

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA

JOSÉ WILLIAM RODRIGUES PEREIRA

CONTROLE DE SISTEMA DINÂMICO UTILIZANDO LÓGICA  
PARACONSISTENTE ANOTADA DE ANOTAÇÃO COM DOIS VALORES (LPA2v)

SÃO PAULO  
2017

JOSÉ WILLIAM RODRIGUES PEREIRA

CONTROLE DE SISTEMA DINÂMICO UTILIZANDO LÓGICA  
PARACONSISTENTE ANOTADA DE ANOTAÇÃO COM DOIS VALORES (LPA2v)

Qualificação apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia como requisito parcial para posterior defesa e obtenção do grau de Mestre em Automação e Controle de Processos

Orientador: Profº Dr. Tarcisio Fernandes Leão

JOSÉ WILLIAM RODRIGUES PEREIRA

CONTROLE DE SISTEMA DINÂMICO UTILIZANDO LÓGICA  
PARACONSISTENTE ANOTADA DE ANOTAÇÃO COM DOIS VALORES (LPA2v)

Qualificação apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia como requisito parcial para posterior defesa e obtenção do grau de Mestre em Automação e Controle de Processos

Orientador: Profº Dr. Tarcisio Fernandes Leão

Aprovado pela banca examinadora em dd/mm/aaaa

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profº Dr. Tarcisio Fernandes Leão  
Orientador

---

Profº Dr. Alexandre Brincalepe Campo

---

Profº Dr. João Inácio da Silva Filho

# Resumo

Sistemas de Controle são amplamente utilizados no setor industrial e buscam uma maior eficiência de tempo e energia, mantendo uma qualidade dos processos e do sistema controlado. O objetivo deste estudo é mostrar uma implementação não convencional de um controle em malha fechada utilizando a Lógica Paraconsistente anotada de anotação com dois valores (LPA2v), de forma a atender requisitos específicos de desempenho em um sistema físico proposto. O desenvolvimento de técnicas classificadas como Inteligência Artificial fez surgirem outras opções para o controle de sistemas, contudo ainda há escassez de implementações e testes usando técnicas alternativas. Os estudos e os resultados iniciais mostram um grande potencial para a implementação e exploração da LPA2v em sistemas de controle, de forma semelhante as técnicas mais difundidas como uma Lógica Fuzzy, Redes Neurais, Controle Adaptativo ou Algoritmo Evolutivo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Controle Não Convencional; Lógica Paraconsistente; Técnicas de Controle

# Abstract

Control Systems are widely used in the industrial sector and seek greater efficiency of time and energy, maintaining a quality of processes and system controlled. The objective of this study is to show an unconventional implementation of a closed loop control using the Paraconsistent Annotated Logic of annotation with two values (PAL2v) in order to meet specific performance requirements in a proposed physical system. The development of techniques classified as Artificial Intelligence has given rise to other options for the control of systems, however there is still a shortage of implementations and tests using alternative techniques. The studies and the initial results show a great potential for the implementation and exploration of LPA2v in control systems, similar to the most widespread techniques such as Fuzzy Logic, Neural Networks, Adaptive Control or Evolutionary Algorithm.

**KEYWORDS:** Unconventional control; Paraconsistent logic; Control Techniques;

# Lista de Figuras

2.1	Diagrama de blocos de sistema de controle . . . . .	16
2.2	Gráfico da função Resposta . . . . .	17
2.3	Reticulado finito de Hasse . . . . .	20
2.4	Representação do reticulado no quadrado unitário no plano cartesiano .	22
2.5	Representação da Reta Perfeitamente Definida . . . . .	23
2.6	Representação da Reta Perfeitamente Indefinida . . . . .	24
2.7	Representação dos Graus de Certeza e Contradição em um plano cartesiano	26
2.8	Representação dos valores de controle . . . . .	26
2.9	Representação do reticulado da LPA2v subdividido em 12 regiões . . . .	27
2.10	Representação do reticulado da LPA2v subdividido em 8 regiões . . . .	28
2.11	Representação do Grau de Certeza Real no reticulado . . . . .	29
3.1	Motor DC . . . . .	33
3.2	Placa de desenvolvimento: microcontrolador com núcleo ARM-Cortex M4	34
4.1	Visão geral do sistema . . . . .	37
4.2	Sistema de controle em malha aberta . . . . .	38
4.3	Sistema de Primeira Ordem . . . . .	39
4.4	Constante de tempo . . . . .	40
4.5	Ação de Controle em Malha Aberta . . . . .	41

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>12</b>
1.1	Hipótese e Relevância do Trabalho . . . . .	13
1.2	Objetivo Geral . . . . .	13
1.3	Objetivos Específicos . . . . .	14
1.4	Justificativa . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>15</b>
2.1	Diagrama de Blocos . . . . .	15
2.2	Ação de Controle . . . . .	16
2.3	Controle Moderno Não Convencional	
	Lógica Paraconsistente . . . . .	18
2.3.1	Reticulado de Hasse . . . . .	19
2.3.2	Quadrado Unitário no Plano Cartesiano - QUPC . . . . .	22
2.3.3	A LPA2v aplicada em Controle . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>32</b>
3.1	A construção do sistema de controle físico . . . . .	33
3.2	Obter um modelo do processo . . . . .	34
3.3	Estudar a LPA2v . . . . .	35
3.4	Implementar um controlador utilizando LPA2v . . . . .	35
3.4.1	Estabelecer a configuração do sistema . . . . .	35
3.4.2	Descrever o controlador e parâmetros de ajuste . . . . .	36
3.5	Otimizar parâmetros e analisar performance . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Resultados Preliminares</b>	<b>37</b>
4.1	Construção de um sistema físico para controle . . . . .	37
4.2	Obtenção de um modelo do processo . . . . .	37
4.2.1	Qualidade do modelo . . . . .	41
4.2.2	Etapas a serem desenvolvidas . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Cronograma</b>	<b>44</b>

# 1. Introdução

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

Segundo o Dr. KRAUSE(2004), professor e pesquisador do departamento de Filosofia da Universidade Federal de Santa Catarina: "Alguns dos campos mais férteis de aplicação dessas lógicas têm sido a ciência da computação, a engenharia e a medicina."e cita ainda que:

"... na inteligência artificial essas lógicas foram usadas a partir da década de 1980 por H. Blair e V. S. Subrahmanian, da Universidade de Siracusa, Estados Unidos, e colaboradores, na elaboração de sistemas para serem utilizados especialmente em medicina."

A Lógica Clássica, que utiliza um modelo lógico binário, foi de forma muito natural adaptado ao funcionamento dos transistores utilizados como chave liga/desliga, e este funcionamento embasou toda a tecnologia digital que vemos hoje em dia, baseada em princípios bem definidos e reais. Assim, surge a indagação sobre a utilização de Lógicas Paraconsistentes aplicadas ao mundo real como cita DA SILVA FILHO; ABE(2011):

Dentro desta percepção, surge a ideia da possibilidade real de um Sistema Lógico Paraconsistente que, assim como na lógica clássica, é um conjunto de axiomas e regras de inferência que objetivam representar formalmente raciocínio válido. Sendo assim, o Sistema Lógico Paraconsistente pode ser representado através de um algoritmo que tem sua utilização como o núcleo de um programa computacional com aplicações diretas em sistemas de Inteligência Artificial.

Algumas das Lógicas Paraconsistentes ainda não tiveram uma abordagem prática de sua implementação, ou ainda, tais abordagens são muito escassas, seja com dispositivos simples ou com os mais complexos.



Visando uma melhor compreensão da Lógica Paraconsistente, e vislumbrando sua utilização em controle de sistemas dinâmicos utilizando um ramo denominado Lógica Paraconsistente Anotada de Anotação com dois valores (LPA2v), pressupõe-se um estudo de uma aplicação inicial como forma de desbravar uma nova possibilidade da utilização de um algoritmo que vem sendo aplicado com sucesso em Inteligência Artificial no segmento de Controle.

## 1.1 Hipótese e Relevância do Trabalho

A Lógica Paraconsistente Anotada de anotação com dois valores (LPA2v) pode ser utilizada para o controle de sistemas dinâmicos, hipótese esta que confirmada pode elevar ainda mais a sua relevância e elencar mais uma alternativa para aplicações técnicas e científicas.

A lógica paraconsistente vem ganhando relevância e adeptos principalmente a 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, 2004).

Em meados de setembro de 2016, aconteceu o pela primeira vez no Brasil a XVI Conferência Internacional de Lógica: Tendências da Lógica (*Trends In Logic XVI - Studia Logica International Conference*) (BUENO-SOLER; CARNIELLI; TESTA, 2016), realizada pelo Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência (CLE) da Universidade Estadual de Campinas, que reuniu estudiosos brasileiros e de diversos países com trabalhos e apresentações sob o tema: Consistência, Contradição, Paraconsistência e Racioncínio (*Consistency, Contradiction, Paraconsistency, and Reasoning*).

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.

## 1.2 Objetivo Geral

Estudar a LPA2v e desenvolver um algoritmo que possa ser embarcado para atuar no controle dinâmico de um sistema físico.

## 1.3 Objetivos Específicos

Realizar a construção de um sistema físico para o controle de velocidade em um motor DC, de modo a utilizá-lo para a realização dos ensaios.

Implementar o algoritmo da LPA2v proposto na literatura de referência, codificando-o e criando uma biblioteca para sua utilização junto ao sistema físico.

Desenvolver a malha de controle do sistema físico proposto utilizando o algoritmo da LPA2v.

## 1.4 Justificativa

A função primordial do presente trabalho é realizar uma análise da implementação de uma lógica não-convencional, contribuindo para a ampliação do conhecimento em uma nova forma de lidar com o mundo e gerar aplicações em uma área ainda pouco explorada pela LPA2v, o controle de sistemas.

A visão aristotélica cunhou a forma lógica de lidar com o mundo, estabelecendo regras que permearam a história até o presente momento, mas que, no século XX foram questionadas, procurando-se novas formas e ferramentas para tratar de questões que fogem das regras vigentes. A Lógica Paraconsistente é uma das ferramentas que permite o tratamento de contradições e incertezas, que estão além dos limites da lógica clássica.

A LPA2v é a uma vertente da Lógica Paraconsistente que vem sendo explorada para finalidades práticas, tais como o reconhecimento de padrões em banco de dados, tomada de decisão e tratamento de incertezas em sistemas robóticos e logísticos, mas todas as áreas com uma abordagem ligada à Inteligência Artificial ou ao controle discreto do processo, ainda há escassez de trabalhos no controle contínuo de sistemas dinâmicos.

A análise da implementação da LPA2v no universo das lógicas não-convencionais implica em possibilitar uma nova forma de controle de sistemas, sua definição permite um embasamento para criar novas possibilidades de seu uso, e ajudar a sedimentar a nova ferramenta no meio acadêmico.

## 2. Revisão Bibliográfica

A modificação, de forma controlada, no comportamento de um sistema, garantindo uma maior eficiência é o objetivo do controle de sistemas, que é estudado desde os antigos, mas que obteve grande relevância na necessidade trazida com a revolução industrial, e hoje conta com o seu segmento específico da engenharia, com diversos trabalhos nessa área e uma infinidade de aplicações.

A principal tarefa de um engenheiro é, segundo DORF; BISHOP(2011), "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 a configuração, as especificações e a identificação de processos para atender uma necessidade real.

Uma concepção semelhante é trazida por NISE(2009) 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".

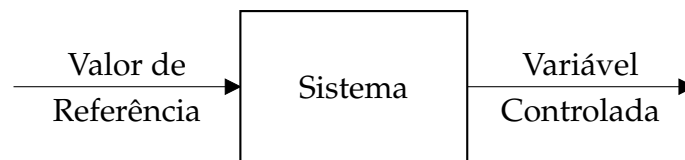
Os sistemas de controle atuam basicamente gerando respostas específicas para estímulos específicos de forma controlada e automática, trazendo vantagens nas aplicações em diversas áreas, tais como, na movimentação de grandes equipamentos com precisão, em locais remotos ou perigosos, na compensação de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

### 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 composto 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 de blocos 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.

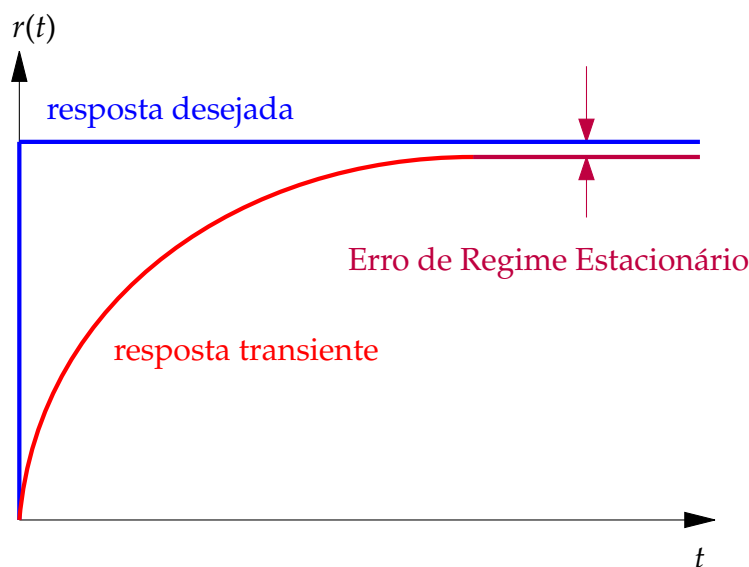
Em OGATA(2010) - Capítulo 3.3 - são encontradas definições, comentários sobre vantagens, aplicações e procedimento para construção de Diagramas de blocos, assim como a representação de sistemas em malha aberta, malha fechada, perturbações, técnicas e regras da álgebra de blocos.

## 2.2 Ação de Controle

A ação de controle é a forma como se busca 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 associados a velocidade de resposta, presença ou não de oscilações na estabilização 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 2.2, 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 2.2:** 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 aos 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, convencional ou não-convencional, 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.

Em DORF; BISHOP(2011) - Capítulo 7.6 - *PID Controllers* é abordado o controlador PID, uma das principais soluções e a mais encontrada em aplicações industriais segundo OGATA(2010), que trata do mesmo tema e as versões de PID modificados no Capítulo 10 de seu trabalho. Ações de controle do tipo PID são responsáveis por controlar a planta e atender aos requisitos de desempenho desejados ao sistema.

## 2.3 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, 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, 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-presente data) e Stanislaw Jaskiowski(1906-1965), que propuseram e desenvolveram sistemas lógicos que fossem capazes de lidar com essas inconsistências (KRAUSE, 2004).

Ao restringir-se o princípio da não contradição, em um certo sistema lógico, obtém-se um resultado que pertence à lógica denominada Paraconsistente, desenvolvida por da Costa e Jaskiowski.

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 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.

### 2.3.1 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 Costa, Subrahmanian e Vago propuseram a lógica paraconsistente anotada e sua extensão a uma lógica de predicados paraconsistente anotada de primeira ordem.

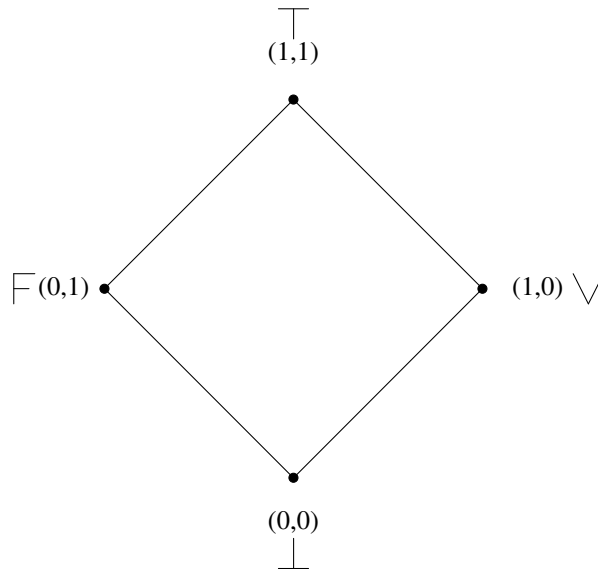
Nas Lógicas Paraconsistentes Anotadas, uma proposição  $P$  utiliza um reticulado formado por pares ordenados tal que:

$$\tau = \{(\mu, \lambda) \mid \mu, \lambda \in [0, 1] \subset \mathbb{R}\} \quad (2.1)$$

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

$$\tau = \{\top, \vee, \wedge, \perp\} \quad (2.2)$$

os quais descrevem os extremos do reticulado como sendo inconsistente, verdadeiro, falso e paracompleto, respectivamente, e são representadas conforme Figura 2.3;



**Figura 2.3:** Reticulado finito de Hasse

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

Como exemplificação, para uma proposição  $P \equiv "A \text{ velocidade de rotação do motor atingiu o valor desejado}."$ , assume-se dois especialistas para realizarem a leitura dos valores da anotação. Em um sistema físico, os especialistas geralmente são sensores, como neste caso, poderia ser um encoder ou sensor óptico como contador de voltas associado a uma base de tempo.

- $\mu$  = 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  $P$ ;

- $\lambda$  = 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 velocidade de rotação do motor 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 velocidade de rotação do motor 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 velocidade de rotação do motor 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 velocidade de rotação do motor 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 velocidade rotação do motor atingiu do valor desejado*.

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

$$\sim: | \tau | \mapsto | \tau, \sim (\mu, \lambda) = (\lambda, \mu) \quad (2.3)$$

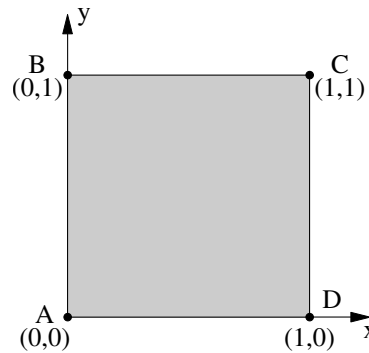
Então,

$$P_{(0.8,0.3)} \leftrightarrow \sim P_{(0.3,0.8)} \quad (2.4)$$

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

### 2.3.2 Quadrado Unitário no Plano Cartesiano - QUPC

Uma outra forma de representação da anotação é utilizando o Quadrado Unitário no Plano Cartesiano (QUPC) no qual 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 2.4.

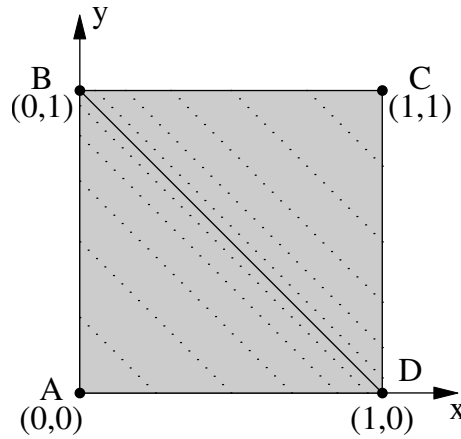


**Figura 2.4:** Representação do reticulado no quadrado unitário no plano cartesiano

Os pontos extremos assim representam:

- $A : (0, 0) = \perp \Rightarrow$  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 2.5, é denominada de *Reta Perfeitamente Definida* e dada uma anotação  $(\mu, \lambda)$  situada nela, a soma das evidências anotadas é sempre o valor unitário do quadro.



**Figura 2.5:** Representação da Reta Perfeitamente Definida

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

$$\mu + \lambda = 1 \quad (2.5)$$

Assim, temos que:

$$\mu + \lambda - 1 = 0 \quad (2.6)$$

Os graus de evidência não precisam apresentar valores complementares, possuem independência entre si, assim das Equações 2.5 e 2.6 é elaborado o conceito de *Grau de Contradição* ( $G_{ct}$ ), e temos que:

$$G_{ct} = \mu + \lambda - 1 \quad (2.7)$$

pois quanto mais próximo da Reta Perfeitamente Definida, menor é o grau de contradição apresentado pelos graus de evidência, sendo zero quando não houver contradição e o ponto de anotação situar-se sobre a Reta Perfeitamente Definida. Quanto mais afastado da Reta Perfeitamente Definida estiver o ponto de anotação, 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

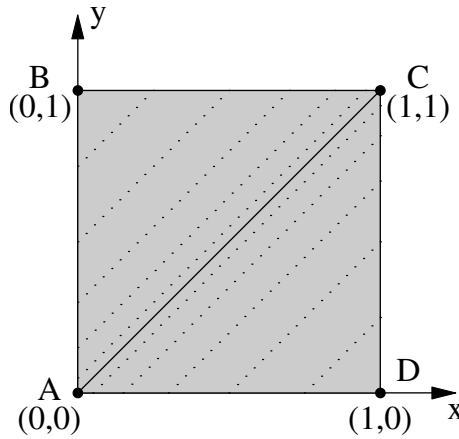
perfeitamente definida, o Grau de Contradição é denominado *Grau de Inconsistência* ( $G_{it}$ ), e isso ocorre quando,  $\mu \geq \lambda$ , de forma oposta, quando  $\mu < \lambda$  a anotação está situada na região entre os pontos BAD, abaixo da reta perfeitamente definida, e o grau de contradição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

$$-1 \leq G_{id} < 0 \leq G_{it} \leq 1 \quad (2.8)$$

e

$$-1 \leq G_{ct} \leq 1 \quad (2.9)$$

O segmento de reta  $\overline{AC}$ , entre os pontos referentes às condições *Para completo* e *Contradição*, conforme mostrado na Figura 2.6, é denominada de *Reta Perfeitamente Indefinida* e dada uma anotação  $(\mu, \lambda)$  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  $\mu \neq \lambda$ .



**Figura 2.6:** Representação da Reta Perfeitamente Indefinida

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

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

De forma análoga ao Grau de Contradição, da Equação 2.10 é elaborado o conceito de

*Grau de Certeza* ( $G_c$ ), assim temos que:

$$G_c = \mu - \lambda \quad (2.11)$$

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:

$$-1 \leq G_f < 0 \leq G_v \leq 1 \quad (2.12)$$

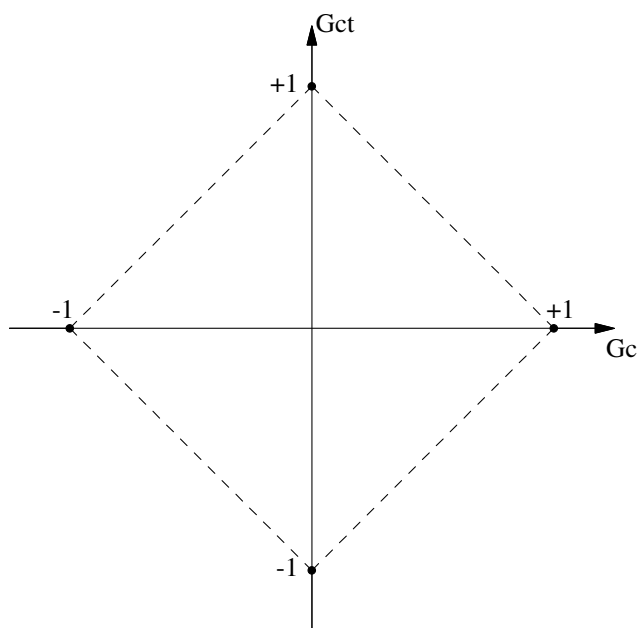
e

$$-1 \leq G_c \leq 1 \quad (2.13)$$

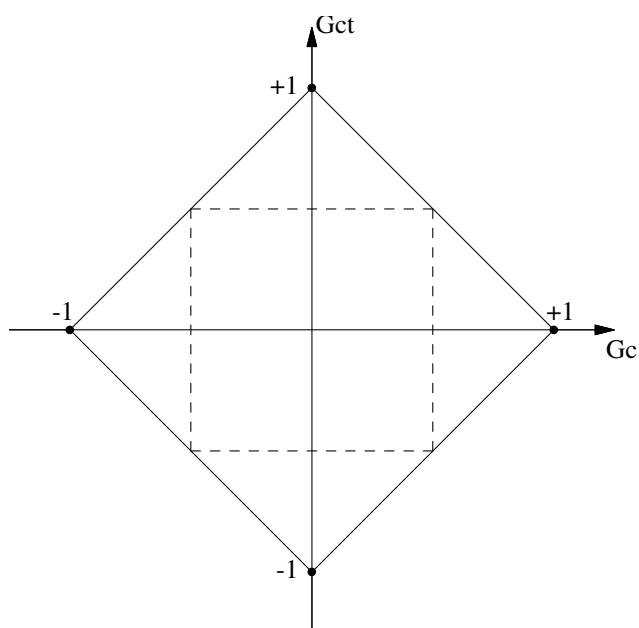
Graficamente são representadas como mostra a Figura 2.7:

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 2.8 e são definidos como:

- $V_{scc}$  : Valor limite superior de Controle de Certeza;
- $V_{icc}$  : Valor limite inferior de Controle de Certeza;
- $V_{sci}$  : Valor limite superior de Controle de Incerteza;
- $V_{sai}$  : Valor limite inferior de Controle de Incerteza.



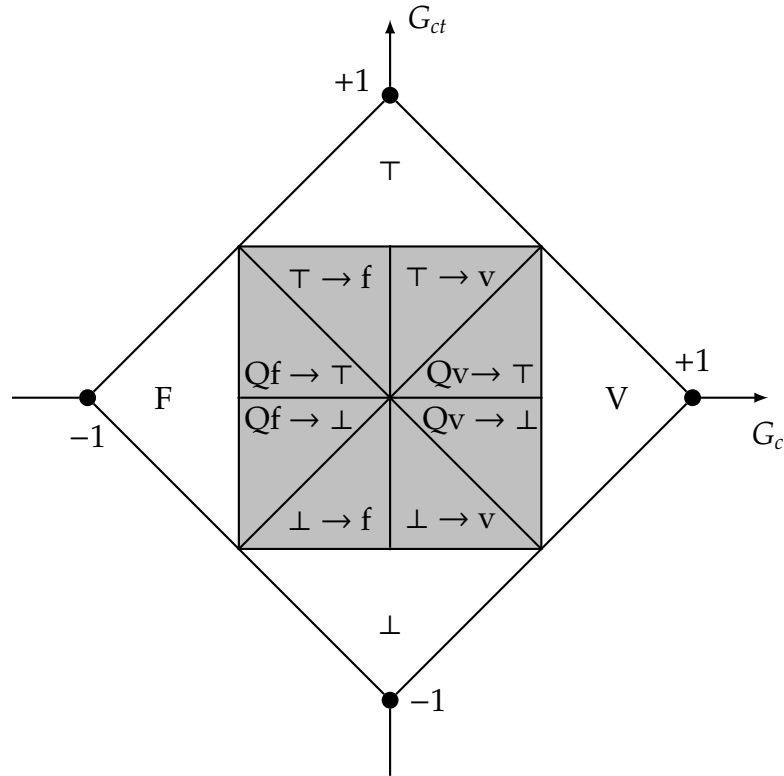
**Figura 2.7:** Representação dos Graus de Certeza e Contradição em um plano cartesiano



**Figura 2.8:** Representação dos valores de controle

Uma divisão em 12 partes é mostrada na Figura 2.9 com seus respectivos estados intermediários definidos conforme DA SILVA FILHO(2006), sendo 4 regiões extremas:

- V : Verdadeiro;
- F : Falso;
- $\top$  : Contradição;
- $\perp$  : Paracompleto.



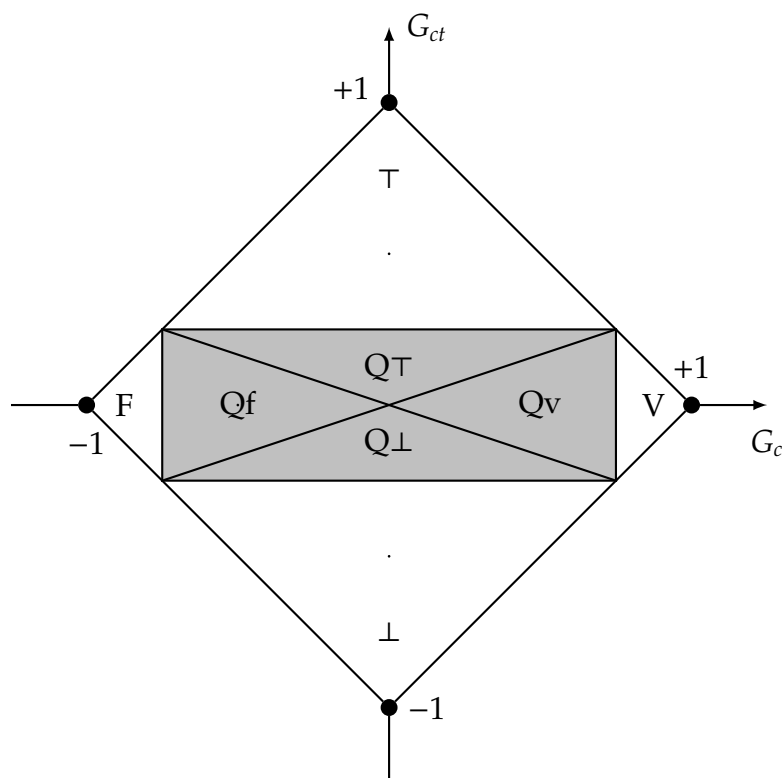
**Figura 2.9:** Representação do reticulado da LPA2v subdividido em 12 regiões

e 8 regiões intermediárias:

- $Qv \rightarrow T$  : Quase Verdade tendendo à Contradição;
- $Qv \rightarrow \perp$  : Quase Verdade tendendo à Paracompleto;
- $Qf \rightarrow T$  : Quase Falso tendendo à Contradição;
- $Qf \rightarrow \perp$  : Quase Falso tendendo à Paracompleto;
- $T \rightarrow f$  : Contradição tendendo à Falso;
- $T \rightarrow v$  : 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 nas quais 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.

O reticulado pode ser dividido de outras formas, dependendo dos limites dos Graus de Certeza e Contradição que o sistema permite. A Figura 2.10 mostra uma das possibilidades com a representação de 8 regiões do reticulado.



**Figura 2.10:** Representação do reticulado da LPA2v subdividido em 8 regiões

Sendo 4 regiões extremas,

- V : Verdadeiro;
- F : Falso;
- $\top$  : Contradição;
- $\perp$  : Paracompleto.

e 4 regiões intermediárias:

- Qv: Quase Verdade;
- Qf: Quase Falso;
- QT: Quase Contradição;
- Q $\perp$ : Quase Paracompleto.

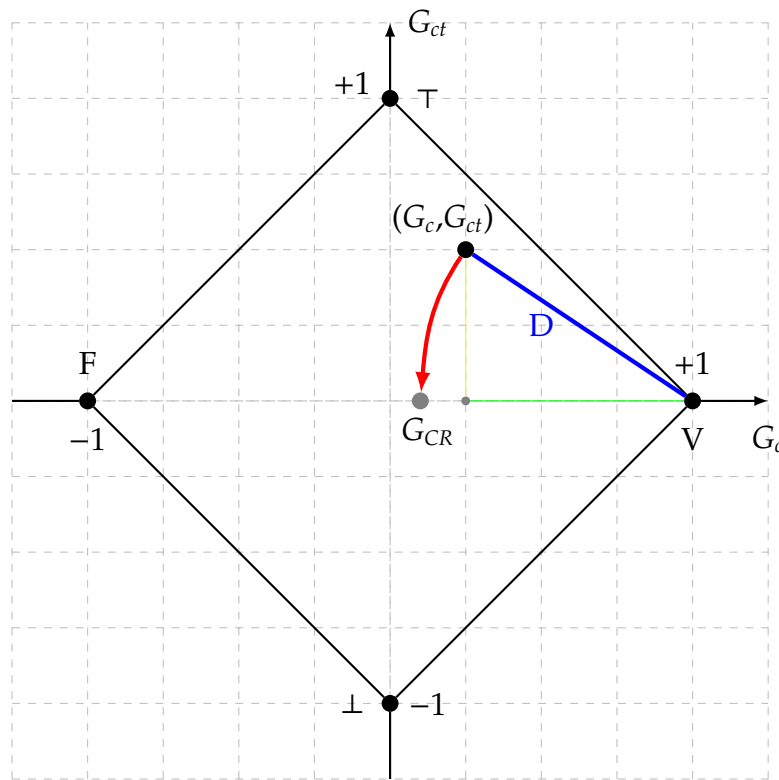
É possível e desejável que se possa utilizar um valor resultante que exclua os efeitos



das incertezas ou contradições, como é citado por ABE; FILHO; TORRES(2008):

“Um sistema de decisão capaz de analisar dados originários de Conhecimento Incerto terá maior robustez quando, ao final da análise, apresentar um resultado que represente o valor de certeza puro, isto é, não contaminado pelos efeitos das incertezas.”

O valor que elimina o efeito da incerteza é denominado *Grau de Certeza Real* -  $G_{CR}$  e é calculado pela distância ( $D$ ) do Ponto de análise,  $(G_c, G_{ct})$ , em relação ao ponto de máximo Grau de Certeza  $V$ , no vértice direito do reticulado, conforme mostrado na Figura 2.11.



**Figura 2.11:** Representação do Grau de Certeza Real no reticulado

O Grau de Certeza Real ( $G_{CR}$ ) é calculado utilizando o Teorema de Pitágoras para achar a distância  $D$  conforme Equação 2.14.

$$D = \sqrt{(1 - |G_c|)^2 + G_{ct}^2} \quad (2.14)$$

Para valores de  $G_c \geq 0$ :

$$G_{CR} = (1 - D) \quad (2.15)$$

Para valores de  $G_c < 0$ :

$$G_{CR} = (D - 1) \quad (2.16)$$

Tanto o Grau de Evidência Real quanto os estados ou regiões do reticulado podem ser utilizados para realizar o controle dos mais diversos tipos de sistemas, dependendo apenas do tipo de controle e de sistema que deve ser implementado.

### 2.3.3 A LPA2v aplicada em Controle

Os Sistemas Inteligentes estão cada vez mais presentes em diversas aplicações modernas, e segundo DA SILVA FILHO; ABE(2011), há um predomínio de Lógicas Não-Clássicas no suporte à tomada de decisão desses sistemas. O sucesso na aplicação de técnicas como a LPA2v, que é uma extensão da Lógica Paraconsistente Anotada, se dá em grande medida pelo uso de algoritmos baseados em estudos dos reticulado representativo e efetiva tradução matemática gerando um modelo eficiente aplicado em situações reais.

Tomando que a lógica filosófica trata da descrição formal da linguagem natural e define a sua estrutura de declaração, então, sendo encontrada a linguagem adequada é possível traduzir o raciocínio formal em LPA, modelando raciocínios com a possibilidade de tratar contradições ou incoerências, e trabalhar com situações reais, da mesma forma que o Modelo Clássico, que aplica regras computacionais, a LPA2v possui um conjunto de axiomas e regras de inferência que possibilitam um raciocínio válido em situações reais.

Os algoritmos baseados no estudo do Reticulado Representativo gera Estados Lógicos Paraconsistentes através da descrição do algoritmo Para-Analisador da LPA2v, possibilitando que o sistema receba informação através dos graus de evidência  $(\mu, \lambda)$ , processe os graus de certeza e contradição  $(G_c, G_{ct})$  e chegue a uma conclusão, de alta contradição e busque por mais dados ou um alto grau de certeza, que de um modo geral, implica em tomar uma ação.

Os Graus de Certeza e Contradição podem gerar um Grau de Certeza Real, que pode servir de entrada para outra célula ou Nó de Análise Paraconsistente (NAP), possibilitando uma rede de análises para a tomada de decisão, como apresentado pelo Professor Dr. João Inácio da Silva Filho com a construção do Robô Emmy, desenvolvendo e aplicando tais técnicas aplicadas ao sistema de movimentação.

### 3. Metodologia

A construção dos sistema de controle possui de um modo geral três grandes etapas, segundo DORF; BISHOP (2011), 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.

Objetivando a utilização da LPA2v como um controlador para um sistema dinâmico, e considerando algumas particularidades do projeto proposto, faz-se necessário:

- Construir um sistema de controle físico;
- Obter um modelo do processo;
  - Estabelecer os objetivos do controle;
  - Identificar a variável a ser controlada;
- Estudar a LPA2v;
- Implementar um controlador utilizando LPA2v;
  - Estabelecer a configuração do sistema;
  - Descrever o controlador e parâmetros de ajuste;
- Otimizar parâmetros e analisar performance;

### 3.1 A construção do sistema de controle físico

O sistema físico escolhido para o controle foi um motor de corrente contínua, pelo fato de possuir um controle de velocidade simples, bastando alterar a tensão aplicada aos terminais de alimentação, o que geralmente é feito utilizando modulação por largura de pulso (PWM) da tensão de alimentação.



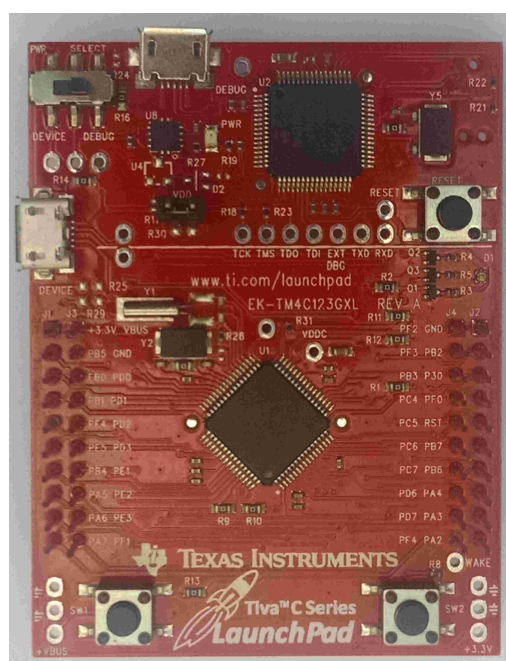
Figura 3.1: Motor DC

Diferente de sistemas fluídicos, as dimensões do protótipo podem ser pequenas, possibilitando uma montagem de uma pequena área em bancada e fácil transporte ou ainda comparando com sistemas térmicos, o tempo de resposta é rápida, possibilitando um tempo de testes pequeno e aquisições mais rápidas ao longo do desenvolvimento do projeto.

Para o estudo proposto foi escolhida uma placa de desenvolvimento da Texas Instruments de modelo Tiva<sup>TM</sup> TM4C123GH6PM, devido ao fato de que ela possui um controlador de 32bits, núcleo ARM, e permite operações utilizando ponto flutuante, entre outras características como elencadas a seguir:

- Núcleo (Core): ARM Cortex-M4F;
- Performance: 80 MHz em operação;
- Flash: 256 KB;
- Interface de comunicação:
  - Universal Asynchronous Receivers/Transmitter(UART);
  - Inter-Integrated Circuit (I<sup>2</sup>C);

- Universal Serial Bus (USB);
- Periféricos:
  - General-Purpose Input/Output (GPIO);
  - General-Purpose Timer (GPTM);
  - Módulo PWM: Pulse Width Modulator (PWM);



**Figura 3.2:** Placa de desenvolvimento: microcontrolador com núcleo ARM-Cortex M4

A programação do firmware, que irá embarcar o sistema de controle, será feita utilizando ferramentas em software livre, inclusive o sistema operacional GNU/Linux Debian 8, programação em linguagem C utilizando o compilador dedicado para microcontroladores de núcleo ARM, Cross GNU ARM (arm-none-eabi-gcc), assim como editor de texto Vim, terminal de comunicação Mini com, processador de gráficos GNUPlot e processador de texto  $\text{\LaTeX}$ .

## 3.2 Obter um modelo do processo

Obter a curva de comportamento do sistema para estabelecer a função de transferência do sistema, e com isso, estabelecer os objetivos do controle e identificar a variável a ser controlada.

A obtenção da curva característica se dá pela aquisição sucessiva do intervalo de cada

rotação, mensurado a partir de um contador de tempo configurado adequadamente.

O objetivo do desenvolvimento proposto, é realizar o controle da velocidade de rotação do disco acoplado ao eixo do motor, de forma a garantir que a curva característica de velocidade apresente tempo de subida igual ou menor do que um quinto do tempo em malha aberta, sobressinal de no máximo 10% e erro de regime estacionário inferior a 5%, valores estes que atendem as expectativas iniciais para uma primeira implementação.

A variável controlada é a velocidade angular na forma de rotações por segundo (rps) e a variável manipulada é a tensão média aplicada ao motor através da técnica de Modulação por Largura de Pulso, do inglês *Pulse Width Modulation* - PWM.

Assumindo que o sistema físico não tem uma aplicação crítica, é razoável propor um erro de 5% para o modelo da planta, principalmente por se tratar de uma primeira abordagem proposta, sendo o intuito principal estabelecer um algoritmo ou modelo utilizando a LPA2v que atenda minimamente os requisitos de desempenho do sistema.

### **3.3 Estudar a LPA2v**

Baseado em trabalhos acadêmicos, artigos e livros sobre o assunto, compreender como é feita a implementação da LPA2v em tomadas de decisão contendo estados bem definidos.

### **3.4 Implementar um controlador utilizando LPA2v**

Implementar um controlador simples, utilizando o modelo com reticulado com subdivisões, conforme trabalhos estudados.

Alterar a tomada de decisão do controlador baseado em estados, por um controlador que calcula a distância entre o ponto de operação e a referência, que é a extremidade com grau de certeza máximo, e atuar sobre o sistema de forma proporcional a essa distância.

#### **3.4.1 Estabelecer a configuração do sistema**

Estudar parâmetros necessários e limitações de configuração do controlador.

### **3.4.2 Descrever o controlador e parâmetros de ajuste**

Descrever em detalhes o funcionamento do controlador e estabelecer regras e sequencia de variáveis a serem parametrizadas para que o modelo do controlador possa ser reproduzido em outros momentos e situações.

## **3.5 Otimizar parâmetros e analisar performance**

Verificar empiricamente se os valores testados estão adequados aos requisitos de desempenho do sistema que foram previamente estabelecidos.



## 4. Resultados Preliminares

### 4.1 Construção de um sistema físico para controle

O sistema físico, ou protótipo, foi desenvolvido utilizando a placa de desenvolvimento da Texas Instruments, modelo *Tiva™* TM4C123GH6PM, drive para acionamento do motor utilizando PWM, motor DC acoplado a um CD, com uma etiqueta, Figura 4.1a, para acionar o sensor óptico e servir de indicador para contagem de giros do motor. Fonte de alimentação chaveada de 12V 10W. A maior parte do sistema pode ser visto na Figura 4.1b .

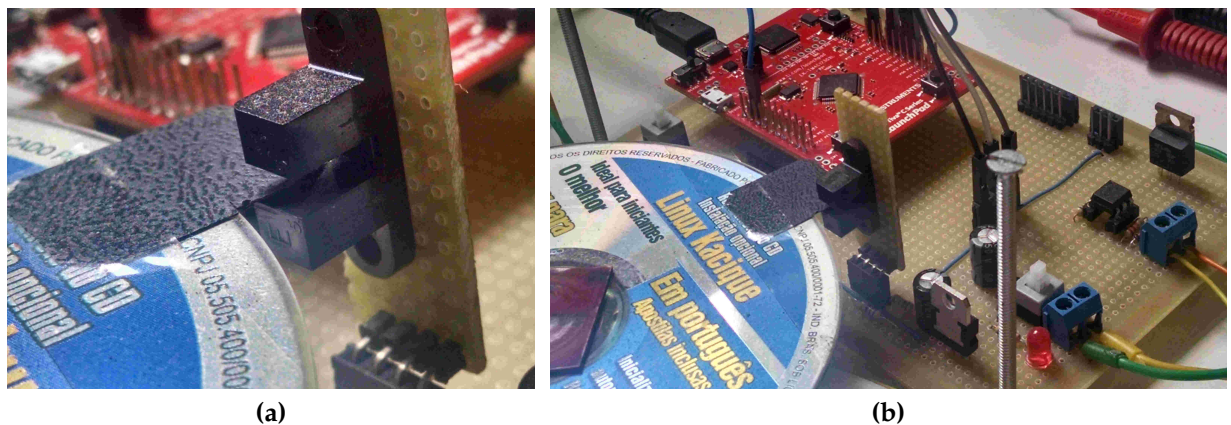


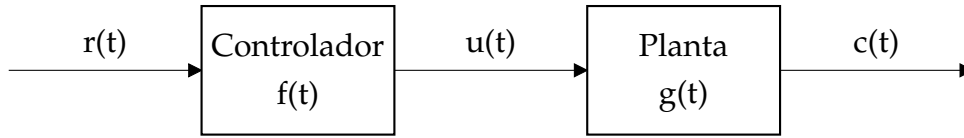
Figura 4.1: Visão geral do sistema

### 4.2 Obtenção de um modelo do processo

Para melhor compreensão dos modelos dinâmicos dos sistemas, é utilizado o Diagrama de blocos do comportamento do sistema em malha aberta, conforme Figura 4.2(OGATA, 2010).

Utilizando variáveis para cada elemento do Diagrama de blocos, de forma a representá-

los nas equações, temos então que:



**Figura 4.2:** Sistema de controle em malha aberta

Onde:

$r(t)$ : Valor de Referência em rotações por segundo [rps];

$f(t)$ : Controlador que converte rps em % PWM para acionar o motor;

$u(t)$ : Variável Manipulada é o valor percentual do PWM;

$g(t)$ : Planta ou Processo formado pelo motor DC com o disco acoplado no eixo;

$c(t)$ : Variável Controlada é a velocidade de rotação do eixo em rps.

O sistema físico aqui estudado possui comportamento exponencial que pode ser descrito pela equação 4.1.

$$\frac{dc(t)}{dt} + c(t) = r(t) \rightarrow \mathcal{L} \rightarrow \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{s + a} \quad (4.1)$$

Onde:

$t$  : tempo,  $r(t) = 0$  , para  $t < 0$ ;

$\mathcal{L}$  : Operador de Laplace;

$c(t)$  : Variável controlada no domínio do tempo;

$C(s)$  : Variável controlada no domínio da frequência;

$r(t)$  : Valor de referência (*setpoint*) no domínio do tempo;

$R(s)$  : Valor de referência (*setpoint*) no domínio da frequência.

$K$  : Constante de proporcionalidade;

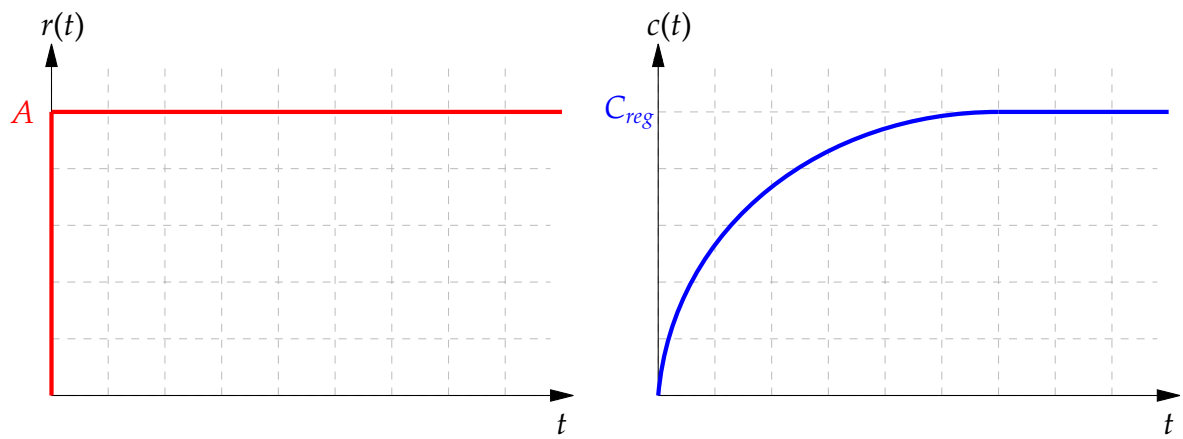
$s$  : Variável complexa de Laplace;

$a$  : Polo da função.

Sendo assim, para um estímulo de entrada do tipo **degrau**, com amplitude **A**, temos  $R(s) = \frac{A}{s}$  e aplicando a Transformada Inversa de Laplace:

$$C(s) = \frac{K}{s+a} \frac{A}{s} \rightarrow \mathcal{L}^{-1} \rightarrow c(t) = \frac{KA}{a}(1 - e^{-at}) \quad (4.2)$$

A Figura 4.3a mostra um sinal do tipo degrau com amplitude **A** aplicado ao sistema de teste, que responde conforme um sistema de primeira ordem como mostrado na Figura 4.3b.



(a) Sinal de entrada tipo degrau com amplitude A (b) Resposta transitória e regime de acomodação

**Figura 4.3:** Sistema de Primeira Ordem

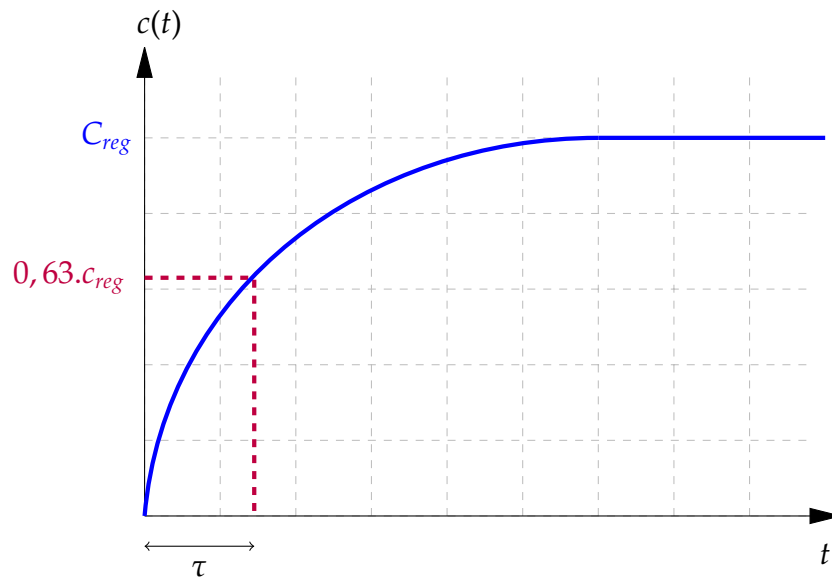
Matematicamente, quanto maior o valor de  $t$  na Equação 4.2, o resultado da exponencial tende a zero, levando a um resultado que depende apenas das constantes para o valor de referência.

Tomando  $t = \frac{1}{a} = a^{-1} = \tau$  para gerar um valor conhecido em  $e^{-at}$ , da Equação 4.2 temos:

$$c(a^{-1}) = \frac{KA}{a}(1 - e^{-(a \cdot a^{-1})}) = \frac{KA}{a}(1 - e^{-1}) = \frac{KA}{a} \cdot 0,63 = 0,63 \cdot C_{reg} \quad (4.3)$$

A Figura 4.4 mostra a constante de tempo  $\tau$ , que é atingida quando o sistema alcança 63% do seu valor de regime. Como sabemos que  $\tau = \frac{1}{a}$ , então o polo do sistema, que leva o denominador da Equação 4.2 a zero, é:

$$a = \frac{1}{\tau} \quad (4.4)$$



**Figura 4.4:** Constante de tempo

Portanto:

$$K = \frac{ac_{reg}}{A} \quad (4.5)$$

A Figura 4.2 mostra um sinal do tipo degrau aplicado como referência no valor de 25 *rps*, a curva de comportamento real medida empiricamente e a curva aproximada calculada pelo método determinístico como segue:

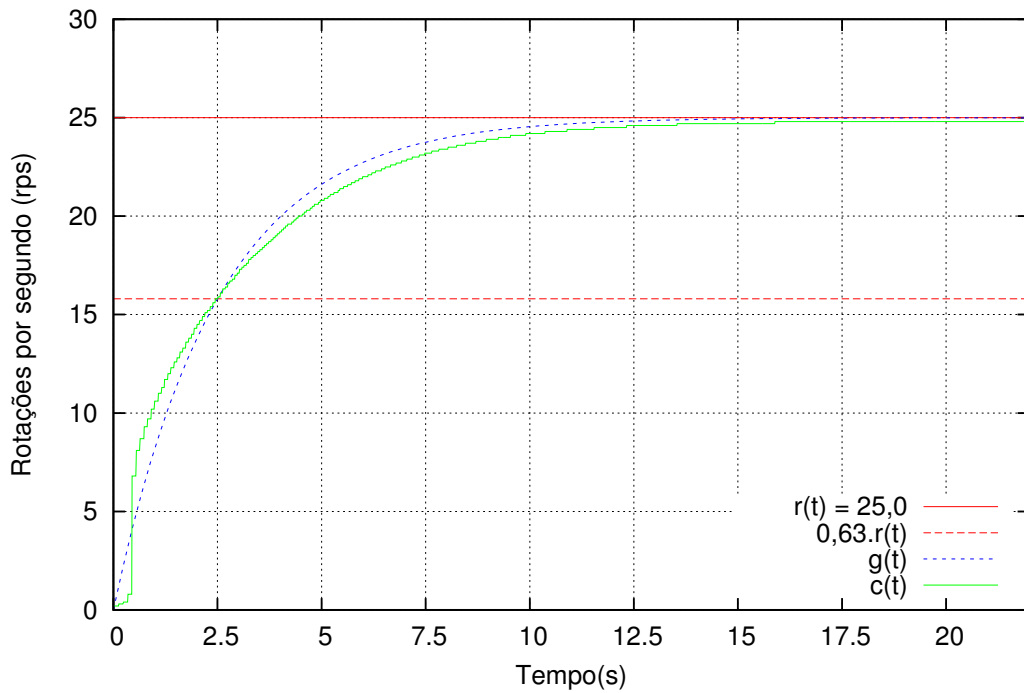
A Figura 4.5 possui uma linha indicativa que mostra o ponto de intercepção da curva ao valor de 63% do valor de referência, e empiricamente foi gerado um gráfico com divisões no eixo do Tempo no valor de  $\tau = 2,5s$ .

Calculando o polo da função:

$$a = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{2,5} = 0,4 \quad (4.6)$$

Como  $c_{reg} = 25$  e  $A$  também é 25 então na Equação 4.5  $K = a$  e assim temos que:

$$c(t) = \frac{KA}{a}(1 - e^{-at}) = \frac{0,4 \cdot 25}{0,4}(1 - e^{-0,4 \cdot t}) = 25(1 - e^{-0,4 \cdot t}) \quad (4.7)$$



**Figura 4.5:** Ação de Controle em Malha Aberta

Aplicando a Transformada de Laplace:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{s+a} = \frac{0,4}{s+0,4} \quad (4.8)$$

Baseado no gráfico mostrado na Figura 4.5, o valor de tempo em que o motor assume a velocidade de referência é aproximadamente  $5\tau$ , 12,5 s, e como objetivo para uma primeira versão da implementação do controle utilizando LPA2v é proposto que o sistema reduza o tempo de alcance da velocidade alvo em um tempo de no máximo  $1\tau$ , ou seja, 2,5s.

### 4.2.1 Qualidade do modelo

A qualidade do modelo é relativa ao erro aceitável para o sistema estudado. Para o modelo obtido neste estudo foi aplicada o cálculo de Erro Relativo Percentual, e foram feitas análises em trechos diferentes em função da não linearidade inicial apresentada pelo comportamento do motor da planta em estudo.

A equação para o cálculo de Erro Relativo Percentual foi:

$$\%erro = \frac{|valor\ real - valor\ calculado|}{valor\ real} \times 100 \quad (4.9)$$

Realizando a somatória para o cálculo de erro médio com todas as amostras aquisitadas:

$$\%erro = \frac{100}{N} \cdot \sum_{n=0,00}^{n=22,40} \frac{|r[n] - c[n]|}{r[n]} \quad (4.10)$$

Onde:

r : valor real;

c : valor calculado;

n : número da amostra aquisitada;

N : número total de amostras.

Obs.: As aquisições iniciaram com tempo inicial de 0,00 s até o tempo final de 22,40 segundos, com intervalo de 10 milisegundos entre aquisições, totalizando 2240 amostras.

A Tabela 4.1 mostra o erro médio relativo calculado para diferentes intervalos de tempo. O primeiro valor contempla o intervalo completo de tempo amostrado, de 0,00 até 22,40 s com um erro de 10,77%. Porém devido a não linearidade inicial, ocorre uma distorção bem grande que pode ser visto nos dois outros intervalos, de 0,00 a 0,50 segundos com erro de 364,13%, completamente não aceitável, mas que após os 50 milisegundos iniciais, o erro médio é de 2,71%.

**Tabela 4.1:** Erro Relativo Percentual

Intervalo de amostras	erro médio relativo
0,00 a 22,40 s	10,77 %
0,00 a 0,50 s	364,13 %
0,50 a 22,40 s	2,71 %

De forma mais detalhada, foram calculados os erros médios relativos para cada intervalo de tempo de um  $\tau$ , e pode-se notar, pela Tabela 4.2, que o erro de estado estacionário, para o intervalo acima de  $5\tau$ , é menor do que 1%.

O intervalo inicial, de 0 a  $1\tau$  apresenta um grande erro, devido a não linearidade já

**Tabela 4.2:** Erro Relativo Percentual para intervalos determinados por  $\tau$ 

Intervalo de amostras	erro médio relativo
0 a $1 \tau$	83,40 %
1 a $2 \tau$	3,16 %
2 a $3 \tau$	3,38 %
3 a $4 \tau$	2,00 %
4 a $5 \tau$	2,29 %
$> 5 \tau$	0,82 %

comentada anteriormente, que ocorre nos primeiros 50 ms.

Desconsiderando a região transitória não linear que ocorre nos instantes iniciais do movimento do eixo do motor, o erro é menor do que 3%, conforme mostrado na Tabela 4.1, ou ainda na análise com todos os intervalos com dimensão de  $1\tau$ , os valores de erro após o primeiro intervalo estão dentro do limite de 5% de erro, conforme mostrado na Tabela 4.2, ressaltando que para o regime estacionário o erro é menor do que 1%. Assim, considera-se que o modelo utilizado é bom e representa razoavelmente bem o sistema físico real.

#### 4.2.2 Etapas a serem desenvolvidas

- Estudar a LPA2v;
- Implementar um controlador utilizando LPA2v;
  - Estabelecer a configuração do sistema;
  - Descrever o controlador e parâmetros de ajuste;
- Otimizar parâmetros e analisar performance;

## **5. Cronograma**



# Referências Bibliográficas

DA SILVA FILHO, J. I. Métodos de aplicações da lógica paraconsistente anotada de anotação com dois valores-lpa2v. *Revista Seleção Documental*, Santos, v. 1, n. 1, p. 18–25, Março 2006.

KRAUSE, D. Lógica paraconsistente. *Scientific American Brasil*, São Paulo, n. 30, p. 70–77, Nov 2004.

DA SILVA FILHO, J. I.; ABE, J. M. Aspectos de lógica e teoria da ciência: Pesquisa e métodos de aplicações da lógica paraconsistente anotada em sistemas de inteligência artificial. *Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo*, São Paulo, p. 50–83, 2011.

BUENO-SOLER, J.; CARNIELLI, W.; TESTA, R. (Ed.). *Consistency, Contradiction, Paraconsistency, and Reasoning - 40 year of CLE*. Campinas, São Paulo - Brazil: Center for Logic, Epistemology and the History of Science, 2016.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Modern control systems*. 12<sup>a</sup>. ed. New Jersey: Pearson Education, Inc, 2011.

NISE, N. *Engenharia de sistemas de controle*. 3<sup>a</sup>. ed. Califórnia: LTC, 2009.

OGATA, K. *Modern Control Engineering*. 5<sup>a</sup>. ed. New Jersey: Prentice Hall, Pearson Education, Inc, 2010.

GOMES, E. L. *Sobre a história da paraconsistência e a obra de da Costa: a instauração da Lógica Paraconsistente*. Tese (Doutorado) — Instituto de Filosofia e Ciências Humanas - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

ABE, J. M.; FILHO, J. I. da S.; TORRES, G. L. *Inteligência Artificial com as Redes de Análise Paraconsistentes*. Teoria e aplicação. 1<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: LTC, 2008.