

Comparativo entre um PID e um bloco funcional desenvolvido com base na Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de dois Valores - LPA2v, aplicado a um sistema de controle de temperatura utilizando um controlador programável

Comparison between a PID and a functional block developed based on Annotated Paraconsistent Logic with Annotation of two Values - LPA2v, applied to a temperature control system using a programmable controller

DOI:10.34117/bjdv8n7-354

Recebimento dos originais: 23/05/2022

Aceitação para publicação: 30/06/2022

Cláudio Luís Magalhães Fernandes

Doutorando

Instituição: Universidade Santa Cecília (Unisanta)

Endereço: R. Osvaldo Cruz, 277, Boqueirão, Santos - SP, CEP: 11045-907

E-mail: claudio.lmf@unisanta.br

Joseffe Barroso de Oliveira

Doutorando

Instituição: Universidade Santa Cecília (Unisanta)

Endereço: R. Osvaldo Cruz, 277, Boqueirão, Santos - SP, CEP: 11045-907

E-mail: joseffe@gmail.com

Davi Silvestre Moreira dos Reis

Doutorando

Instituição: Universidade Santa Cecília (Unisanta)

Endereço: R. Osvaldo Cruz, 277, Boqueirão, Santos - SP, CEP: 11045-907

E-mail: davismdosreis@yahoo.com.br

Maurício Conceição Mario

Doutor

Instituição: Universidade Santa Cecília (Unisanta)

Endereço: R. Osvaldo Cruz, 277, Boqueirão, Santos - SP, CEP: 11045-907

E-mail: cmario@unisanta.br

João Inácio da Silva Filho

Doutor

Instituição: Universidade Santa Cecília (Unisanta)

Endereço: R. Osvaldo Cruz, 277, Boqueirão, Santos - SP, CEP: 11045-907

E-mail: inacio@unisanta.br

RESUMO

Neste artigo são apresentados os resultados da aplicação da Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPA2v) em um controle de temperatura em malha fechada através de um Controlador Programável seguindo a Norma IEC 61131, que em

seu item 7 preconiza o estudo de lógicas não-clássicas aplicadas a sistemas de controle, utilizando para tal os conceitos de modularidade e de reuso de código. A LPA2v é uma lógica não clássica que apresenta como principal propriedade a capacidade de tratar contradições. Quando interpretada em seu Reticulado Associado pode-se deduzir equações dos fundamentos da LPA2v, das quais são originados algoritmos para tratamento de sinais contraditórios. Seguindo as premissas da norma, foi utilizada a linguagem Texto Estruturado para a criação de um bloco funcional denominado de BF_Paracon, bloco esse baseado em um Algoritmo da LPA2v denominado de Para-Analisador. Essa implantação permite que todas as propriedades da lógica sejam utilizadas por um Controlador Programável em um controle de processos contínuos ou de manufatura contemplando as regras da Norma IEC 61131. Utilizado como elemento principal de controle, o bloco BF_Paracon foi implementado em um estudo comportamental da malha controlada pelo algoritmo da LPA2v comparado à um controle convencional PID apresentando as afinidades entre os dois tipos. O bloco apresenta o ajuste discreto da potência térmica fornecida a um forno por uma resistência de aquecimento a partir da seleção da intensidade de potência entre doze níveis possíveis. A temperatura varia em um ciclo de limitação típico de controles de malha fechada não lineares discretos na resposta de referência ao degrau. A relevância nos resultados desta pesquisa se destaca na implementação inédita do Algoritmo Para-Analisador através de um Controlador programável a partir da criação do bloco (BF_Paracon) que engloba características de uma lógica não-clássica, onde é demonstrado que a sua modularidade facilita a implementação de sistemas de controle de automação baseados em fundamentos da Lógica Paraconsistente, bem como permite a união de blocos que atuam em conjunto com lógicas clássicas e sistemas baseados em outras linguagens pertencentes a Norma (Ladder).

Palavras-chave: lógica paraconsistente, controlador programável, algoritmo paraconsistente, norma 61131, malhas de controle.

ABSTRACT

This paper presents the results of the application of the Annotated Paraconsistent Logic with two-valued annotation (APL2v) in a closed loop temperature control through a Programmable Controller following the IEC 61131 Standard, which in its item 7 recommends the study of non-classical logics applied to control systems, using for such the concepts of modularity and code reuse. LPA2v is a non-classical logic that presents as its main property the ability to handle contradictions. When interpreted in its Associated Reticule it is possible to deduce equations from LPA2v's fundamentals, from which algorithms for the treatment of contradictory signals are originated. Following the premises of the standard, the Structured Text language was used to create a functional block called BF_Paracon, based on an LPA2v algorithm called Para-Analyzer. This implementation allows all the properties of the logic to be used by a Programmable Controller in a continuous or manufacturing process control contemplating the rules of the IEC 61131 Standard. Used as the main control element, the BF_Paracon block was implemented in a behavioral study of the loop controlled by the LPA2v algorithm compared to a conventional PID control presenting the affinities between the two types. The block presents the discrete adjustment of the thermal power supplied to a furnace by a heating element by selecting the power intensity from twelve possible levels. The temperature varies in a limiting cycle typical of discrete nonlinear closed loop controls in the reference step response. The relevance in the results of this research stands out in the unprecedented implementation of the Par-Analyzer Algorithm through a programmable

controller from the creation of the block (BF_Paracon) that encompasses characteristics of a non-classical logic, where it is demonstrated that its modularity facilitates the implementation of automation control systems based on fundamentals of the Paraconsistent Logic, as well as allows the union of blocks that act in conjunction with classical logics and systems based on other languages belonging to the Standard (Ladder).

Keywords: paraconsistent logic, programmable controller, paraconsistent algorithm, standard 61131, control loops.

1 INTRODUÇÃO

A evolução nos meios produtivos está atrelada a inovações tecnológicas, sejam elas a simples utilização de equipamentos mais modernos, ou até mesmo o emprego de novas técnicas de produção (Guimarães, 2005). Dentro desta ação de inovação tecnológica iniciou-se em meados do século passado uma crescente utilização de computadores para atuar nos processos de automação e controle das máquinas de produção, com o objetivo de otimizar os processos e dar maior flexibilidade à produção industrial.

Para isso conta com adventos como o Controlador Programável (CP), que consiste em um equipamento dedicado a efetuar o controle de sistemas de manufatura e de processos industriais contínuos. O CP evolui constantemente desde a sua criação e de acordo com esta evolução, a lógica não clássica ganha espaço em diversos modelos de controladores, com o objetivo de atender de forma mais eficiente a automação de processos industriais. Um tipo de lógica não clássica é a Paraconsistente, esta, por sua vez, trata as regiões não atingidas pela lógica clássica, como valores intermediários entre verdadeiro e falso, possibilitando um melhor tratamento de indefinições, ambiguidades e inconsistências.

A Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de Dois Valores (LPA2v) ainda possui uma baixa utilização em controladores programáveis e, portanto, o seu estudo em aplicações de processos industriais é consideravelmente limitado. Desta forma o algoritmo fundamentado na LPA2v apresenta se como possibilidade de expansão de seu estudo em aplicações de controle de processos industriais e até mesmo para atender o item 7 da norma IEC 61131, que trata de lógicas não clássicas como a *Fuzzy* (Kaufmann & Gupta, 1985).

Esse trabalho consiste na utilização dos algoritmos da LPA2v aplicados a um controlador lógico programável, através da construção de um bloco denominado

BF_Paracon que foi desenvolvido, correspondendo a uma sub-rotina incluída em um programa principal denominado PLC_PRG. Nesta aplicação, este programa seleciona o ajuste discreto entre os doze valores de potência térmica a serem fornecidos a um forno através de uma resistência de aquecimento, tendo como base o controle da variável de processo (PV) existente a partir de um set point (SP) desejado. A temperatura varia em um ciclo de limitação típico de controles de malha fechada não lineares discretos na resposta de referência ao degrau. Como forma de validação serão ainda comparados os resultados do BF_PARACON com um controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID) típico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A NORMA IEC 61131

A norma IEC 61131 foi elaborada pela *International Electrotechnical Commission* com o objetivo de padronizar diversos aspectos relacionados aos Controladores Programáveis (CP), assim como aplicar modernas técnicas e linguagens de programação para o desenvolvimento de software para estes sistemas (Torres et al, 2001).

O item três (3) da norma trata da estrutura do software, execução do programa e principalmente da padronização de utilização dos cinco (5) tipos de linguagens de programação. Estes tipos são: Sequenciamento Gráfico de Funções (SFC), Lista de Instruções (IL), Diagrama *Ladder* (LD), Diagrama de Blocos (FBD) e Texto Estruturado (ST) (Casado Lima, 2003). Como é visto em Guimarães (2005), a Norma preconiza a estruturação destas formas de programação, facilitando a modularização e a reutilização de código

Este conceito implica na criação de blocos funcionais e funções padrões as quais possibilitam a criação de novas estruturas baseadas nas existentes, que por sua vez acrescentam a característica de recursividade e o desenvolvimento de bibliotecas pelo próprio programador.

Verifica-se que a norma em seu item sete (7) leva também em consideração as imprecisões e incertezas que ocorrem em um processo industrial bem como as suas implicações na teoria de controle moderno. Para essa finalidade é aberto um campo de pesquisa voltada às lógicas não-clássicas, em especial a Programação utilizando Lógica Nebulosa (*Fuzzy*).

Dessa forma abre-se uma possibilidade de considerar as condições implícitas no

referido item sete (7) para outros tipos de lógicas não-clássicas diferentes da Fuzzy, tais como, a Lógica Paraconsistente (PL) conforme será visto a seguir (Bottura Filho, 2007).

2.2 LÓGICA PARACONSISTENTE ANOTADA COM ANOTAÇÃO DE 2 VALORES LPA2V

As Lógicas Paraconsistentes nasceram da necessidade de se encontrar meios de dar tratamento adequado às situações contraditórias. De forma simplificada pode-se considerar que a Lógica Paraconsistente tem a finalidade de ser aplicada em casos onde a Lógica Clássica, que só trabalha com condições verdadeiras ou falsas, não pode ser empregada. Em situações como, por exemplo, em sistemas de controle aplicados à automação, aparece a necessidade do emprego de uma lógica não-clássica que por apresentar fundamentações não ligadas as rígidas leis binárias da Lógica Clássica poderá dar origem a análises mais eficientes com aproximações de sinais contraditórios que retratam a realidade.

A Lógica Paraconsistente Anotada de Anotação com dois valores (LPA2v) utiliza uma anotação composta por dois sinais de informação, ou seja, cada proposição utiliza dois valores de graus de evidência denominados: grau de crença (evidência favorável - μ_1) e grau de descrença (evidência desfavorável - μ_2).

O Reticulado associado à LPA2v (Da Silva Filho, 2012) permite que, através dos valores dos Graus de Evidência que compõem a anotação e originados de agentes de informação distintos, sejam determinados Graus de Certeza G_c e de Contradição G_{ct} . O método interpretativo resulta em um Reticulado associado à LPA2v construído com valores de G_c e G_{ct} calculados pelas equações:

$$G_{ct} = m_1 + m_2 - 1 \quad (1)$$

$$G_c = m_1 - m_2 \quad (2)$$

Sendo:

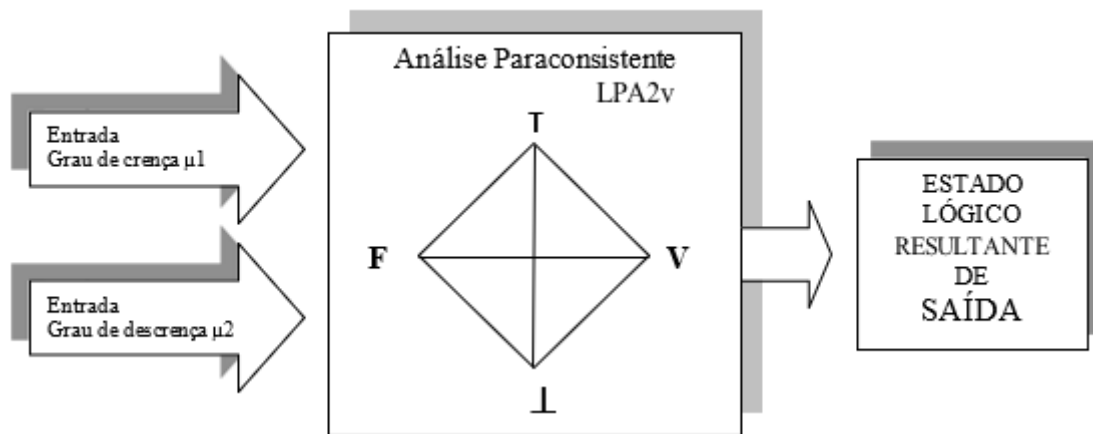
$$0 \leq m_1 \leq 1$$

$$0 \leq m_2 \leq 1$$

Verifica-se pelas equações que G_c , valores no eixo das abcissas e G_{ct} , valores no eixo das ordenadas são dependentes dos Graus de Evidência que compõem a anotação e

relacionados a infinitos estados lógicos paraconsistentes atribuídos à proposição P que estão contidos nas regiões internas do reticulado (Da Silva Filho, 2010). Na figura 1 é apresentado o diagrama:

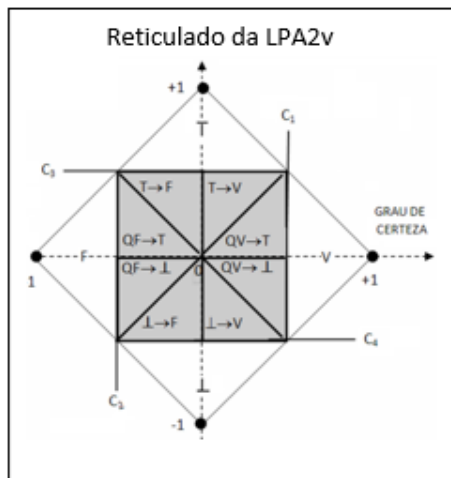
Figura 1. Representação da análise Paraconsistente LPA2v Fonte: Da Silva Filho & Abe, 2001, p 35



2.3 O ALGORITMO PARA-ANALISADOR

Através das limitações superiores e inferiores dos graus de certeza e contradição pode-se delimitar o reticulado da LPA2v dividindo-o em 12 estados lógicos resultantes. Dessa forma, a partir das regiões delimitadas do reticulado podem-se relacionar os estados lógicos paraconsistentes resultantes obtidos pelas interpolações dos graus de certeza e contradição obtidos pelas equações (1) e (2). Com dois limites externos e arbitrários se podem determinar quando o grau de Certeza resultante é alto o suficiente para que a proposição analisada seja considerada totalmente verdadeira ou totalmente falsa. Também se pode determinar quando o grau de Contradição resultante é alto o suficiente para que a proposição analisada seja considerada totalmente indeterminada ou totalmente inconsistente. A figura 2 mostra as regiões com os símbolos dos estados lógicos paraconsistentes considerados e o Algoritmo da LPA2v.

Figura 2. Reticulado da LPA2v repartido por regiões e o Algoritmo Para-Analisador



```

ALGORITMO PARA-ANALISADOR
*/determinação dos estados lógicos extremos */
Se  $G_c \geq C_1$  então  $S_1 = V$ 
Se  $G_c \leq C_2$  então  $S_1 = F$ 
Se  $G_{ct} \geq C_3$  então  $S_1 = T$ 
Se  $G_{ct} \leq C_4$  então  $S_1 = \perp$ 
*/determinação dos estados lógicos não-extremos*/
Para  $0 \leq G_c < C_1$  e  $0 \leq G_{ct} < C_3$ 
  se  $G_c \geq G_{ct}$  então  $S_1 = Qv \rightarrow T$ 
  se  $G_c < G_{ct}$  então  $S_1 = T \rightarrow v$ 
Para  $0 \leq G_c < C_1$  e  $C_4 < G_{ct} \leq 0$ 
  se  $G_c \geq |G_{ct}|$  então  $S_1 = Qv \rightarrow \perp$ 
  se  $G_c < |G_{ct}|$  então  $S_1 = \perp \rightarrow v$ 
Para  $C_2 < G_c \leq 0$  e  $C_4 < G_{ct} \leq 0$ 
  se  $|G_c| \geq |G_{ct}|$  então  $S_1 = Qf \rightarrow \perp$ 
  se  $|G_c| < |G_{ct}|$  então  $S_1 = \perp \rightarrow f$ 
Para  $C_2 < G_c \leq 0$  e  $0 \leq G_{ct} < C_3$ 
  se  $|G_c| \geq G_{ct}$  então  $S_1 = Qf \rightarrow T$ 
  se  $|G_c| < G_{ct}$  então  $S_1 = T \rightarrow f$ 
 $G_{ct} = S_{2a}$   $G_c = S_{2b}$ 
  
```

Os estados Lógicos Extremos são representados pelas regiões que ocupam os vértices do reticulado: Verdadeiro, Falso, Indeterminado e Inconsistente. As regiões internas no reticulado são os estados lógicos de saída, denominados de estados Lógicos Não-Extremos, nomeados conforme a proximidade com os estados Lógicos Extremos e determinados conforme a adequação ao projeto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 BLOCO FUNCIONAL (BF_PARACON)

Conforme visto em Da Silva Filho, 1999, e em Lima Jr 2003, o algoritmo Para-Analisador tem sido aplicado com êxito em *hardware* e *software* de sistemas de controle de robôs móveis autônomos e em controle de processos contínuos de temperatura. No entanto, verifica-se que todos os desenvolvimentos são dedicados, nos quais os sistemas de controle construídos não apresentam modularidade e nem condições para reutilização de código.

O bloco funcional BF_Paracon foi concebido a partir do algoritmo proveniente da LPA2V, sendo implementado uma função em linguagem de Texto Estruturado. Desta forma, este bloco, possibilita sua inserção para os devidos testes em uma linguagem de programação *Ladder*, ou seja, foi criado um módulo (ou biblioteca) para ser utilizado em tempo de execução.

O bloco funcional (BF_Paracon) engloba características de uma lógica não-

clássica e pode ser demonstrado que a sua modularidade facilita a implementação de sistemas de controle de automação baseados em fundamentos da Lógica Paraconsistente. Além disso, a modularidade deste Bloco Funcional permite a união de blocos que atuam em conjunto com lógicas clássicas e em sistemas baseados em outras linguagens pertencentes a Norma.

3.1.1 Criação de Blocos Funcionais segundo a IEC 61131-3

A programação do Bloco Funcional BF_Paracon atende as diretrizes da norma, o que facilita a reutilização de código. Para isso utiliza-se o processo de criação de blocos de programação denominados de “Unidades de Organização de Programas” (POUs). Em grande parte dos softwares de CPs são utilizadas três tipos de POU:

- Funções;
- Blocos funcionais;
- Programas.

Estas POU são basicamente as formas de implementação de programas no CP, através da associação de variáveis e instruções, podendo uma POU ser parte integrante de outra POU. Segundo a norma IEC 61131-3 deve ser estabelecida uma hierarquia entre as POU seguindo os seguintes princípios:

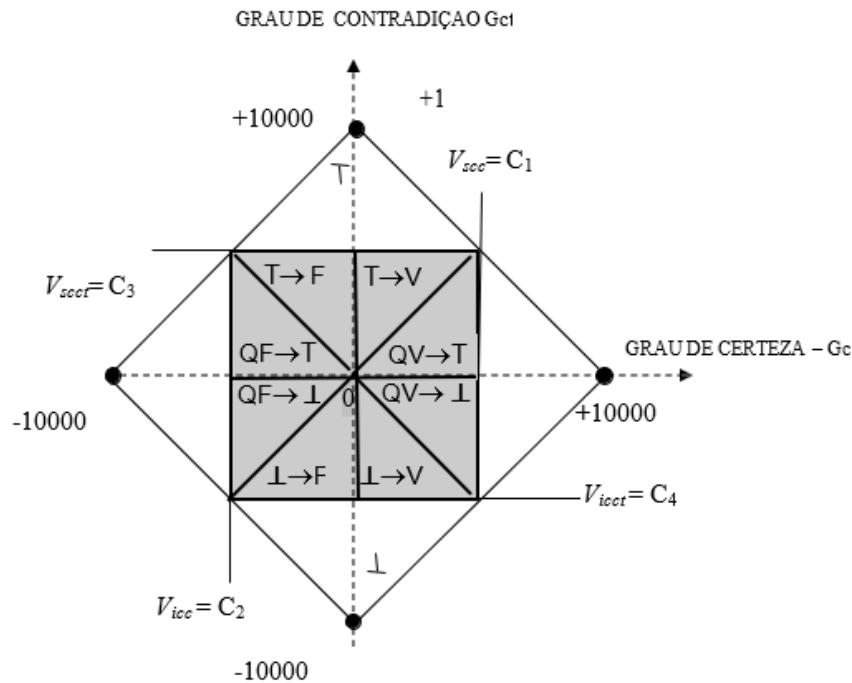
- Funções somente podem conter Funções;
- Blocos Funcionais podem conter outros Blocos Funcionais e Funções;
- Programas podem conter qualquer tipo de POU.

O conceito aplicado à linguagem de Blocos Funcionais, é baseado no item da norma que se refere à reutilização de código e modularidade.

3.1.2 Programação do Bloco Funcional BF_Paracon

A programação da Função PARACON é baseada no algoritmo Para- Analisador da LPA2V. Levando em consideração que a implementação do algoritmo original possui uma variação no intervalo de -1 e +1, os valores de engenharia envolvidos no processo para os cálculos dos Graus de Certeza e Graus de Contradição podem ser adequados no algoritmo. Como exemplo de adequação é apresentado na figura 3 um intervalo de -10000 e +10000 representados através de valores inteiros.

Figura 3. Reticulado da LPA2v repartido em 12 estados lógicos com a adequação dos valores de Grau de Certeza e de Contradição.



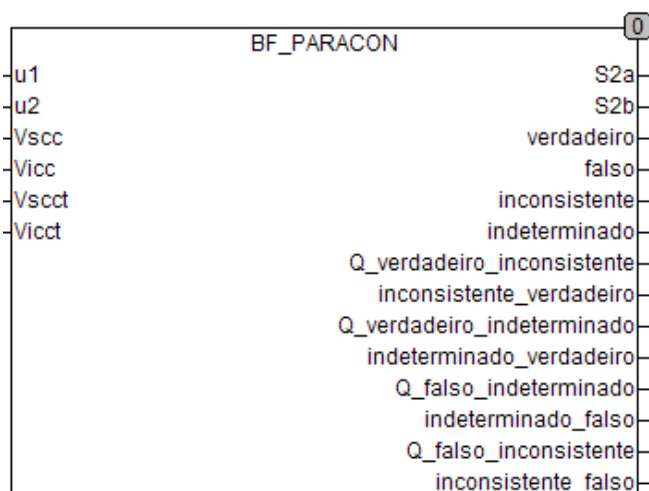
Apesar dos *softwares* de CP apresentarem a possibilidade de trabalhar com números reais, testes realizados demonstram que sucessivas conversões em um número de casas decimais definidos ocasionam um acúmulo de erros na leitura que podem influenciar de modo significativo na tomada de decisão do Bloco Funcional.

A programação do algoritmo Para-Analisador foi desenvolvida na linguagem Texto Estruturado sendo inicializada a partir da criação da Função PARACON. Essa função efetua a coleta dos índices inferiores e superiores limítrofes que terão seus valores recebidos a partir da criação do Bloco Funcional. Seguindo a lógica do algoritmo, são efetuados os cálculos matemáticos para a determinação dos graus de certeza e contradição que são utilizados na determinação dos estados extremos e não-extremos.

A partir da Função PARACON, é possível a criação do bloco BF_Paraccon acrescentando-se uma nova POU na linguagem FBD (Bloco Funcional) e a respectiva importação da função. Todo o bloco funcional, como já descrito, possui suas entradas situadas à esquerda do bloco e suas saídas localizadas a direita.

Na figura 4, é possível visualizar o bloco completo, seguindo a norma IEC 61131 em seus itens 3 e 7 e, que pode ser aplicado na automação de plantas industriais que trabalhem com Processos Contínuos ou em Batelada.

Figura 4. Bloco Funcional BF_Paraco



3.2 APLICAÇÃO DO BLOCO BF_PARACON EM UM PROCESSO DE AUTOMAÇÃO PARA CONTROLE PARACONSISTENTE DE TEMPERATURA

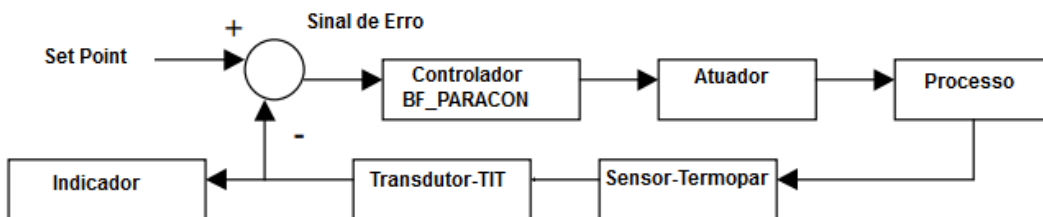
Neste item é apresentado uma aplicação da Lógica Paraconsistente, na forma de seu algoritmo Para-Analisador programado no Bloco BF_Paraco, em um projeto de malha fechada para controle de temperatura.

A planta de temperatura utilizada possui às características de um sistema de controle em malha fechada. Neste tipo de sistema, toda tomada de decisão e, conseqüentemente a ação de controle, dependem diretamente de um sinal monitorado por um elemento sensor na planta do processo.

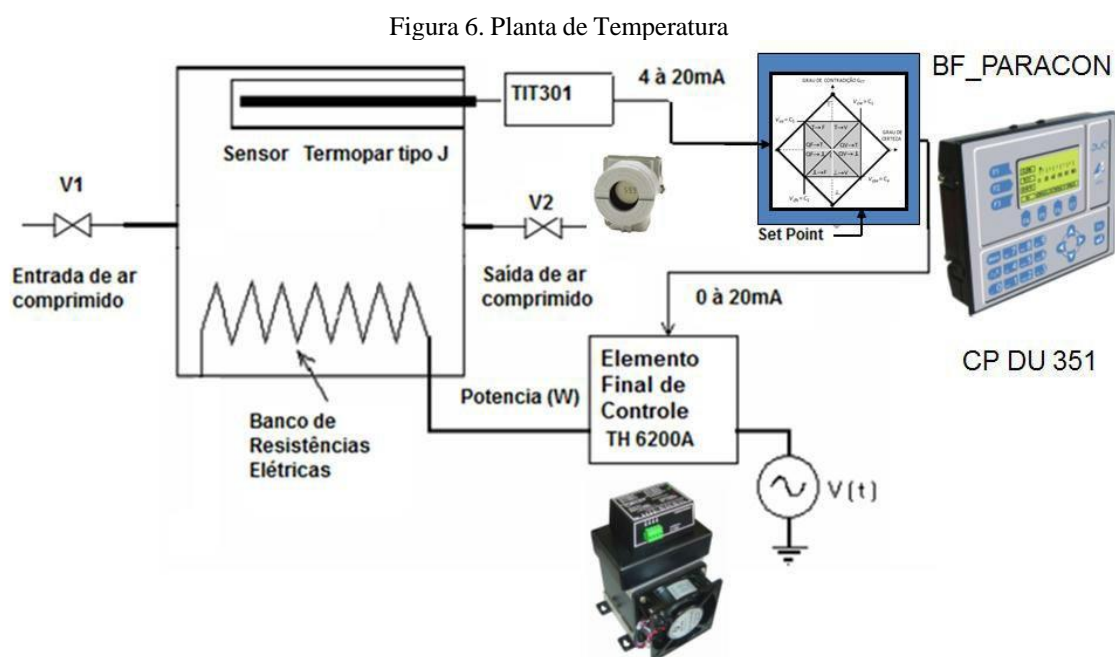
O sinal proveniente da diferença entre o sinal de saída e um sinal de referência, também conhecido no meio industrial como *Set Point* (SP) é denominado como sinal de erro (OGATA, K 1990).

Na figura 5 é apresentado o diagrama de blocos da planta de temperatura utilizada como teste na aplicação de controle do Bloco Funcional BF_Paraco.

Figura 5. Diagrama de blocos da planta de temperatura utilizada na aplicação do bloco BF_Paraco



Para verificação de funcionamento e testes de aplicação do bloco BF_Paracon foi montada uma planta piloto de controle de temperatura aplicada em um tanque de ar comprimido que faz parte de um processo de secamento de ar em um sistema pneumático. Portanto, o controle da variável de processo (VP) será realizado no tanque onde estão inseridas as resistências elétricas, componentes do banco controlado pelo elemento final da malha. A figura 6 apresenta um diagrama em blocos resumido da planta de controle de temperatura na qual está sendo feita a aplicação do bloco BF_Paracon.



Com a planta de temperatura baseada no controle em malha fechada, o CP DU351 é o elemento de controle do sistema. Este controle é efetuado pelo Bloco Funcional BF_Paracon construído segundo os padrões estabelecidos pela norma 61131-3 e, que teve sua construção baseada no algoritmo Para-Analisador pertencente a lógica não-clássica denominada de Lógica Paraconsistente Anotada com Anotação de dois Valores (LPA2V).

3.2.1 Sistema de Controle com o Bloco Funcional (BF_Paracon)

O bloco BF_Paracon inserido no programa efetua a análise dos sinais de entrada, fornecendo em sua saída um valor também em número inteiro dentro do mesmo range, ou seja, de 0 a 10000. Nesta análise, o algoritmo Para-Analisador presente no BF_Paracon, traduz a análise paraconsistente através das informações

recebidas na forma de grau de evidência favorável (crença) e evidência desfavorável (descrença), resultando nos valores de grau de certeza (Gc) e contradição (Gct), pelos quais o Controlador seleciona como saída um dos estados lógicos entre os 12 do reticulado.

Com este estado encontrado, é necessária definir a atuação do CP DU351 no elemento final de controle e, para isso, foi seguida uma tabela em porcentagem de potência que o Conversor TH 6200A deve entregar ao banco de resistências elétricas utilizados no experimento.

A tabela 11 foi construída tomando como procedimento base a condição de que; quanto mais o estado se aproxima do “Verdadeiro” no QUPC, menor será a potência entregue a carga. Portanto, como forma de exemplificação, a condição verdadeira (V) entrega a carga um valor de manutenção de 5% e a condição falsa (F) por sua vez, deve fornecer a carga um valor de 95% de potência máxima. Este valor entregue a carga é devido a diferença de temperatura identificada entre a Referência (SP), representada como Grau de Evidência desfavorável, e a Variável de Processo (VP), representada como Grau de Evidência favorável.

A partir dos valores de potência entregue ao banco de resistências, são gerados os valores correspondentes em números inteiros, que, por sua vez são entregues a saída analógica do CP DU351, como pode ser visto na tabela 1.

Tabela 1. Relação entre a Área do Reticulado, a Potência entregue ao banco de resistências e o número inteiro entregue pelo bloco a saída analógica do CP DU351

Verdadeiro	5%	500
Quase verdadeiro tendendo a Inconsistente	22%	2200
Quase verdadeiro tendendo a Indeterminado	22%	2200
Inconsistente tendendo a Verdadeiro	45%	4500
Indeterminado tendendo a Verdadeiro	45%	4500
Inconsistente tendendo a Falso	75%	7500
Indeterminado tendendo a Falso	75%	7500
Quase Falso tendendo a Inconsistente	90%	9000
Quase Falso tendendo a Indeterminado	90%	9000
Falso	95%	9500
Inconsistente	50%	5000
Indeterminado	50%	5000

A saída analógica escolhida, tal qual o procedimento efetuado para configuração de sua entrada, teve o tipo de canal definido como 0 a 20mA e o seu fundo de escala com o valor de 10000. Após a configuração realizada, o próprio software se encarrega de realizar a conversão para a faixa de saída de 0 a 20mA.

4 RESULTADOS

Como forma de exemplificação e apresentação dos procedimentos no tratamento de sinais com a Lógica Paraconsistente são apresentados dois exemplos numéricos do controle efetuado pelo bloco BF_Paracon, conforme pode ser observado a seguir.

Condições:

- O sinal μ_1 esta entregando ao BF_Paracon o sinal coletado pela entrada analógica junto a Variável de Processo (VP).
- O valor μ_2 se refere ao “*Set Point*” (SP - valor desejado pelo processo).

Exemplo 1: $\mu_1 = 10000$; $\mu_2 = 2000$;

Da equação (1) determina-se o Grau de Contradição:

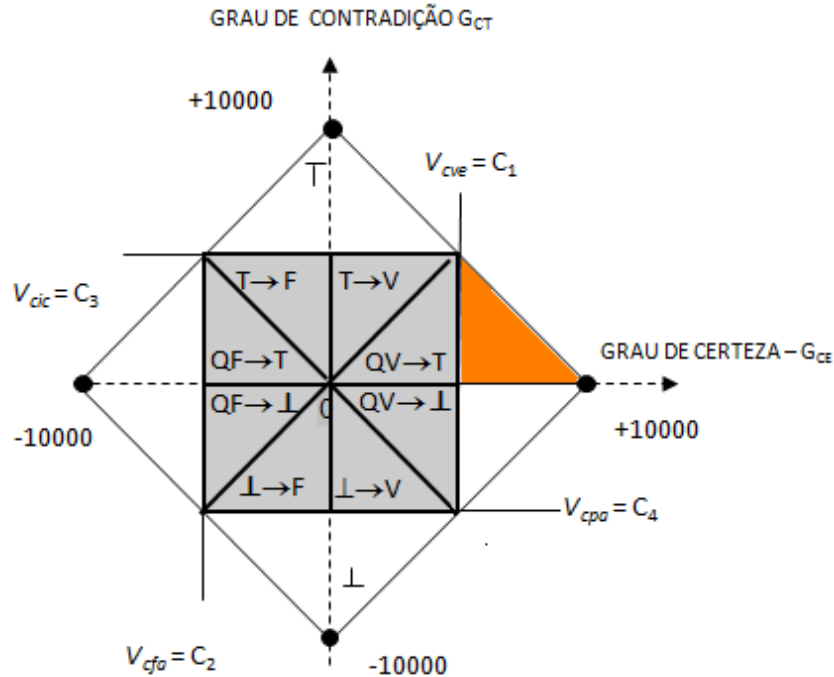
$$\begin{aligned}Gct &= (\mu_1 + \mu_2) - 10000 \\Gct &= (10000 + 2000) - 10000 \\Gct &= 2000\end{aligned}$$

Da equação (2) determina-se o Grau de Certeza: $Gc = \mu_1 - \mu_2$

$$\begin{aligned}Gc &= 10000 - 2000 \\Gc &= 8000\end{aligned}$$

De acordo com os valores obtidos de Gc e Gct é possível identificar qual a área pertencente ao reticulado da LPA2v corresponde ao estado lógico resultante. Portanto, utilizando os valores numéricos do exemplo o algoritmo interno do bloco BF_Paracon seleciona entre os 12 estados lógicos possíveis o estado “Verdadeiro”, como pode ser verificado na figura 7.

Figura 7. Determinação do estado verdadeiro referente ao Exemplo 1



Analisando o exemplo numérico na malha de controle verifica-se que o bloco BF_Paracon entrega à saída do CP o valor inteiro quinhentos (500) (tabela 12), que será convertido para 1mA, correspondente a 5% da faixa de 0 a 20 mA. Este valor de corrente será recebido pelo Conversor TH 6200A, que aplicará a sua saída uma potência de 170W, o que corresponde a 5% da faixa de 0 a 3400W.

Exemplo 2: $\mu 1= 6000; \mu 2= 2000;$

Da equação (1) determina-se o Grau de Contradição: $G_{ct}=(u_1+u_2) -10000$

$$G_{ct}=(6000+2000) -10000$$

$$G_{ct}= - 2000$$

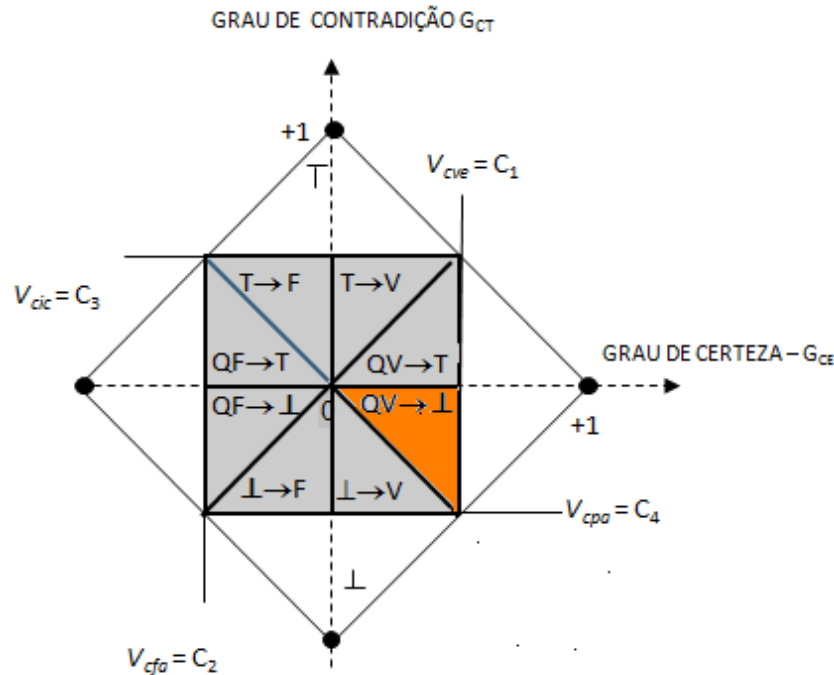
Da equação (2) determina-se o Grau de Certeza: $G_c=u_1-u_2$

$$G_c= 6000 - 2000$$

$$G_c= 4000$$

Através dos valores de G_c e G_{ct} verifica-se que a posição da área do reticulado identificada pelo algoritmo corresponde ao estado lógico “Quase Verdadeiro tendendo a Indeterminado”, como pode ser verificado na figura 8.

Figura 8. Determinação do estado: Quase verdadeiro tendendo a Indeterminado referente ao Exemplo 2



Nestas condições o bloco BF_Paracon entrega à saída do CP o valor inteiro dois mil e duzentos (2200) (tabela 12), que será convertido para 4,4mA, correspondente a 22% da faixa de 0 a 20 mA. Este valor de corrente será recebido

pelo Conversor TH 6200A que aplicará a sua saída uma potência de 748W, também correspondente a 22% da faixa de 0 a 3400W.

Através dos exemplos citados é possível verificar que o sinal proveniente da análise Paraconsistente efetuado pelo bloco BF_Paracon é enviado em forma de número inteiro e posteriormente convertido em uma faixa de 0 a 20mA pela saída analógica do CP DU351.

Este sinal de corrente é entregue ao conversor de potência TH 6200A, que a partir do valor coletado em sua entrada efetua o controle de potência do banco de resistências elétricas instaladas no interior do tanque de ar comprimido através da modificação do ângulo de disparo de seu módulo de tiristores.

Diversos testes foram realizados com a planta da figura 46, onde a ação do Bloco Funcional BF_Paracon inserido no programa principal denominado PLC_PRG, realizou a análise dos sinais recebidos e, entregou de acordo com a tabela 12, uma resposta para a saída analógica do CP DU351. Esta saída foi ligada ao conversor TH 6200A atuando no controle de potência do banco de Resistências Elétricas. A seguir são apresentados os resultados obtidos no experimento.

4.1 COMPARATIVO ENTRE O BLOCO BF_PARACON E O BLOCO PID TÍPICO

Com o objetivo de investigar o comportamento do Bloco Funcional, será demonstrado um estudo comparativo com uma ação de um bloco de controle Proporcional Integral e Derivativo (PID), configurado no mesmo Controlador Programável (ALTUS DU351) e aplicado à mesma planta de controle de temperatura.

Neste estudo foi utilizado o mesmo método apresentado em Barbuy et al (2001) e Barbuy et al (2003), seguindo os seguintes procedimentos baseados nas equações a seguir:

$$vc(t) = Kp[e(t) + \frac{1}{Ti} \int e(t)dt + Td \frac{de(t)}{dt}] \quad (3)$$

Sendo:

Kp é o ganho proporcional;

Ti é o tempo integral

Td é o tempo do derivativo

Sendo:

$$\frac{1}{Ti} = Ki \text{ (ISA)} \quad (4)$$

PID na convenção de Parâmetros Independentes

$$vc(t) = Kp[e(t) + Ki_{ind} \int e(t)dt + Kd_{ind} \frac{de(t)}{dt}] \quad (5)$$

$$Kd_{ind} = Kp * Kd_{isa} \text{ ou } Td_{isa} \quad (6)$$

$$Ki_{ind} = Kp * \frac{1}{Ti} \quad (7)$$

PI – ISA

$$PID \text{ com } Td = Kd = 0 \quad (8)$$

$$vc(t) = Kp[e(t) + Ki \int e(t)dt] \quad (9)$$

Aplicando LAPLACE na equação (7)

$$Vc(s) = Kp[E(s) + Ki \frac{1}{s} + E(s)] \quad (10)$$

$$Vc(s) = Kp * E(s)[1 + \frac{Ki}{s}] \quad (11)$$

$$Vc(s) = Kp * E(s)[\frac{s + Ki}{s}] \quad (12)$$

Considerando:

$s = -ki \Rightarrow$ "Zero" da Função de Transferência

$$Gc(s) = \frac{Vc(s)}{E(s)} = Kp \left(\frac{s + Ki}{s} \right) \quad (13)$$

Adotando:

$$Ki_{isa} = \frac{1}{\tau_{atuador}} = Polo \text{ do atuador} \quad (14)$$

$$G(s)_{atuador} = \frac{Kp}{s\tau + 1} \quad (15)$$

$$G(s)_{atuador} = \frac{\frac{Kp}{\tau}}{s + \frac{1}{\tau}} \Rightarrow \text{sendo } \frac{1}{\tau} \text{ o Polo do atuador} \quad (16)$$

Para encontrar os parâmetros da malha de controle de temperatura inicialmente foram efetuados testes na planta para se determinar o tempo de resposta do sistema, ou seja, sua constante de tempo ($\tau_{atuador}$) cujo valor foi utilizado para cálculo da constante Integral do Bloco PID, com o zero do controlador PI cancelando o polo do atuador.

Na tomada de temperatura, as válvulas V1 e V2 foram fechadas, mantendo o ar no tanque confinado. Em seguida no intuito de se determinar a constante de tempo da planta, foi gerado um degrau na saída do controlador.

A partir da diferença das temperaturas, em que 30°C é reconhecida como a variável de processo, e sendo a temperatura interna do tanque de 40°C denominado valor desejado de Set Point, foi possível se determinar o tempo de resposta (τ) da planta, conforme pode ser verificado na figura 53.

Através de um Span de 10°C - diferença algébrica entre os valores superior e inferior da faixa de operação - o valor de 36,3°C, equivalente a 63,3% da variação deste Span foi alcançado em um tempo de 1 minuto e 21 segundos, em cinco diferentes testes efetuados. Logo: aplicando a equação (14):

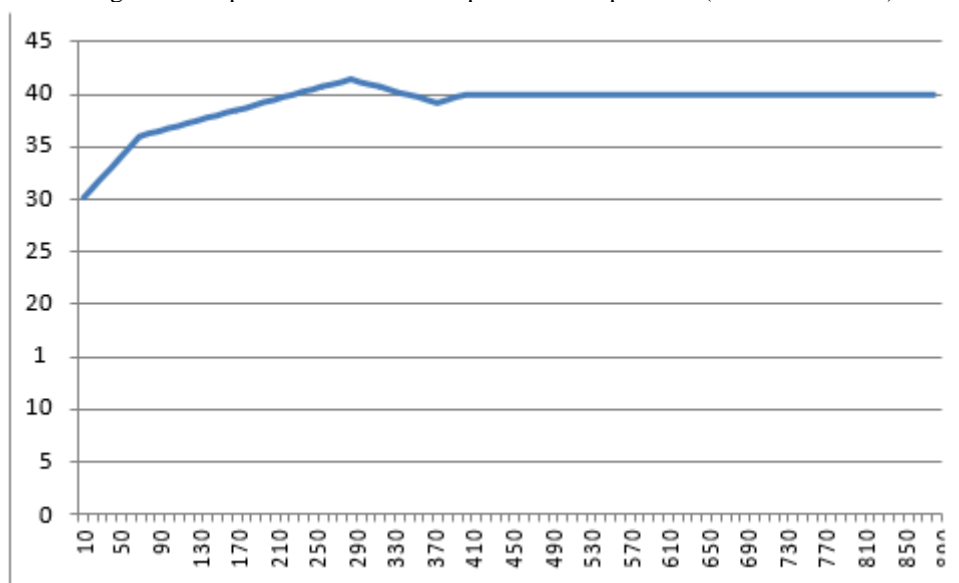
$$K_{i_{isa}} = \frac{1}{\tau_{atuador}} = \frac{1}{81} = 0,012$$

O Bloco BF_Paracon, possui a característica de apresentar saídas discretas, em relação a um procedimento de ação Proporcional e Integral de um bloco PID na mesma malha e em condições idênticas, ou mais próximas possível.

Como as características diferenciadas dos blocos não se permitem uma comparação de precisão de respostas, foi feita neste trabalho uma comparação comportamental frente aos dois tipos de controle do processo.

O gráfico da curva de resposta do Bloco PI do CP DU 351, são apresentados na figura 9. Verifica-se que com o controle PID o sistema se mostrou estável a partir da atribuição dos valores dos ganhos proporcional e integral em todos os cinco (5) testes realizados.

Figura 9. Resposta do bloco PID na planta de temperatura (Set Point = 40°C)



O bloco BF_Paracon por sua vez, trabalha com doze níveis de potência para temperaturas diferentes, tendo em vista os doze estados pertencentes ao reticulado. Este método que utiliza a LPA2v apresenta, portanto um comportamento “Discreto” onde

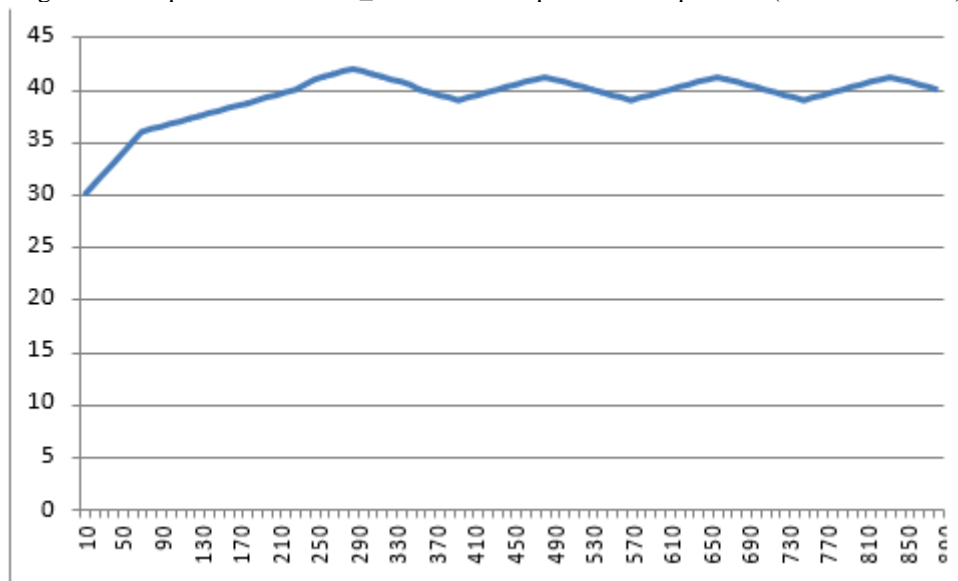
se espera que a temperatura se apresente com uma oscilação em torno do valor de *Set Point* desejado.

Foram efetuados testes onde, a partir de uma temperatura inicial de 30°C, portanto o mesmo valor utilizado como exemplo do PID, o bloco construído a partir da lógica LPA2V, corrigiu o sistema como previsto, como pode ser observado no gráfico da figura 10.

Verifica-se que o gráfico apresenta a saída oscilando em torno dos 40°C, que foi a temperatura definida como *Set Point*.

Da mesma forma como foram efetuados os testes no controlador PID, o teste com o bloco BF_Paracon foi repetido cinco (5) vezes, obtendo-se os mesmos valores referenciais, o que comprova a estabilidade do sistema mesmo nestas condições especiais de controle discreto.

Figura 10. Resposta do bloco BF_PARACON na planta de temperatura (*Set Point* = 40°C)



5 CONCLUSÃO

A pesquisa desenvolvida, além de proporcionar uma ampla visão sobre as inovações na área de Projetos de Automação e Controle utilizando CPs, mostrou que a implementação do bloco funcional BF_Paracon oferece uma resposta satisfatória a norma IEC 61131 em seus itens 3 e 7.

Os resultados obtidos dos estudos comparativos do comportamento da malha de temperatura, frente ao um controle utilizando o método convencional (PID) e a análise paraconsistente (LPA2v), demonstram que o bloco BF_Paracon pode ser aplicado com

sucesso em uma planta de processos contínuos. Pode-se afirmar, portanto que a LPA2v é seguramente uma das lógicas não clássicas que apresenta grande potencialidade de aplicação conjunta com as técnicas usuais de controle aplicadas aos Controladores Programáveis (CPs).

REFERÊNCIAS

ABE, J. M. **Fundamentos da Lógica Anotada**, (Foundations of Annotated Logic) (in Portuguese), Ph. D. Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

ABE, J. M. **Paraconsistent Artificial Neural Networks: an Introduction, Lecture Notes In Artificial Intelligence 3214**, Springer, Eds. J.G. Carbonell & J. Siekmann, ISSN 0302-9743, ISBN 3-540-23206-0, pp. 942-948, 2004.

BARBUY, H. S.; GOLDEMBERG, C. **Regulador De Tensão De Gerador**. Boletim Técnico Da Escola Politécnica Da Usp. Bt/Pea, São Paulo, V. 621, N.Bt/Pea, P. 3121-3133, ISSN 1413-2214, 2001.

BARBUY, H. S.; ROCCO, A. ; FERNANDES, L. A. P.; GOLDEMBERG, C.. **Rectifier Choices For Synchronous Generator Excitation**. Anais Do 7º Congresso Brasileiro De Eletrônica De Potência, Fortaleza/ Ceará/ Brasil, P. 160-166, 2003.

BOTTURA FILHO, J. A. **Um estudo de caso de organização de programas de automação industrial baseada na Norma IEC61131-3**. Monografia de Conclusão de Curso. PUC. São Paulo, 2007.

CARBOGIM, D. V. **Programação em Lógica Anotada: Teoria e Aplicações**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Matemática e Estatística – USP. São Paulo, 1996.

DE CARVALHO, F. R.; BRUNSTEIN, Israel; ABE, J. M. **Um Estudo de Tomada de Decisão Baseado em Lógica Paraconsistente Anotada: Avaliação do Projeto de uma Fábrica**. Revista Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção n.1, p. 47-62, dez. 2003.

DA COSTA, N. C. A, ABE, J.M. e SUBRAHMANIAN V. S. **Remarks on Annotated Logic**. Instituto de Estudos Avançados da USP, 2000.

DA COSTA, N. C. A; HENSCHEN, L. J.; LU, J. J. et al. **Automatic Theorem Proving in Paraconsistent Logics: Teory and Implementation**. Instituto de Estudos Avançados da USP - 1990.

DA COSTA, N. C. A & SUBRAHMANIAN, V. S.. **Paraconsistent Logics as a Formalism for Reasoning About Inconsistent Knowledge Bases**. Instituto de Estudos Avançados da USP - 1989.

DA COSTA, N. C. A; SUBRAHMANIAN, V. S. e VAGO, C. **The Paraconsistent Logics Pr**. Instituto de Estudos Avançados da USP - 1989.

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.