em condições ideais, a abordagem proposta mostrou potencial para aplicações tolerantes a falhas na Indústria 4.0. Como trabalhos futuros, recomendam-se validação experimental e comparação com técnicas avançadas de controle.

Conclusões

O controlador PID Paraconsistente baseado na LPA_2v apresentou operação estável e maior robustez a falhas e informações contraditórias, mostrando potencial para aplicações em sistemas tolerantes a falhas e na Indústria 4.0. Trabalhos futuros incluem validação experimental e comparação com técnicas avançadas de controle.

Referências

1. Åström KJ, Hägglund T. Advanced PID Control. ISA; 2006.
2. Ogata K. Engenharia de Controle Moderno. 5.ed. Pearson; 2010.
3. Franklin GF, Powell JD, Emami-Naeini A. Feedback Control of Dynamic Systems. 7th ed. Pearson; 2015.
4. Khalil HK. Nonlinear Systems. 3rd ed. Prentice Hall; 2002.
5. Da Costa NCA. O Conhecimento Científico. EDUSP; 1997.

6. Abe JM. Fundamentos da Lógica Paraconsistente. UNESP; 2008.
7. Silva Filho JI. Sistemas Inteligentes Aplicados com Lógica Paraconsistente. Érica; 2012.
8. Lee J, Bagheri B, Kao HA. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters. 2015;3:18-23.
9. Dorf RC, Bishop RH. Sistemas de Controle Moderno. LTC; 2013.
10. Silva Filho JI, Abe JM, Souza CRE. Hybrid PI controller constructed with paraconsistent annotated logic. Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2014;73(1):251-264.