

FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI ANCHIETA
Pós-GRADUAÇÃO LATO SENSU
CURSO DE SISTEMAS ELETRÔNICOS PARA CONTROLE

JOSÉ WILLIAM RODRIGUES PEREIRA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS DE CONTROLE:
PID E LÓGICA PARACONSISTENTE

SÃO PAULO
2016

JOSÉ WILLIAM RODRIGUES PEREIRA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS DE CONTROLE:
PID E LÓGICA PARACONSISTENTE

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia
SENAI Anchieta como requisito para obtenção do
grau de Especialista em Sistemas Eletrônicos para
Controle .

Orientador: Profº Me.Vander Celio Nunes

Co-orientador: Profº Me. Rudson de Lima Silva

SÃO PAULO

2016

Pereira, José William Rodrigues

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS DE CONTROLE: PID
e LÓGICA PARACONSISTENTE / José William Rodrigues Pereira -
2016

27.p

1.Técnicas de Controle 2.Lógica Paraconsistente 3.Controle PID Digital.
I.Título.

CDU xxx.yy

JOSÉ WILLIAM RODRIGUES PEREIRA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS DE CONTROLE:
PID E LÓGICA PARA CONSISTENTE

Monografia apresentada à Faculdade de Tecnologia
SENAI Anchieta como requisito para obtenção do
grau de Especialista em Sistemas Eletrônicos para
Controle .

Orientador: Profº Me.Vander Celio Nunes

Co-orientador: Profº Me. Rudson de Lima Silva

Aprovado em dd/mm/aaaa

BANCA EXAMINADORA

Profº Me.Vander Celio Nunes

Profº Me. Marcos Antônio Felizola

Profº Me. José Gil de Oliveira

Dedico este trabalho à minha família, pela paciência; aos amigos de curso e professores, pelo companheirismo e dedicação; a todos que em algum momento compartilharam ideias, palavras de incentivo e carinho; A todos os amantes do saber.

Agradecimentos

Agradeço...

"... Reze e trabalhe, fazendo de conta que esta vida é um dia de capina com sol quente, que às vezes custa muito a passar, mas sempre passa. E você ainda pode ter muito pedaço bom de alegria... Cada um tem a sua hora e a sua vez: você há de ter a sua."(Sagarana)

João Guimarães Rosa

Resumo

Sistemas de controle são largamente utilizados principalmente no setor industrial e buscam uma maior eficiência de tempo e energia, mantendo a qualidade dos processos e do sistema controlado, contudo ainda são muito complexos e de difícil implementação, necessitando de um sistema embarcado dedicado. O objetivo deste estudo é mostrar uma forma alternativa de controle em malha fechada e implementar, um controle não convencional utilizando a Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPA2v), de forma comparativa ao modelo clássico de controle, Proporcional, Integral e Derivativo (PID). Partindo dos conceitos básicos de controle, o modelo com LPA2v apresenta grande potencial para sua implementação e exploração em sistemas de controle. Comparativamente, o modelo proposto alinha-se ao modelo clássico, tendo parte de sua teoria adaptada para o atendimento dos pressupostos da LPA2v.

PALAVRAS-CHAVE: Controle Não Convencional; Lógica Paraconsistente; Controle Clássico;

Abstract

Control systems are widely used mainly in industry and seek greater time and energy efficiency while maintaining the quality of processes and the controlled system, however they are still very complex and difficult to implement, requiring a dedicated embedded system. The purpose of this study is to show an alternative form of closed loop control and implement an unconventional control using Paraconsistent Annotated Logic with annotation of two values (PAL2v) comparatively to the classical model of control, Proportionl, Integral and Derivative (PID). Starting from the basics of control, the model with PAL2v has great potential for its implementation and operation of control systems. Comparatively, the model is aligned to the classical model, and part of his theory adapted to the care of the PAL2v assumptions.

KEYWORDS: Unconventional control; Paraconsistent logic; Classic Controller;

Lista de Figuras

2.1	Diagrama em bloco de sistema de controle	6
2.2	Diagrama em blocos de sistema de controle em malha aberta	6
2.3	Diagrama em blocos de sistema de controle em malha fechada	7
2.4	Diagrama em blocos de sistema de controle em malha fechada utilizando notação matemática	7
2.5	Sistema simples	8
2.6	Princípio da Superposição	8
2.7	Gráfico da função Resposta	11
2.8	Reticulado finito de Hasse	14
2.9	Representação do reticulado no quadrado unitário no plano cartesiano .	16
2.10	Representação da Reta Perfeitamente Definida	16
2.11	Representação da Reta Perfeitamente Indefinida	18
2.12	Representação dos Graus de Certeza e Contradição em um plano cartesiano	19
2.13	Representação dos valores de controle	19
2.14	Representação do reticulado da LPA2v subdividido em 12 regiões	20
2.15	Representação de $G_c = 0.54$ e $G_{ct} = 0.46$	23

Lista de Tabelas

2.1	Pares de transformadas de Laplace	10
-----	---	----

Lista de símbolos

λ grau de evidência

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Formulação do Problema	1
1.2	Hipótese e Relevância do Trabalho	2
1.3	Objetivo Geral	3
1.4	Objetivos Específicos	3
1.5	Justificativa	3
1.6	Limitações da pesquisa	3
1.7	Estrutura do Trabalho	4
2	Controle de Sistemas	5
2.1	Diagrama de Blocos	6
2.2	Controle Clássico	7
2.2.1	Modelagem matemática	8
2.2.2	Sistema Linear	8
2.2.3	Transformada de Laplace	9
2.2.4	Sistemas de 1ª Ordem	10
2.2.5	Sistemas de 2ª Ordem	10
2.3	Ação de Controle	10
2.4	Requisitos de desempenho do sistema	10
2.5	Controle Moderno Não Convencional	
	Lógica Paraconsistente	12
2.5.1	Reticulado de Hasse	13
2.5.2	Quadrado Unitário no Plano Cartesiano - QUPC	15
2.5.3	A LPA2v aplicada em Controle	21
3	Sistema eletrônico	24
3.1	Atuador	24
3.2	Drive	24
3.3	Sensor	24
3.4	Controlador	24
3.5	Programação	24
4	Apresentação e discussão dos resultados	25
4.1	A construção do sistema de controle	25
4.1.1	Estabelecer os objetivos do controle	25
4.1.2	Identificar a variável a ser controlada	25
4.1.3	Escrever as especificações	25
4.1.4	Estabelecer a configuração do sistema	25
4.1.5	Obter um modelo do processo e suas partes	25

4.1.6	Descrever o controlador e parâmetros de ajuste	25
4.1.7	Otimizar parâmetros e analisar performance	25
5	Considerações Finais - Conclusão	26

Capítulo 1

Introdução

Comparar sistemas de controle mediante uma mesma planta é uma forma de avaliar as possibilidades e limitações de ambos os elementos de estudo, possibilitando uma melhor escolha no momento de planejar e executar um projeto, obtendo assim um ganho de tempo, que reflete diretamente no custo de implementação e manutenção além de conferir ao projeto maior possibilidade de atingir um melhor desempenho e uma maior confiabilidade.

Sistemas de controle são largamente utilizados pela indústria como um todo a muitos anos, tendo algumas técnicas amplamente difundidas e com alto grau de maturação, como é o caso do controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID), mesmo apresentando restrições e limitações quanto a aplicação em sistemas que possuem não-linearidades, atrasos de transporte e/ou parâmetros variantes no tempo. FERREIRA (2012)

Tendo em vista que estudos de novas formas de controle não clássicas estão em curso, a lógica paraconsistente surge como uma promissora ferramenta para implementação de tomada de decisão em diversos campos de aplicação como a robótica, automação industrial, inteligência artificial, logística, controle, entre outras. SILVA FILHO (2006)

O presente trabalho tem como objetivo a caracterização de duas teorias utilizadas em sistemas controle, PID e Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores (LPA2v), que é uma das formas de aplicação da Lógica Paraconsistente, sua implementação e posterior comparação utilizando uma plataforma que contemple recursos que possibilite uma análise de desempenho e complexidade de implementação.

1.1 Formulação do Problema

O cenário dos dispositivos microcontrolados é cada vez maior e abrange uma gama de aplicações muito ampla, desde pequenas aplicações com dispositivos de 8-bits até modernos controladores de 32-bits integrados com hardware dedicado à processamento digital de sinais e cálculos avançados.

A integração de hardware dedicado junto ao núcleo dos microcontroladores, possibilita a implementação de rotinas complexas de cálculo para controle do tipo PID, de forma a diminuir o custo de processamento, intrínseco ao controle clássico, ou seja, a quantidade de ciclos de máquina necessários para a realização dos cálculos e por consequência o tempo de resposta do sistema.

Em contrapartida, novas técnicas utilizando lógicas modernas, como a LPA2v, possuem baixo custo de processamento em relação aos cálculos matemáticos, por serem inerentemente simples, não necessitando de um hardware dedicado para sua implementação, e podendo ser realizada a execução em dispositivos de menor capacidade de processamento, reduzindo assim o custo do projeto, mas mantendo a qualidade do sinal processado.

Existe a possibilidade de substituir um controlador PID digital por um controlador baseado em lógica paraconsistente, e obter um resultado equivalente em termos de qualidade da resposta do sistema, menor complexidade na codificação de cálculos e carga de processamento reduzida?

Para responder a essa questão é implementado um sistema com um controlador de 32-bits que possui hardware dedicado, para a comparação entre sistema de controle PID digital e controle baseado em LPA2v.

1.2 Hipótese e Relevância do Trabalho

A lógica paraconsistente vem ganhando relevância e adeptos principalmente à partir do final da década de 90 do século XX, quando houve o Primeiro Congresso Mundial sobre Paraconsistência em Gent na Bélgica em 1997, no ano 2000 o segundo congresso realizado em São Sebastião, São Paulo e o terceiro em Toulouse, França em julho de 2003, atraindo cada vez mais pesquisadores interessados de diversos centros de pesquisa do mundo. KRAUSE (2015)

Atualmente as pesquisas estão focadas no estudo da aplicação da lógica paraconsistente, e ganhar espaço no universo técnico e científico, contribuindo com uma nova e eficiente forma de trabalho.

Em função da sua simplicidade de implementação, há uma forte expectativa de que possa ser implantada em sistemas embarcados com baixo poder de processamento, como microcontroladores de 8 bits, de forma eficiente, em oposição ao clássico PID de difícil implementação e alto custo de processamento, ou seja, grande quantidade de instruções e maior tempo de resposta em função da complexidade das operações. Assim é de fundamental importância que se faça um estudo comparativo entre as duas técnicas, para que se possa concluir a hipótese de que ambas são equivalentes do ponto de vista da eficiência do controle na planta, mas que do ponto de vista de carga processamento, a lógica paraconsistente é sensivelmente melhor.

1.3 Objetivo Geral

O estudo comparativo entre as técnicas de controle PID-digital e LPA2v, de forma a poder avaliar os sistemas em termos de eficiência do controle, carga de processamento e tempo de resposta.

1.4 Objetivos Específicos

Enfoque especial na comparação e avaliação do comportamento do sistema de controle, nas dificuldades de implementação matemática e decodificação em linguagem C, medição dos tempos de resposta em relação aos estímulos de entrada, na quantidade de memória necessária, precisão e robustez de cada implementação.

Implementar o controle PID-digital utilizando um hardware de alto poder de processamento, e com periféricos dedicados, ou seja, módulo de cálculo para PID nativo.

Implementar o controle utilizando LPA2v, gerar as funções de controle necessárias utilizando os preceitos da lógica, sendo que não há funções dedicadas à LPA2v nativas ao controlador.

Um enfoque especial é dado à complexidade da implementação no controlador e sua carga de processamento, afim de concluir se é possível uma implementação de baixa capacidade de processamento realizar um controle com precisão comparável ao modo clássico, assim como uma forma híbrida, mesclando a relação capacidade de processamento com precisão do controle.

1.5 Justificativa

Sendo o presente trabalho uma análise comparativa entre um sistema de controle clássico e uma lógica moderna para implementar o sistema de controle, sua função primordial é contribuir para a ampliação do conhecimento em uma nova forma de lidar com o mundo, amparado por um saber fortemente enraizado que serve de suporte comparativo à potencial teoria emergente, contribuindo dentro de uma aspecto ainda pouco explorado, mesmo contando com algumas implementações, há escassez de comparações diretas entre as técnicas de controle aqui presentes.

1.6 Limitações da pesquisa

Este trabalho apresenta dois modos de controle, sendo o primeiro um modelo clássico utilizando PID com implementação digital e sintonia de parâmetros pela técnica de Ziegler-Nichols e um segundo modelo utilizando LPA2v, como controle moderno.

Não é objetivo do trabalho se aprofundar em questões históricas e nem explorar as diversas técnicas de controle, sintonia ou implementação.

O controlador utilizado possui suporte para implementação de PID, mas não é objetivo mostrar como se configura, ou mesmo abordar lógica de programação e seus fundamentos.

1.7 Estrutura do Trabalho

Capítulo 2

Controle de Sistemas

A palavra *Sistema* tem origem no grego *synístanai* e de acordo com GRAMATICA.NET significa "fazer funcionar junto" e uma aplicação precursora do controle é apresentada por Ctesibius de Alexandria (BRITANNICA) onde um conjunto de reservatórios de água com furo na parte inferior geravam por gotejamento uma marcação do tempo, porém a água do reservatório precisa estar em um nível constante, pois o intervalo de gotejamento é afetado diretamente pela quantidade de água, assim foi criado por Ctesibius um sistema semelhante as boias dos reservatórios atuais para manter o nível de água no reservatório sempre constante.

A modificação do comportamento de um sistema, de forma controlada garantindo uma maior eficiência é o objetivo do controle de sistemas.

A principal tarefa de um engenheiro, segundo DORF and BISHOP (2011) "é o processo de concepção ou invenção de formas, partes e detalhes de um sistema para alcançar um propósito específico", processo este que soma a grande capacidade de análise e a criatividade para atender as demandas da função, como é o caso de projeto em engenharia no segmento de Sistemas de controle, cujo objetivo é obter configuração, especificações e identificação de processos para atender uma necessidade real. Norman S. Nise traz uma concepção semelhante onde "Um sistema de controle consiste em subsistemas e processos(ou plantas) construídos com o objetivo de se obter uma saída desejada com desempenho desejado para uma entrada específica fornecida".

Os sistemas de controle atuam basicamente gerando respostas específicas para estímulos específicos de forma controlada e automática trazendo vantagens nas aplicações de diversas áreas como movimentação de grandes equipamentos com precisão, aplicação em locais remotos ou perigosos, compensação de perturbações, manipulação de dados convenientes etc.

2.1 Diagrama de Blocos

Os sistemas de controle são geralmente representados através de diagramas de blocos ou fluxo de sinais, como na Figura 2.1 convenientes ao seu desenvolvimento e análise. É composta por uma caixa representando o sistema a ser controlado, setas no sentido da caixa representando as entradas do processo e setas no sentido para fora da caixa para indicar a saída do sistema.

Em um sistema real, podem haver muitas variáveis de entrada e de saída, mas a abordagem clássica de controle isola apenas uma das variáveis de entrada e uma de saída, ficando o sistema conhecido pela sigla em inglês SISO (*Single In Single Out* - Única Entrada e Única Saída).

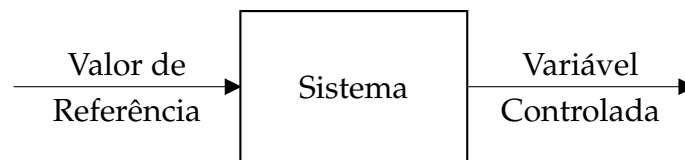


Figura 2.1: Diagrama em bloco de sistema de controle

O diagrama de blocos mostrado na Figura 2.1 é uma simplificação ao máximo de um sistema de controle, contém apenas o bloco representando o sistema, uma entrada, para o valor de referência, e uma saída com o valor da variável controlada. A Figura 2.2, divide os bloco do sistema em dois: controlador e planta. Neste caso um sistema de controle em malha aberta, ou seja, não há uma reinserção do sinal de saída à entrada, chamada de realimentação ou retroalimentação. Assim a entrada possui o valor de resposta desejada, que alimenta o processo e a saída apresenta a resposta real, porém nada garante que a resposta real está coerente ao valor de entrada.

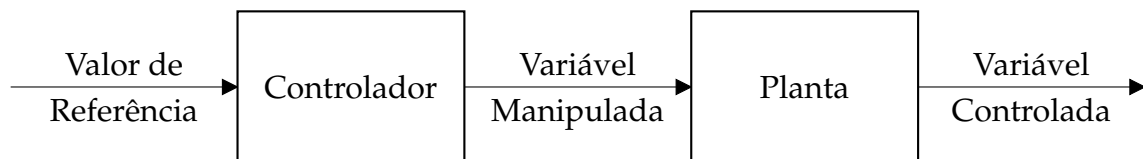


Figura 2.2: Diagrama em blocos de sistema de controle em malha aberta

O diagrama da Figura 2.3 apresenta realimentação, ou seja, uma amostra da resposta real é lida por um elemento sensor e é reinserida à entrada da malha, aonde é realizada a comparação entre resposta real e desejada, a diferença entre ambos os valores é chamado de Erro do Sistema e é baseado nesse valor que o controlador tem condições de efetuar as devidas correções, geralmente, afim de manter o sistema estável no valor de resposta desejada.

Como notação para os elementos do diagrama de blocos, são adotadas letras para representar matematicamente as relações entre as grandezas conforme Figura 2.4

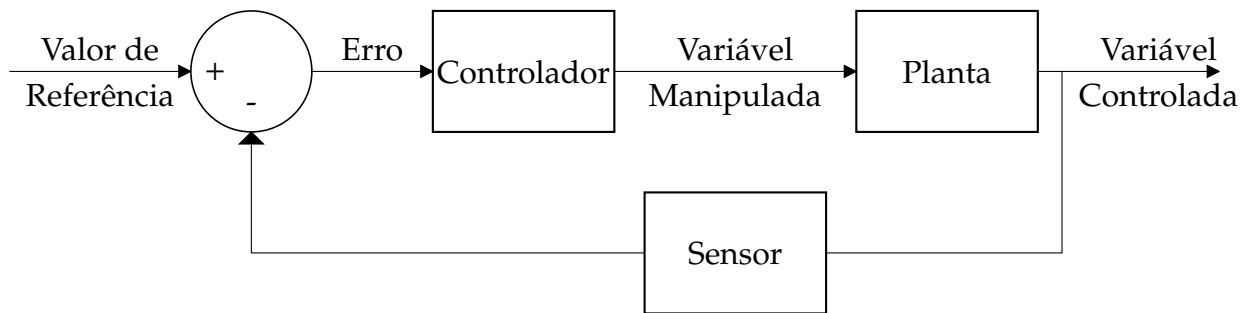


Figura 2.3: Diagrama em blocos de sistema de controle em malha fechada

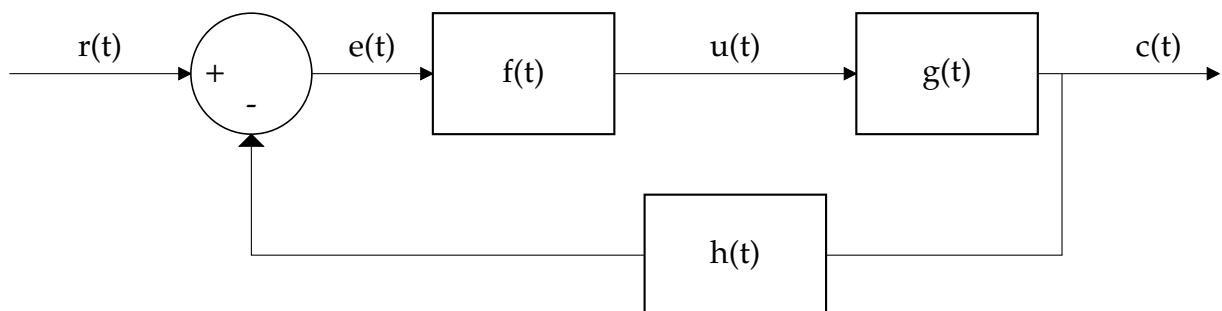


Figura 2.4: Diagrama em blocos de sistema de controle em malha fechada utilizando notação matemática

2.2 Controle Clássico

Os sistemas de controle clássicos possuem a predileção por tratar sistemas mono-variáveis, lineares e invariantes no tempo, mas esta não é a condição mais provável para um sistema físico. Ao longo do tempo foram desenvolvidas ferramentas, como a transformada de Laplace, para contornar algumas dificuldades inerentes ao equacionamento dos modelos matemáticos e também métodos como o dos lugares das raízes ou resposta de frequência.

Os sistemas de controle modernos possuem o índice de desempenho em termos de variáveis de estado, e possuem técnicas para tratar sistemas multivariáveis, não lineares e variantes no tempo.

A forma prática de trabalhar com sistemas de controle clássicos é através de modelos matemáticos para descrever a dinâmica dos sistemas à partir das leis físicas que regem seus comportamento e desempenho. As variáveis dos sistemas articulam-se dinamicamente e são expressas matematicamente utilizando, geralmente, equações diferenciais, e podem ser relações lineares ou não lineares. Para sistemas não lineares é habitual que seja feita a linearização do sistema, ou de uma região que se queira controlar, utilizando como ferramenta a série de Taylor.

Outra ferramenta extremamente importante é a transformada de Laplace que converte uma equação diferencial no domínio do tempo em uma equação algébrica no domínio da frequência, facilitando a manipulação matemática na utilização dos métodos

de controle.

A relação das variáveis de saída com a de entrada do sistema, é denominada de função de transferência(FT) e apresenta as características dinâmicas do sistema.

2.2.1 Modelagem matemática

A maioria dos sistemas físicos pode ser modelado matematicamente através de sistemas diferenciais e é comum que os sistemas apresentem comportamento exponencial ...

Em desenvolvimento

2.2.2 Sistema Linear

Quase que a totalidade dos processos naturais apresentam aspectos não lineares, porém a técnica de controle clássico trabalha apenas com sistemas lineares, assim existem duas opções para trabalhar com sistemas não lineares: mudar o método de controle para uma técnica não convencional ou linearizar em torno de um ponto de operação. A linearização é o processo de encontrar um modelo linear que atenda bem a aproximação do modelo não linear em questão.

Lyapunov ??? provou que em uma região próxima ao ponto de operação um sistema não linear pode ser estável.

Dado um sistema $S(t)$ para uma entrada $u(t) = u_1(t)$ tem-se uma saída $y(t) = y_1(t)$ e para uma entrada $u(t) = u_2(t)$ tem-se uma saída $y(t) = y_2(t)$.

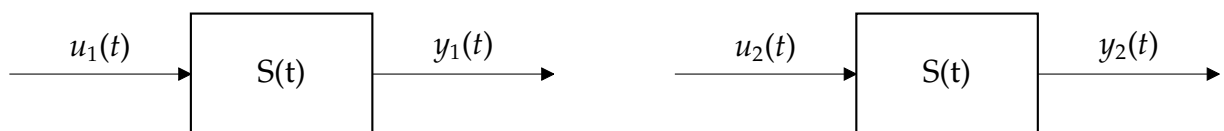


Figura 2.5: Sistema simples

Assim para uma combinação linear na entrada $u(t) = \alpha u_1(t) + \beta u_2(t)$ tem-se $y(t) = \alpha y_1(t) + \beta y_2(t), \forall \alpha, \beta \in \mathbb{R}$.

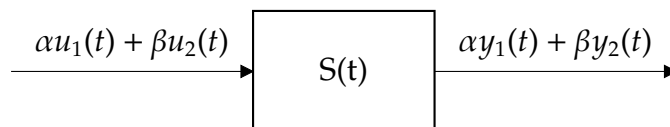


Figura 2.6: Princípio da Superposição

Linearização

Para o processo de linearização de um sinal, uma forma comumente utilizada é através da Série de Taylor, onde dado um plano cartesiano e uma função f com um ponto qualquer com coordenadas x e y com pequenas variações \bar{x} e \bar{y} , temos que:

$$y = \bar{y} + \left. \frac{df}{dx} \right|_{\bar{x}} (x - \bar{x}) + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2f}{dx^2} \right|_{\bar{x}} (x - \bar{x})^2 + \frac{1}{3!} \left. \frac{d^3f}{dx^3} \right|_{\bar{x}} (x - \bar{x})^3 + \dots \quad (2.1)$$

A série de Taylor é truncada após o segundo membro da somatória, pois $(x - \bar{x})^n$ é cada vez menor na medida em que o expoente aumenta, fazendo com que tal parcela da somatória tenda a zero, assim despreza-se tais termos e tem-se:

$$y = \bar{y} + \left. \frac{df}{dx} \right|_{\bar{x}} (x - \bar{x}) \quad (2.2)$$

2.2.3 Transformada de Laplace

A transformada de Laplace é utilizada em controle como uma ferramenta matemática para facilitar a solução de equações diferenciais lineares, utilizando uma variável complexa s , operações como derivação e integração podem ser substituídas por operações algébricas no plano complexo, domínio da frequência, e após a resolução realiza-se a transformada inversa para retornar a solução para o domínio do tempo.

A definição e sua dedução de forma rigorosa podem ser encontradas em OGATA (2010) e não será discutida neste trabalho, mas vale aqui apresentar apenas a sua definição e uma parte da tabela de conversão.

A transformada de Laplace é definida como:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (2.3)$$

Onde:

\mathcal{L} : Operador da transformada de Laplace

$f(t)$: função da variável t tal que $f(t) = 0$ para $t < 0$

$F(s)$: transformada de Laplace de $f(t)$

s : variável complexa

A transformada inversa de Laplace é definida como:

$$\mathcal{L}^{-1}\{F(s)\} = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(s)e^{st} ds, \text{ para } t > 0 \quad (2.4)$$

Onde:

\mathcal{L}^{-1} : Operador da transformada inversa de Laplace

c : Número real constante, abscissa da convergência.

Difícilmente a transformada inversa de Laplace é utilizada, podendo ser utilizado o método de frações parciais ou a tabela de conversão.

A Tabela 2.1 mostra alguns pares de transformadas de Laplace, e uma tabela mais completa pode ser encontrada no Capítulo 2 de OGATA (2010).

Tabela 2.1: Pares de transformadas de Laplace

$f(t)$	$F(s)$
Impulso unitário $\delta(t)$	1
Degrau unitário $1(t)$	$\frac{1}{s}$
t	$\frac{1}{s^2}$
$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!} (n = 1, 2, 3, \dots)$	$\frac{1}{s^n}$
$t^n (n = 1, 2, 3, \dots)$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$
$t^n e^{-at} (n = 1, 2, 3, \dots)$	$\frac{n!}{(s+a)^{n+1}}$
$\frac{1}{a}(1 - e^{-at})$	$\frac{1}{s(s+a)}$
$\frac{1}{b-a}(e^{-at} - e^{-bt})$	$\frac{1}{(s+a)(s+b)}$

2.2.4 Sistemas de 1ª Ordem

2.2.5 Sistemas de 2ª Ordem

2.3 Ação de Controle

- Duas posições ou Liga-Desliga
- Controlador Proporcional (P)
- Controlador Integral (I)
- Controlador Proporcional + Integral (PI)
- Controlador Proporcional + Derivativo (PD)
- Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID)

2.4 Requisitos de desempenho do sistema

Os sistemas de controle buscam atender os chamados requisitos de desempenho do sistema, que de um modo geral se efetuam através de modificações das características

da relação entrada/saída para se obter os valores desejados dessa relação, ou ainda ajustar o comportamento da saída para uma dada entrada específica.

Os principais e mais comuns requisitos de desempenho dos sistemas são associadas a velocidade de resposta, presença ou não de oscilações e a exatidão da resposta do sistema em relação ao valor desejado, chamada de erro de regime estacionário.

O erro de regime estacionário, mostrada na Figura 2.7, é uma medida que vai tender a zero em sistemas ideais, mas que na realidade não alcança o valor zero, assim assume-se um valor aceitável, 5% do valor da resposta desejada para sistemas não críticos e 2% para sistemas de maior grau de criticidade, para assumir que o sistema entrou em estabilidade, e a resposta real é aceita como tendo atingido o valor de Resposta desejada.

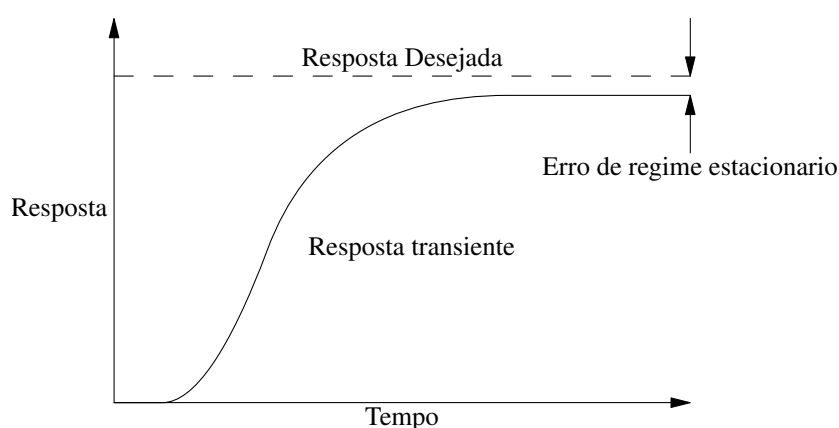


Figura 2.7: Gráfico da função Resposta

Para realizar o controle de um sistema é necessário que estejam bem definidos os seus requisitos, que são os objetivos a serem atendidos. Quando um sistema por si só já atende os requisitos, não há a necessidade de controle. De forma oposta, é projetado o sistema de controle, que pode ser em malha aberta ou fechada, clássico ou moderno dependendo das características físicas do sistema.

Para a execução de um sistema de controle podem ser verificados requisitos do sistema de duas formas básicas, sendo a primeira através dos testes e levantamento empírico da sua curva de resposta ou através de seu modelo matemático, quando trabalha-se com elementos já bem estudados e com a equação que representa seu comportamento empírico bem estabelecida por diversos estudos anteriores.

2.5 Controle Moderno Não Convencional

Lógica Paraconsistente

O controle moderno trata de sistemas multivariáveis, não lineares ou variantes no tempo de forma mais apropriada do que o controle clássico, reduzindo a complexidade das expressões para que haja a possibilidade de um processamento satisfatório. Dentro do universo do controle moderno, existe ainda o controle convencional que utiliza a análise de sistemas de controle no espaço de estados, que utiliza n -equações de primeira ordem combinadas em uma equação diferencial vetor-matricial, de forma a simplificar e possibilitar o trabalho com uma quantidade de variáveis alta sem que haja um grande impacto no processamento. (OGATA, 2010) Outra forma de controle moderno é denominada controle não convencional, aonde estão situadas diversas técnicas como controle adaptativo, algoritmos adaptativo e genético, redes neurais, as lógicas Fuzzy e Paraconsistente, que é alvo da abordagem do presente trabalho, entre outras.

A lógica, como ramo filosófico que trata das relações de coerência racional e discursiva, proposições e conclusões, e tem como origem a Grécia Antiga com o seu primeiro arranjo formal em *Tópicos* de Aristóteles por volta de 340 a.C. Apesar de suas bases serem conhecidas e discutidas por diversos pensadores anteriores, não havia a formalização de uma teoria bem fundada, apenas o tratamento de ideias como consistência e consequências da contraditoriedade por exemplo.

Os princípios da lógica enunciadas por Aristóteles são basilares para a teoria clássica e moldaram o pensamento e a noção de consistência, ou não contraditoriedade, estreitamente conectadas ao conceito de completude e podem ser descritos formalmente assim:

1. Princípio de Identidade: $A \rightarrow B$ ou $\forall x(x = x)$;
2. Princípio do Terceiro Excluído: $A \vee \neg A$ ou $\forall x(Ax \vee \neg Ax)$;
3. Princípio da Não Contradição: $\neg(A \wedge \neg A)$ ou $\forall x\neg(Ax \wedge \neg Ax)$;

O grande desenvolvimento da lógica, principalmente nos séculos XIX e XX, forneceu ferramental para caracterização e tratamento preciso da lógica clássica e também possibilitou o desenvolvimento de sistemas lógicos não clássicos, possibilitando rearranjos, experimentações e questionamentos de dogmas secularmente estabelecidos.

Uma questão que já havia sido objeto de estudo por diversos pensadores desde os pré-socráticos, como Heráclito e sua doutrina da harmonia dos opostos, é a questão da contradição, que por vezes incomodou-os mas que nunca havia sofrido um tratamento formal como o desenvolvido por Newton C. A. da Costa(1929-) e Stanislaw Jaskiowski(1906-1965), que propuseram e desenvolveram sistemas lógicos que fossem capazes de lidar com essas inconsistências.

Para (da Costa e Marconi, 1989), ao restringir em um certo sistema lógico o princípio da não contradição, obtém-se um resultado que pertence à lógica denominada Paraconsistente.

Assim sendo, para uma dada teoria, se houver um símbolo de negação, como por exemplo " \neg ", se em qualquer fórmula fechada A não for demonstrável A e $\neg A$ a teoria é consistente (não contraditória), senão, ela é inconsistente(contraditória).

Teoria é definida por (Evandro Luís Gomes, 2013 p.4) como sendo:

"...um conjunto de fórmulas(expressões bem formuladas) de uma linguagem, fechadas por uma determinada relação de consequência, que caracteriza a lógica subjacente à teoria, da qual ela herda todas as suas características estruturais como, por exemplo, consistência(não contraditoriedade) e completude."

Na lógica clássica, uma teoria é completa, se e somente se, for consistente para toda a fórmula fechada A onde A e $\neg A$ é teorema da teoria e a teoria é trivial ou supercompleta se todas as fórmulas expressáveis forem demonstráveis, tanto A quanto $\neg A$.

Sendo que toda a lógica paraconsistente, não se pode deduzir qualquer fórmula à partir de uma fórmula A e sua negação $\neg A$, mostrando assim que as noções de inconsistência(contraditoriedade) e trivialidade são de fato independentes.

2.5.1 Reticulado de Hasse

A lógica paraconsistente sendo apropriada para tratar dados inconsistentes foi utilizada em 1987, por H. Blair e V.S.Subrahmanian para representar e codificar o funcionamento de bancos de dados inconsistentes. Pouco depois da Costa, Subrahmanian e Vago propuseram a lógica paraconsistente anotada e sua extensão a uma lógica de predicados paraconsistente anotada de primeira ordem.

Nas lógicas paraconsistentes anotadas, uma proposição P utiliza um reticulado formado por pares ordenados tal que:

$$\tau = \{(\mu, \lambda) \mid \mu, \lambda \in [0, 1] \subset \mathbb{R}\} \quad (2.5)$$

de acordo com graus de cresça das constantes anotacionais do reticulado de Hasse, associado à Lógica Paraconsistente Anotada com anotação de dois valores (LPA2v), formalmente descritas como

$$\tau = \{\top, V, F, \perp\} \quad (2.6)$$

os quais descrevem os extremos do reticulado como sendo inconsistente, verdadeiro, falso e paracompleto, respectivamente.

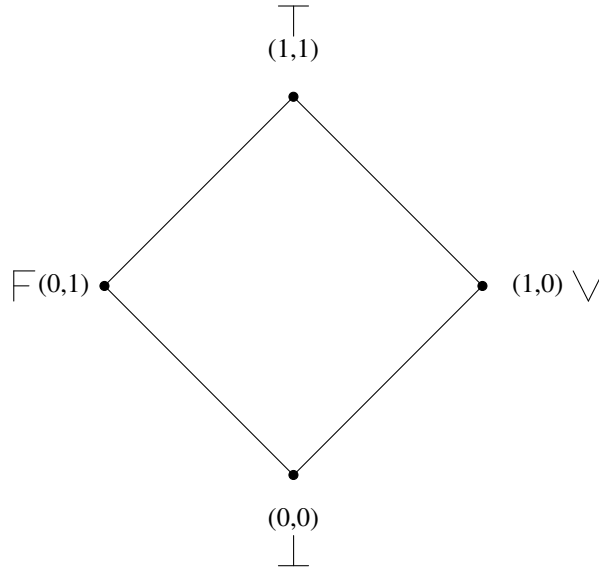


Figura 2.8: Reticulado finito de Hasse

Para toda proposição P há um par de valores, chamada de anotação, (μ, λ) , onde μ é o grau de evidência favorável e λ é o grau de evidência desfavorável, representada como $P_{(\mu, \lambda)}$.

Como exemplificação, para uma proposição $P \equiv$ "A temperatura do aquecedor atingiu o valor desejado.", assume-se dois especialistas para realizarem a leitura dos valores da anotação. Em um sistema físico, os especialistas geralmente são sensores, como neste caso, poderiam ser sensores de temperatura.

- μ = grau de evidência favorável (especialista 1), ou seja, com quanto de certeza, em um intervalo fechado $[0, 1]$, sendo 0 para grau nulo de certeza e 1 grau máximo de certeza para a dada proposição P ;
- λ = grau de evidência desfavorável (especialista 2), ou seja, com quanto de certeza, em um intervalo fechado $[0, 1]$, sendo 0 o grau nulo de certeza à evidência desfavorável e 1 o grau máximo de certeza à evidência desfavorável para a dada proposição P ;

Assim, podemos interpretar da seguinte forma os valores da anotação para as posições extremas do reticulado finito de Hasse:

- $(\mu, \lambda) = (1, 0)$: Há um grau de evidência favorável total e um grau de evidência desfavorável nulo, ou seja, a afirmação da proposição é máxima e sua negação é nula, assim, P é Verdadeira e A temperatura do aquecedor atingiu o valor desejado.

- $(\mu, \lambda) = (0, 1)$: Há um grau de evidência favorável nulo e um grau de evidência desfavorável máximo, ou seja, a afirmação da proposição é nula e sua negação é máxima, assim, P é *Falsa* e *A temperatura do aquecedor não atingiu o valor desejado*.
- $(\mu, \lambda) = (1, 1)$: Há um grau de evidência favorável máximo e também um grau de evidência desfavorável máximo, ou seja, a afirmação da proposição é máxima e sua negação também é máxima, assim, P é *Inconsistente* e *A temperatura do aquecedor atingiu e não atingiu o valor desejado*, contradição.
- $(\mu, \lambda) = (0, 0)$: Há um grau de evidência favorável nulo e também um grau de evidência desfavorável nulo, ou seja, a afirmação da proposição é nula e sua negação também é nula, assim, P é *Indeterminada* e *A temperatura do aquecedor nem atingiu o valor desejado e nem não atingiu o valor desejado*, situação paracompleta.

Os graus de evidência podem assumir valores não extremos:

- $(\mu, \lambda) = (0.8, 0.3)$: Crê-se com grau de evidência favorável de 80% e um grau de evidência desfavorável de 30% que *A temperatura do aquecedor atingiu o valor desejado*.

Existe um operador de negação (\sim) sobre τ de forma que :

$$\sim: | \tau | \mapsto | \tau, \sim (\mu, \lambda) = (\lambda, \mu) \quad (2.7)$$

Então,

$$P_{(0.8, 0.3)} \leftrightarrow \sim P_{(0.3, 0.8)} \quad (2.8)$$

- $(\mu, \lambda) = (0.8, 0.3) = \sim (0.3, 0.8)$: Não crê-se que há um grau de evidência favorável de 30% e um grau de evidência desfavorável de 80% que *A temperatura do aquecedor atingiu o valor desejado*.

2.5.2 Quadrado Unitário no Plano Cartesiano - QUPC

Uma outra forma de representação da anotação é utilizando o Quadrado Unitário no Plano Cartesiano (QUPC) aonde são transpostos os pontos extremos às respectivas posições de acordo com o par ordenado, $(\mu, \lambda) \leftrightarrow (x, y)$, assim o eixo x corresponde ao grau de evidência favorável e o eixo y corresponde ao grau de evidência desfavorável, conforme mostrado na Figura 2.9.

Os pontos extremos assim representam:

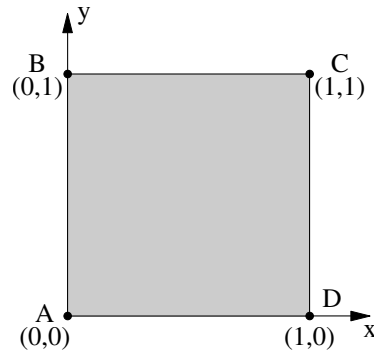


Figura 2.9: Representação do reticulado no quadrado unitário no plano cartesiano

- $A : (0,0) = \perp \Rightarrow$ Paracompleto
- $B : (0,1) = F \Rightarrow$ Falso
- $C : (1,1) = \top \Rightarrow$ Contradição
- $D : (1,0) = V \Rightarrow$ Verdade

O segmento de reta \overline{BD} , entre os pontos referentes às condições *Verdade* e *Falso*, conforme mostrado na Figura 2.10, é denominada de *Reta Perfeitamente Definida* e dada uma anotação (μ, λ) situada nela, a soma das evidências anotadas é sempre o valor unitário do quadro.

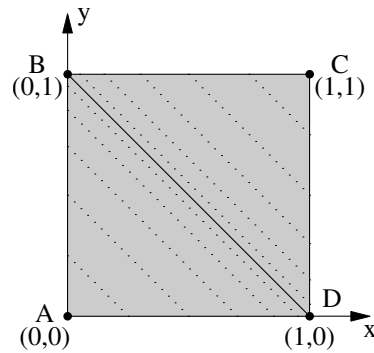


Figura 2.10: Representação da Reta Perfeitamente Definida

A relação dos graus de evidência da anotação quando coincidente à Reta Perfeitamente Definida é:

$$\mu + \lambda = 1 \quad (2.9)$$

Assim, temos que:

$$\mu + \lambda - 1 = 0 \quad (2.10)$$

Os graus de evidência não precisam apresentar valores complementares, possuem independência entre si, assim das Equações 2.9 e 2.10 é elaborado o conceito de *Grau de Contradição* (G_{ct}), assim temos:

$$G_{ct} = \mu + \lambda - 1 \quad (2.11)$$

quanto mais próximo da Reta Perfeitamente Definida, menor o grau de contradição apresentado pelos graus de evidência. Quanto mais afastado da Reta Perfeitamente Definida estiver o ponto, e mais próximo aos pontos A ou C, maior é o grau de contradição.

Quando a anotação estiver situada na região entre os pontos BCD, acima da reta perfeitamente definida, o grau de contradição é denominado *Grau de Inconsistência* (G_{it}), e isso ocorre quando, $\mu \geq \lambda$, de forma oposta, quando $\mu < \lambda$ a anotação está situada na região entre os pontos BAD, abaixo da reta perfeitamente definida, e o grau de contradição é denominado *Grau de Indefinição* (G_{id}), então pode-se dizer que:

$$-1 \leq G_{id} < 0 \leq G_{it} \leq 1 \quad (2.12)$$

e

$$-1 \leq G_{ct} \leq 1 \quad (2.13)$$

O segmento de reta \overline{AC} , entre os pontos referentes às condições *Para completo* e *Contradição*, conforme mostrado na Figura 2.11, é denominada de *Reta Perfeitamente Indefinida* e dada uma anotação (μ, λ) situada nela, a subtração das evidências anotadas é sempre zero, $\mu = \lambda$, e de forma contrária, quando a anotação está posicionada de forma não coincidente à Reta Perfeitamente Indeterminada, significa que $\mu \neq \lambda$.

A relação dos graus de evidência para uma anotação cuja posição coincide com a Reta Perfeitamente Indefinida é:

$$\mu - \lambda = 0 \quad (2.14)$$

De forma análoga ao Grau de contradição, da Equação 2.14 é elaborado o conceito de *Grau de Certeza* (G_c), assim temos que:

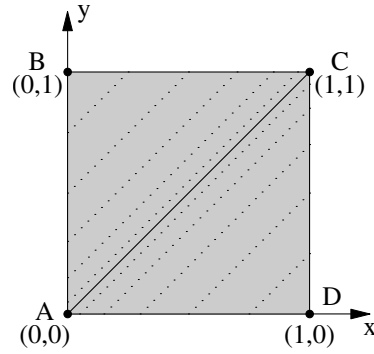


Figura 2.11: Representação da Reta Perfeitamente Indefinida

$$G_c = \mu - \lambda \quad (2.15)$$

Quando os graus de evidência, favorável e desfavorável, são iguais, não há certeza em relação à proposição, mas quando são diferentes, alguma certeza pode ser inferida, até a condição máxima onde uma das evidências é total (1) e a outra é nula (0), caracterizando a condição verdadeira ou falsa, afastando o ponto anotado da Reta Perfeitamente Indefinida.

Quando a anotação situa-se entre os pontos ABC do QUPC, o grau de certeza é denominado *Grau de Falsidade* (G_f), e tal condição ocorre quando $\mu < \lambda$, caso contrário, se $\mu \geq \lambda$, a anotação situa-se entre os pontos ACD do QUPC, e o grau de certeza é denominado *Grau de Verdade* (G_v), então pode-se dizer que:

$$-1 \leq G_f < 0 \leq G_v \leq 1 \quad (2.16)$$

e

$$-1 \leq G_c \leq 1 \quad (2.17)$$

Graficamente são representadas como mostra a Figura 2.12:

A representação ainda é dividida em algumas partes, dependendo da aplicação, estabelecendo quais são os limites que definem cada estado, Verdadeiro, Falso, Paracompleto, Contradição e outros mais que forem pertinentes à aplicação, estão representados pelas linhas tracejadas na Figura 2.13 e são definidos como:

- V_{scc} : Valor limite superior de Controle de Certeza
- V_{icc} : Valor limite inferior de Controle de Certeza

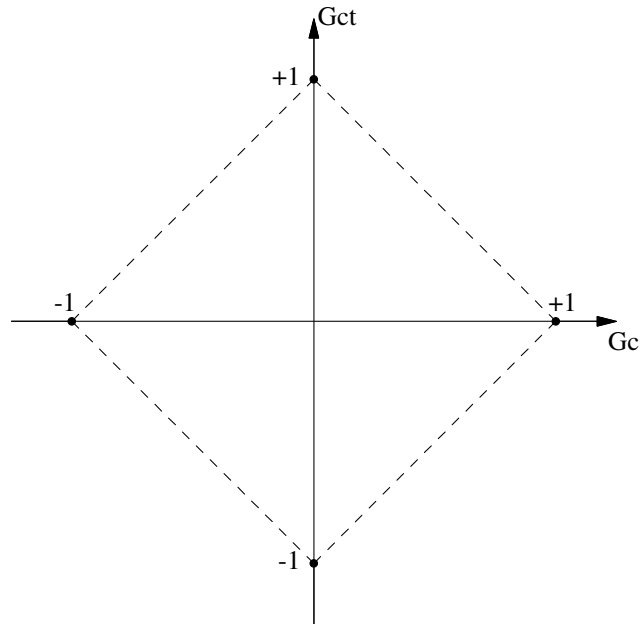


Figura 2.12: Representação dos Graus de Certeza e Contradição em um plano cartesiano

- V_{sci} : Valor limite superior de Controle de Incerteza
- V_{sci} : Valor limite inferior de Controle de Incerteza

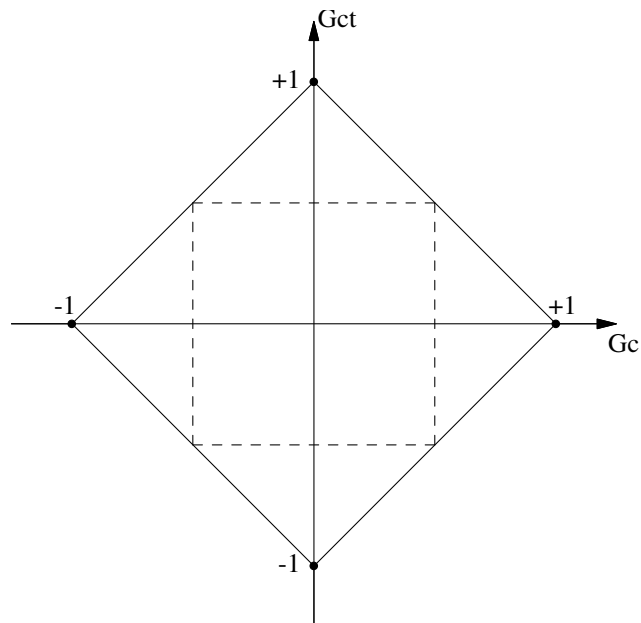


Figura 2.13: Representação dos valores de controle

Uma divisão em 12 partes é mostrada na Figura 2.14 com seus respectivos estados intermediários definidos conforme SILVA FILHO (2006), sendo 4 regiões extremas:

- V : Verdadeiro
- F : Falso

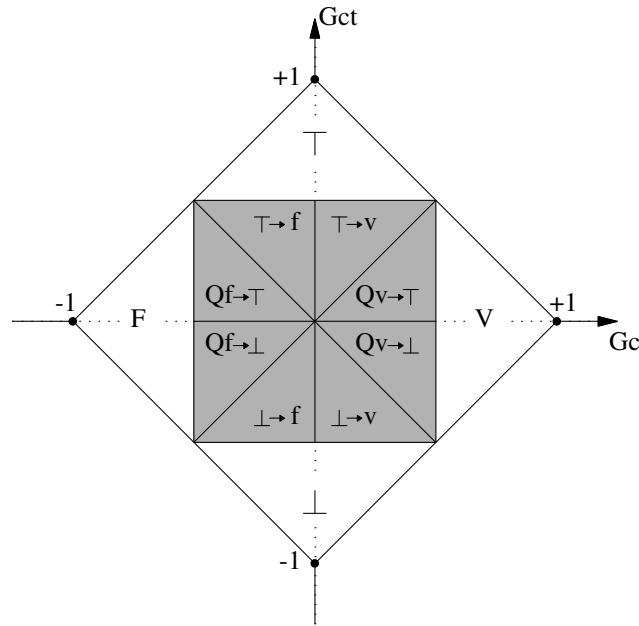


Figura 2.14: Representação do reticulado da LPA2v subdividido em 12 regiões

- \top : Contradição
- \perp : Paracompleto

e 8 regiões intermediárias:

- $Q_v \rightarrow \top$: Quase Verdade tendendo à Contradição
- $Q_v \rightarrow \perp$: Quase Verdade tendendo à Paracompleto
- $Q_f \rightarrow \top$: Quase Falso tendendo à Contradição
- $Q_f \rightarrow \perp$: Quase Falso tendendo à Paracompleto
- $\top \rightarrow f$: Contradição tendendo à Falso
- $\top \rightarrow v$: Contradição tendendo à Verdadeiro
- $\perp \rightarrow f$: Paracompleto tendendo à Falso
- $\perp \rightarrow v$: Paracompleto tendendo à Verdadeiro

O reticulado subdividido em 12 regiões como mostrado, é aplicado em situações aonde a tomada de decisão utiliza estados discretos bem definidos para atuação, onde para cada posição da anotação e respectivamente um estado do reticulado, uma ação é tomada, assim sendo, a quantidade de subdivisões está fortemente dependente da aplicação.

2.5.3 A LPA2v aplicada em Controle

A LPA2v aplicada em sistemas de controle utiliza além dos conceitos já estabelecidos, duas outras definições para sua implementação e são elas o *Grau de Certeza Real* (G_{CR}) e o *Grau de Evidência Real* (μ_{ER}) além de trabalhar alguns conceitos básicos de geometria, e pelo fato de possuir uma resolução simples do ponto de vista matemático, motiva este trabalho pela sua implementação eficaz com relação ao controle clássico que exige uma matemática elaborada, dificultando sua implementação em dispositivos de baixo custo e que não possuem hardware específico de processamento de sinais.

Para a implementação do sistema de controle paraconsistente, primeiramente é necessário que seja definida a proposição que será a base para as análises e tomadas de decisão.

$$P \equiv "A \text{ temperatura do aquecedor atingiu o valor desejado}."$$

Para trabalhar com essa proposição são necessárias pelo menos duas variáveis, sendo uma delas com o valor de temperatura desejada e outra com o valor atual de temperatura. Essas duas variáveis são representadas através de duas anotações, mas que antes precisam ser normalizadas.

Variável 1: Valor desejado ou Set point = 37 °C.

$$(\mu_d, \lambda_d) = (1, 0) \quad (2.18)$$

Onde:

μ_d : grau de evidência favorável ao valor desejado.

λ_d : grau de evidência desfavorável ao valor desejado.

Quando o aquecedor atingir a temperatura de 37 °C, crê-se com grau de evidência favorável máxima e grau de evidência desfavorável mínima que a proposição P é verdadeira, como mostrado na Equação 2.18.

Variável 2: Valor de temperatura atual lido pelo sensor: 20 °C no início do processo.

Supondo, hipoteticamente para facilitar o entendimento, um sensor com range de operação entre 0 e 100 °C que será lido, linearmente no intervalo de 0 a 10V e normalizado para o intervalo fechado [0,1]. Assim são calculados os graus de evidência:

$$\mu_a = \frac{T_a - T_{min}}{T_d - T_{min}} \quad (2.19)$$

Sendo:

μ_a : Grau de evidência favorável para a leitura da temperatura atual

T_a : Temperatura atual lida pelo sensor

T_{min} : Temperatura mínima de leitura pelo sensor de temperatura. Nesse caso 0 °C.

T_d : Temperatura desejada que o aquecedor alcance, estabelecida em 37 °C.

A normalização pode ser realizada diretamente, desde que todas as variáveis da Equação 2.19 estejam na mesma grandeza e na mesma escala, assim os graus de evidência não apresentam dimensão.

Substituindo as variáveis em 2.19:

$$\mu_a = \frac{20 - 0}{37 - 0} = 0,54 \quad (2.20)$$

Para o valor de μ_a da Equação 2.20 podemos afirmar que *crê-se com grau de evidência favorável que foi atingido 54% do percurso para a proposição ser verdadeira*. Como se pode ver, a temperatura inicial proposta foi de 20°C que é pouco mais da metade da temperatura desejada de 37°C, caso seja alterada a temperatura desejada para 50°C, o valor de μ_d seria de 0,4, ou seja, a variável atual seria 40 % do valor desejado.

Calculando o grau de evidência desfavorável:

$$\lambda_a = 1 - \mu_a \quad (2.21)$$

Substituindo as variáveis:

$$\lambda_a = 1 - 0,54 = 0,46 \quad (2.22)$$

O que resulta em uma anotação para a leitura de temperatura atual de:

$$(\mu_a, \lambda_a) = (0,54, 0,46) \quad (2.23)$$

Calcula-se então o Grau de Contradição (Equação 2.11) e o Grau de Certeza (Equação 2.15) cruzando os dados das anotações da seguinte forma:

$$G_{ct} = \mu_d + \lambda_a - 1 \quad (2.24)$$

$$G_c = \mu_d - \lambda_a \quad (2.25)$$

Substituindo (2.20) e (2.22) em (2.24):

$$G_{ct} = 1 + 0,46 - 1 = 0,46 \quad (2.26)$$

Substituindo (2.20) e (2.22) em (2.25):

$$G_c = 1 - 0,46 = 0,54 \quad (2.27)$$

Graficamente pode ser representado como na Figura 2.15.

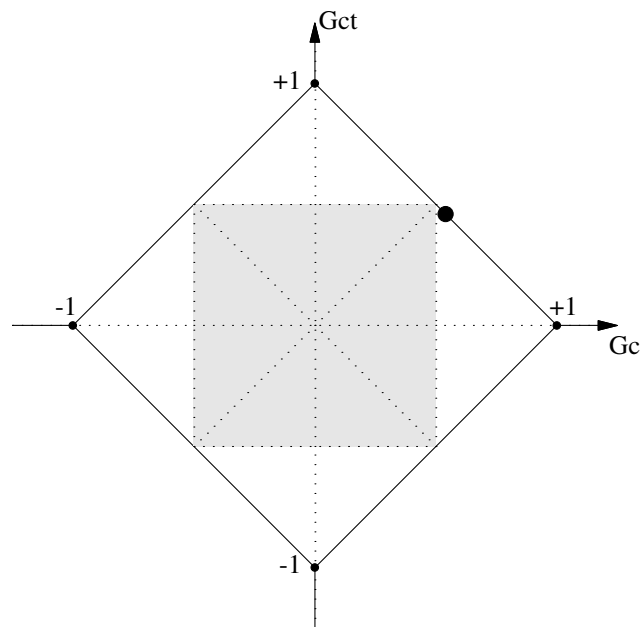


Figura 2.15: Representação de $G_c = 0.54$ e $G_{ct} = 0.46$

Capítulo 3

Sistema eletrônico

3.1 Atuador

3.2 Drive

3.3 Sensor

3.4 Controlador

3.5 Programação

Capítulo 4

Apresentação e discussão dos resultados

4.1 A construção do sistema de controle

A construção dos sistema de controle possui de um modo geral três grandes etapas, sendo a primeira o momento de estabelecimento dos objetivos, das variáveis de controle e especificações do sistema. Em um segundo momento é estabelecida a configuração do sistema e é gerado um modelo do sistema a partir dos modelos de suas partes. Finalmente é feito o desenvolvimento do controle do sistema, simulação e análise. Caso o sistema ainda não atenda os requisitos, uma nova interação deve ser executada partindo do segundo momento.

4.1.1 Estabelecer os objetivos do controle

Mostrar o comportamento do sistema sem controle.

Gráficos de comportamento atual x comportamento desejado

4.1.2 Identificar a variável a ser controlada

4.1.3 Escrever as especificações

4.1.4 Estabelecer a configuração do sistema

4.1.5 Obter um modelo do processo e suas partes

4.1.6 Descrever o controlador e parâmetros de ajuste

4.1.7 Otimizar parâmetros e analisar performance

Capítulo 5

Considerações Finais - Conclusão

Conclui-se que

typesetting systems: L^AT_EX

Referências Bibliográficas

BRITANNICA, E. Biography - ctesibius of alexandria.

DORF, R. C. and BISHOP, R. H. (2011). *Modern control systems*. Pearson.

FERREIRA, C. (2012). Estudo comparativo entre as técnicas de controle fuzzy, pi e adaptativo aplicado ao processo de fabricação de papel reciclado utilizando a ferramenta delta tune. Master's thesis.

GRAMATICA.NET. Origem das palavras.

KRAUSE, D. (2015). Lógica paraconsistente.

OGATA, K. (2010). *Modern Control Engineering*. Prentice Hall, 5ª edition.

SILVA FILHO, J. I. (2006). Métodos de aplicações da lógica paraconsistente anotada de anotação com dois valores-lpa2v.