

-
-
-
-
-

IF-705 – Automação Inteligente

Sistemas Nebulosos

Aluizio Fausto Ribeiro Araújo
Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Informática - CIn
Departamento de Sistemas da Computação
aluizioa@cin.ufpe.br



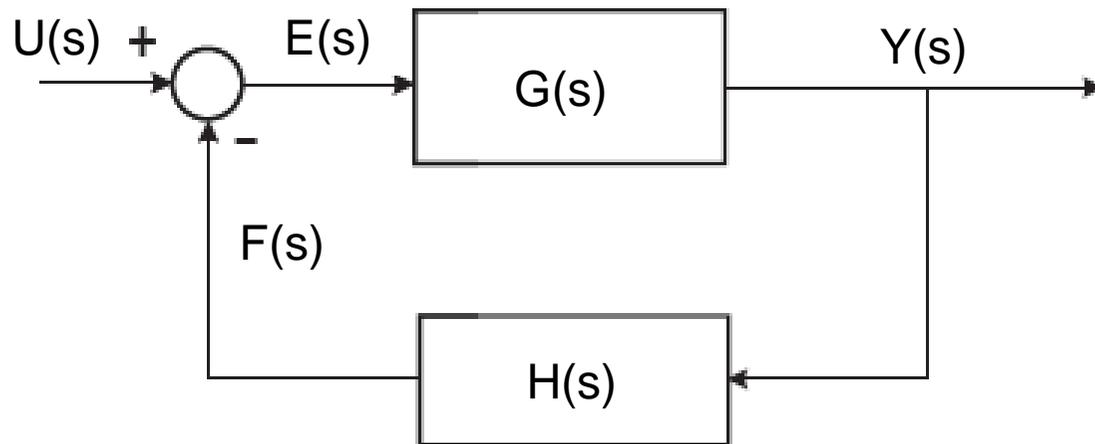
-
-
-
-
-

Conteúdo

- Projeto de controle convencional
- Sistema de controle nebuloso ou difuso
- Exemplo de controlador nebuloso: pêndulo invertido
- Análise teórica de controladores nebulosos
- Tipos de Controladores
- Aplicações
- Referências

Projeto de Sistema de Controle Convencional

- Representação de sistema de controle convencional



Sistemas lineares

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du}$$

Sistemas não lineares

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$$

Projeto de Sistema de Controle Convencional

- Especificações em termos de
 - Capacidade para rejeição de perturbações
 - Sensibilidade à variação de parâmetros
 - Estabilidade
 - Tempo de subida
 - Valor de sobresinal (*overshoot*)
 - Tempo de acomodação (*settling time*)
 - Erro de estado estacionário

Projeto de Sistema de Controle Convencional

- Projeto do controlador (possibilidades)
 - Tipos de controlador:
 - Proporcional-integrativo-derivativo (PID), PI ou PD.
 - Estratégias de controle possíveis:
 - Controle clássico, controle ótimo, controle robusto, controle adaptativo, controle estocástico.
 - Controle linear ou não-linear.
 - Sistemas contínuos ou discretos no tempo.

Projeto de Sistema de Controle Convencional

- Métodos para avaliação de desempenho
 - Análise do modelo matemático;
 - Análise baseada em simulação;
 - Investigações experimentais.

Sistema de Controle Nebuloso ou Difuso

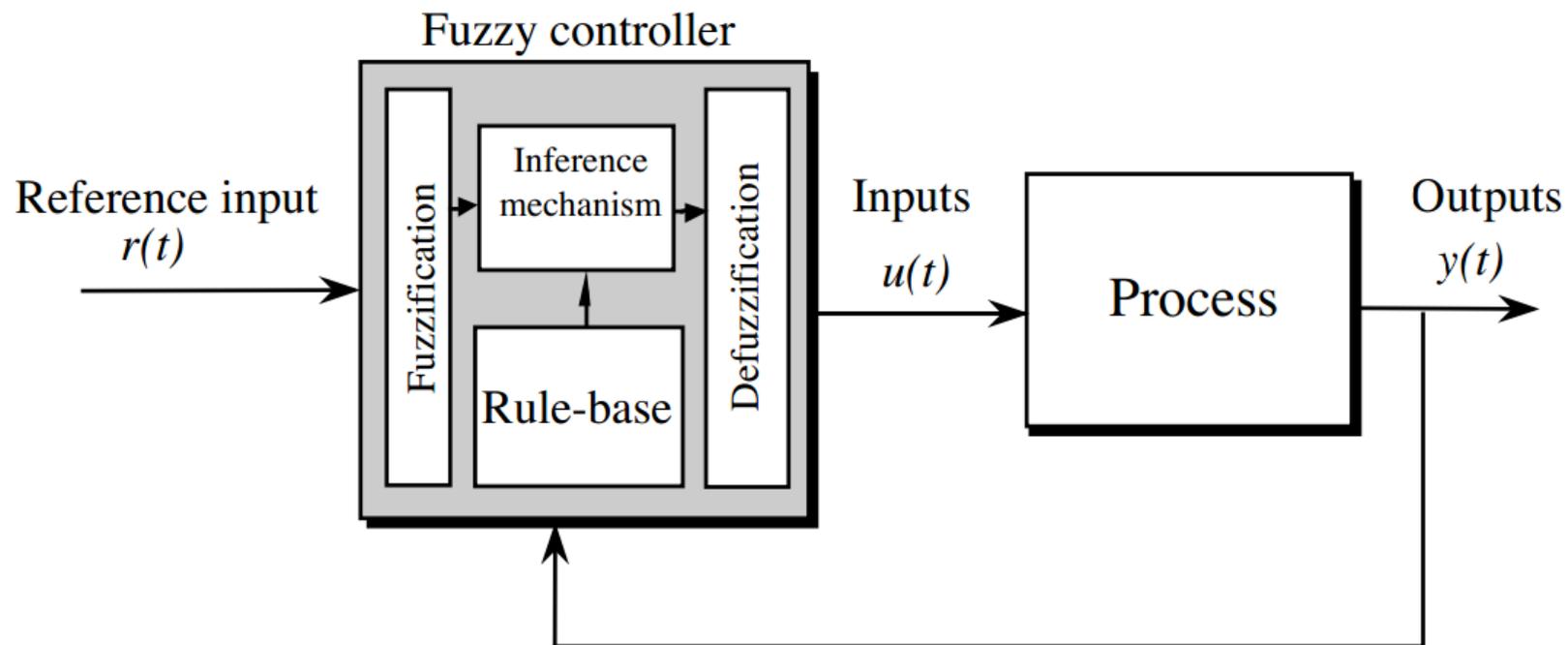
- Limitação de técnicas de controle convencional:
 - Dificuldade de descrever por equações matemáticas o comportamento de sistemas não-lineares, parcial ou totalmente desconhecidos;
 - Incapacidade de inserir com precisão incertezas e dinâmicas imprevisíveis na descrição do sistema;
 - Presença de imprecisões de descrições de modelos lineares de coeficientes constantes para os casos citados.
- Incertezas e imprevisibilidade em sistemas complexos e mal definidos podem ser modeladas por abordagem linguística, introduzindo o conceito de nebulosidade.

Sistema de Controle Nebuloso ou Difuso

- Motivações para o projetar sistemas de controle nebulosos:
 - Capacidade para lidar com sistemas complexos com alta precisão;
 - Possibilidade de modelar não-linearidades;
 - Redução de esforço necessário para modelagem do sistema utilizando o modelo convencional.
- O controle Nebuloso provê uma metodologia formal para representação, formulação e implementação de heurísticas para o controle de um sistema.

Sistema de Controle Nebuloso ou Difuso

Esquema geral de um controlador nebuloso:



Sistema de Controle Nebuloso ou Difuso

- O controle convencional utiliza equações diferenciais ordinárias (EDOs) para representação;
- O controle nebuloso emprega regras nebulosas para representação;
- No controle Nebuloso há um foco no uso das regras para representar como se controla a planta ao invés de EDOs:
 - Essa possibilidade pode levar à representação de conhecimento por regras, mais natural para as pessoas.

Sistema de Controle Nebuloso ou Difuso

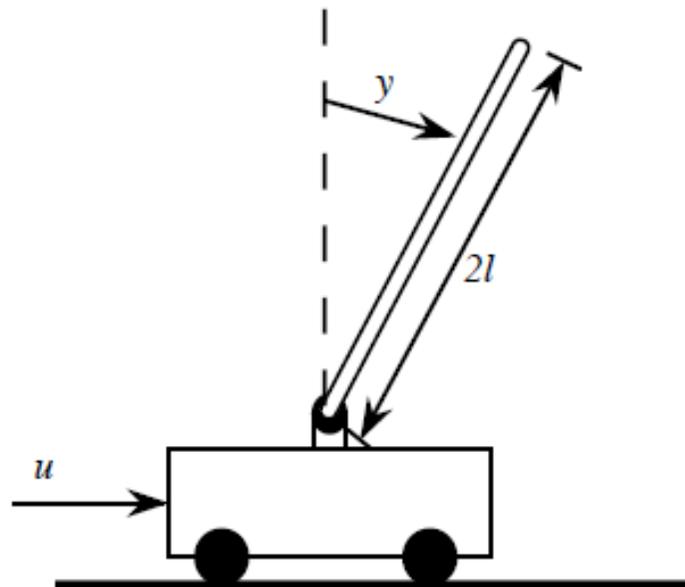
- Passos para projeto de controlador nebuloso:
 - Escolher as entradas e saídas (*crisps*);
 - Modelar o pré-processamento (*Fuzzification*);
 - Modelar o pós-processamento (*Defuzzification*);
 - Projeto dos demais outros controladores.

Sistema de Controle Nebuloso ou Difuso

- Possíveis dificuldades:
 - Os comportamentos observados pelo especialista incluem todas situações que podem acontecer? incluem opções de perturbações e ajustes paramétricos da planta?
 - O especialista consegue realística e seguramente prever todos potenciais problemas em sistemas de malha fechada?
 - O especialista insere eficazmente estabilidade e requisitos de desempenho (tempo de subida, sobresinal, erro de estado estacionário, entre outros) nas regras para garantir que as operações do controlador sejam confiáveis?

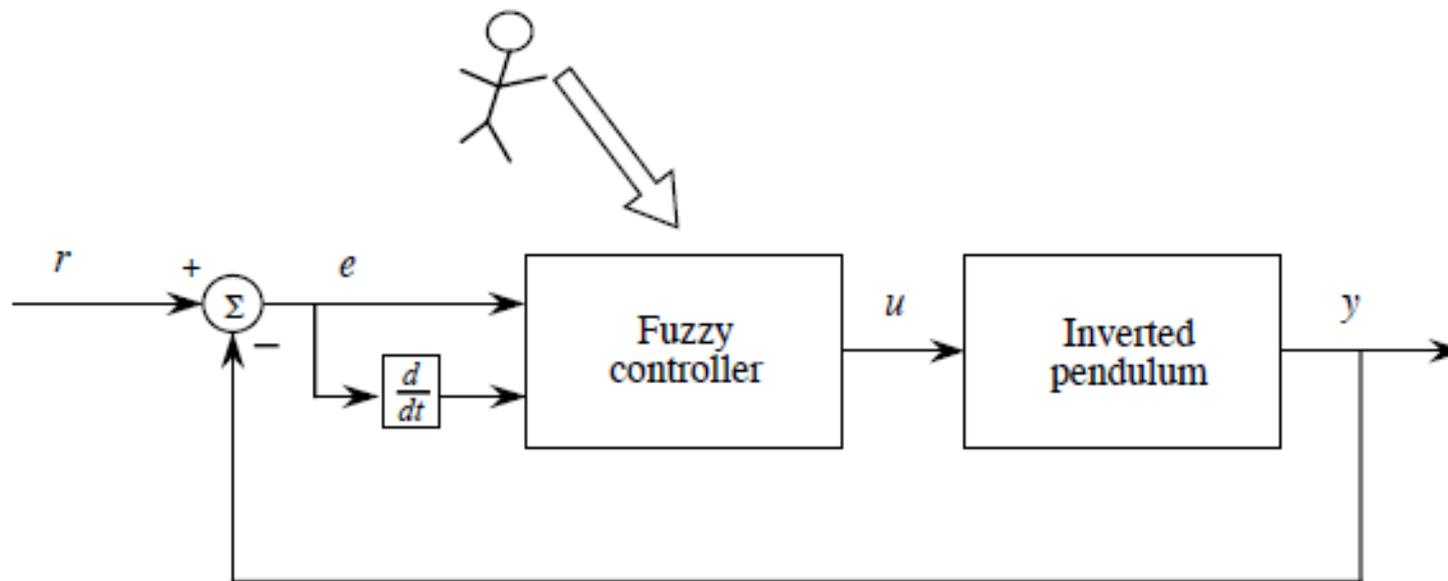
Exemplo de Controlador Nebuloso

- O problema do pêndulo invertido:
 - Para ilustrar projeto e mecanismos básicos;
 - Para discutir outras questões importantes.



Exemplo de Controlador Nebuloso

- Escolha das entradas e saídas (por um especialista):



Entradas do controlador : $e(t) = r(t) - y(t)$; $de(t)/dt$

Saída do controlador : $u(t)$

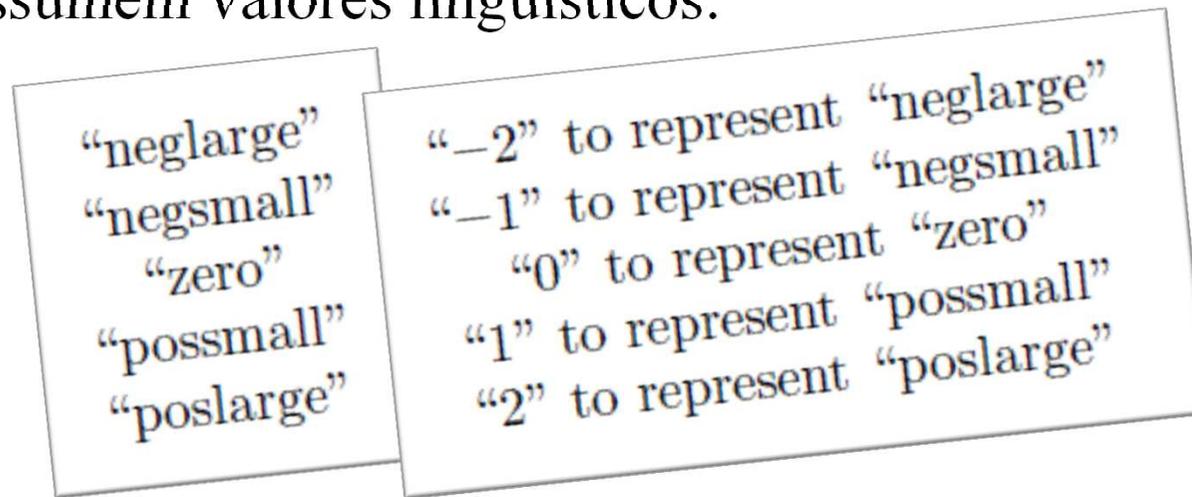
Exemplo de Controlador Nebuloso

- Inserção de conhecimento na base de regras
 - Descrições linguísticas para substituir equações:
 - Variáveis linguísticas: descrevem as entradas e saídas do controlador nebuloso;

“error” describes $e(t)$
“change-in-error” describes $\frac{d}{dt}e(t)$
“force” describes $u(t)$

Exemplo de Controlador Nebuloso

- Inserção de conhecimento na base de regras
 - Descrições linguísticas para substituir equações:
 - Variáveis linguísticas (erro, mudança-no-erro e força) assumem valores linguísticos:



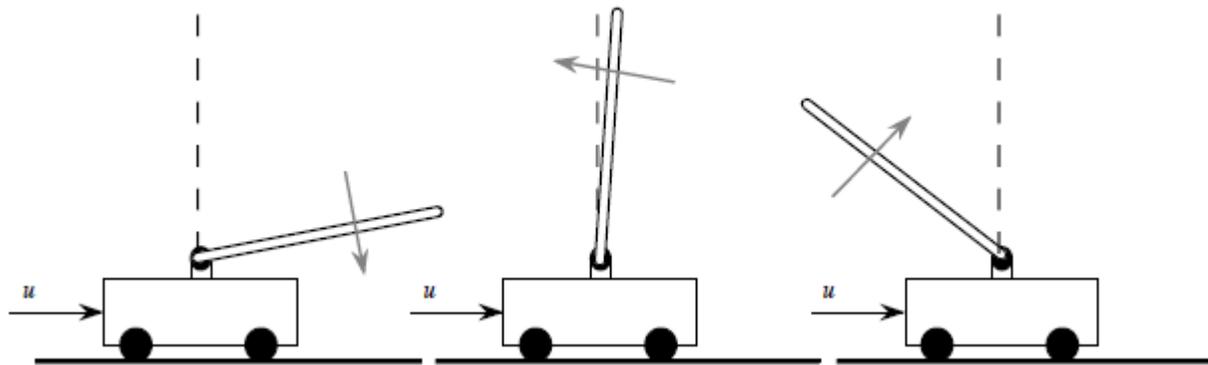
- Denominado de valor numérico linguístico.

Exemplo de Controlador Nebuloso

- Inserção de conhecimento na base de regras
 - Exemplos de proposições
 - “*error is poslarge*” – Erro positivo cujo pêndulo tem ângulo significativo à esquerda da posição vertical;
 - “*error is negsmall*”
 - “*error is zero*”
 - “*error is poslarge and change-in-error is possmall*”
 - “*error is negsmall and change-in-error is possmall*” - Erro negativo com o pêndulo em ângulo pequeno à direita da posição vertical e se movendo para esta posição.

Exemplo de Controlador Nebuloso

- Inserção de conhecimento na base de regras
 - Regras: São ideias abstratas para produzir controle adequado mas podem ter significado subjetivo para diferentes pessoas.
 - A forma geral das regras linguísticas é:
 - **If** premise **Then** consequent



Exemplo de Controlador Nebuloso

- Inserção de conhecimento na base de regras
 - Regras para a figura anterior, há 25 (5^2) no total, duas entradas com cinco possíveis estados para cada uma:
 - *If error is neglarge and change-in-error is neglarge Then force is poslarge*
 - *If error is zero and change-in-error is possmall Then force is negsmall*
 - *If error is poslarge and change-in-error is negsmall Then force is negsmall*

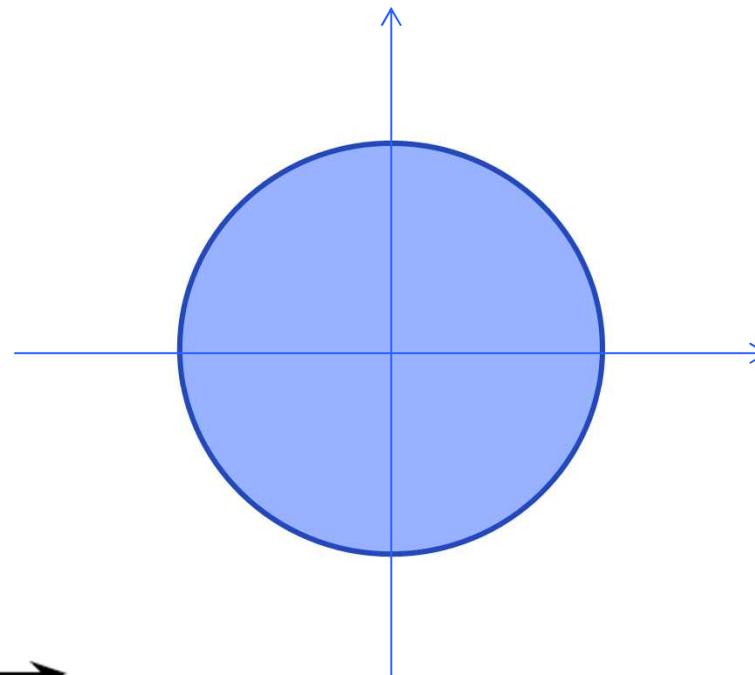
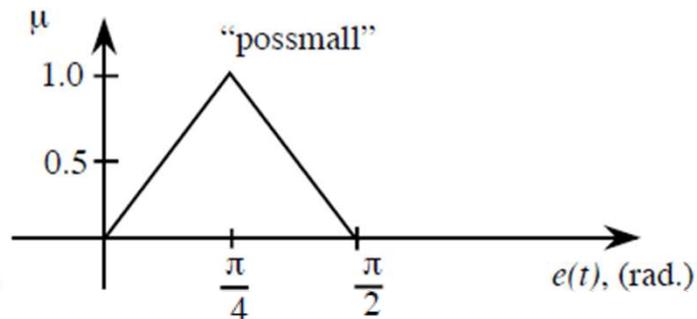
Exemplo de Controlador Nebuloso

- Inserção de conhecimento na base de regras
- Base de regras (representação em tabela para baixo numero de variáveis);
 - *If error is poslarge and change-in-error is negsmall Then force is negsmall!*

"force" u		"change-in-error" \dot{e}				
		-2	-1	0	1	2
"error" e	-2	2	2	2	1	0
	-1	2	2	1	0	-1
	0	2	1	0	-1	-2
	1	1	0	-1	-2	-2
	2	0	-1	-2	-2	-2

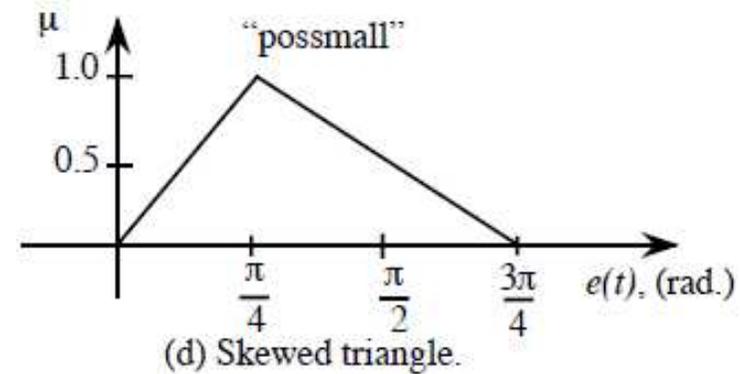
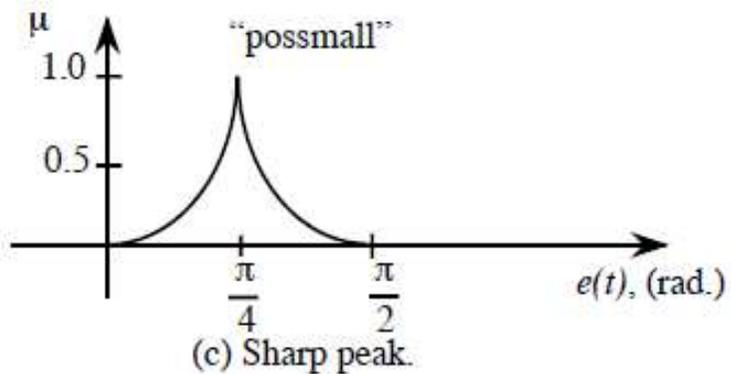
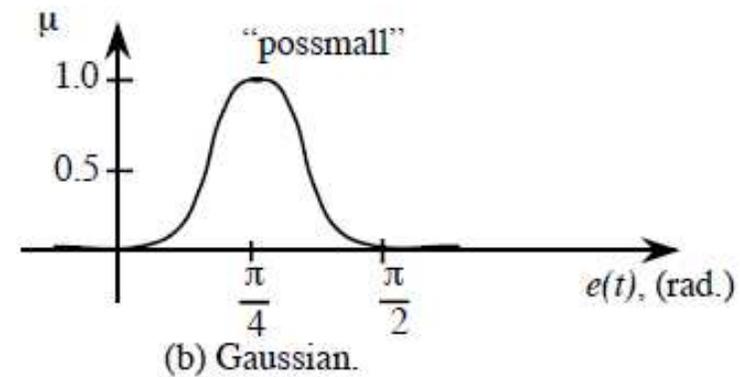
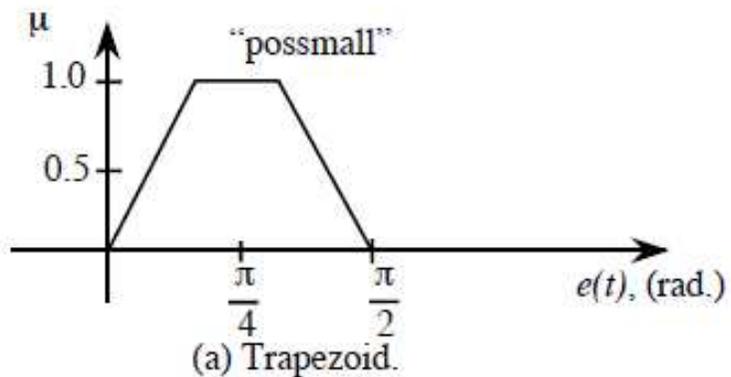
Exemplo de Controlador Nebuloso

- Quantificação nebulosa do conhecimento
 - Funções de pertinência
 - Certeza de que, a partir de seu valor, uma variável possa pertencer a uma dada classe linguística
 - Exemplos:
 - $e(t) = -\frac{\pi}{2}$
 - $e(t) = \frac{\pi}{8}$
 - $e(t) = \frac{\pi}{4}$
 - $e(t) = \pi$



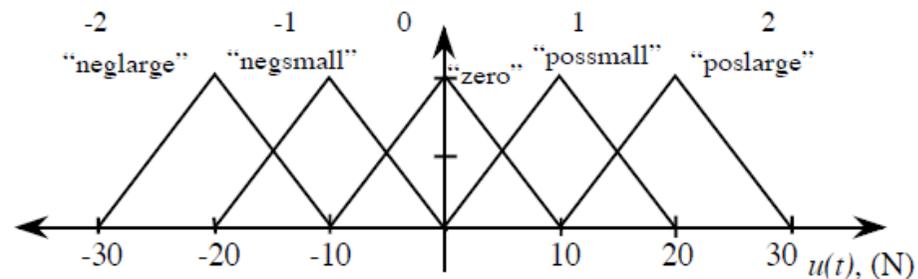
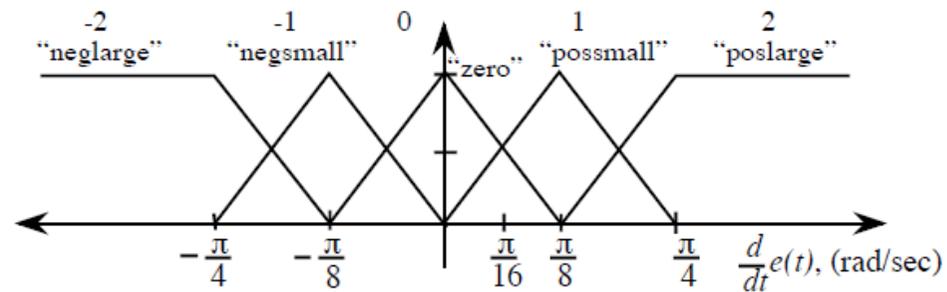
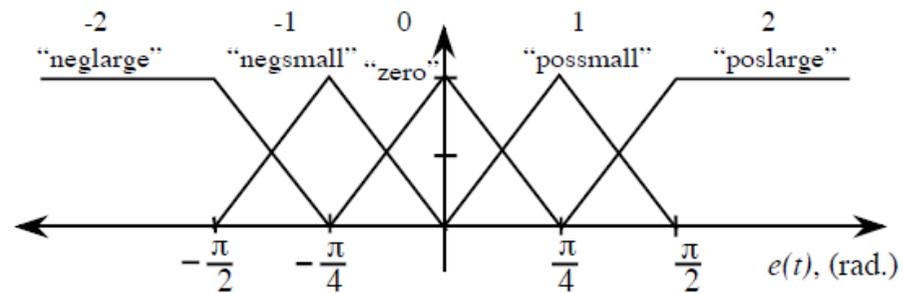
Exemplo de Controlador Nebuloso

- Quantificação nebulosa do conhecimento
 - Alternativas para função de pertinência de *possmall*:



Exemplo de Controlador Nebuloso

- Quantificação nebulosa do conhecimento para o pêndulo invertido



Exemplo de Controlador Nebuloso

- Quantificação nebulosa do conhecimento para o pêndulo invertido
 - Fuzzyficação:

Para $e(t) = \frac{\pi}{4}$, $\frac{de(t)}{dt} = \frac{\pi}{16}$, então

$$\left. \begin{array}{l} \mu_{\text{possmall}}(e(t)) = 1 \\ \mu_{\text{possmall}}\left(\frac{de(t)}{dt}\right) = 0,5 \end{array} \right\} \Rightarrow \mu_{\text{zero}}\left(\frac{de(t)}{dt}\right) = 0,5$$

Exemplo de Controlador Nebuloso

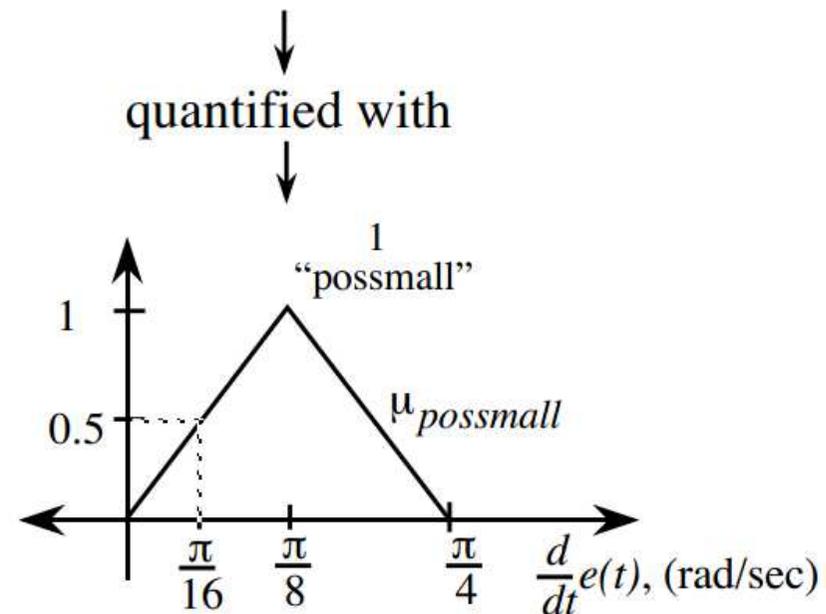
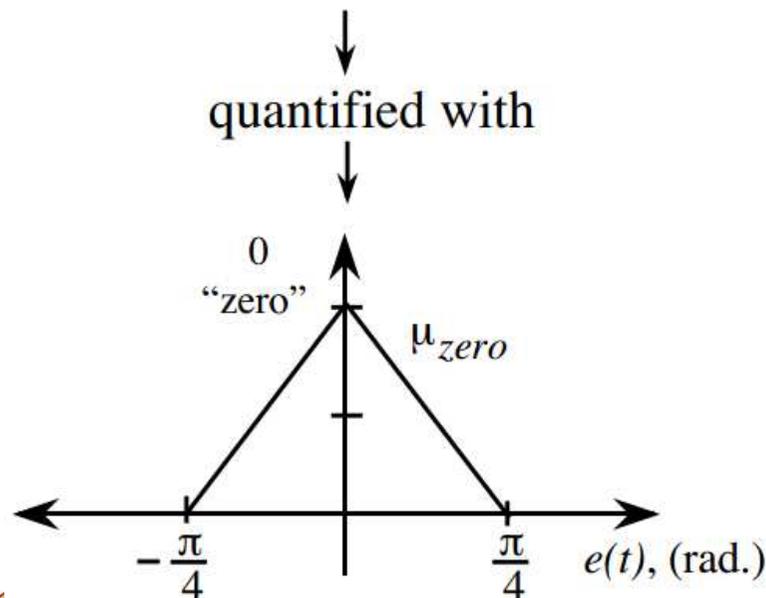
- Determinação das regras a serem empregadas pelo processo de inferência que geralmente considera dois passos:
 - Comparação entre premissas de todas as regras e entrada do controlador: Deve determinar os casamentos (*matchings*) entre antecedentes, pertinência (ou pertencimento)_com que cada regra se aplica e levar em conta recomendações de regras mais prováveis de serem aplicadas.
 - Conclusões que são estabelecidas pelas regras determinadas para ser aplicadas no tempo atual.

Exemplo de Controlador Nebuloso

- Determinação das regras a serem empregadas no exemplo:

If error is zero **and** change-in-error is possmall **Then** force is negsmall

“error is zero **and** change-in-error is possmall”



Exemplo de Controlador Nebuloso

- Determinação das regras a serem empregadas no exemplo:

– Para

$$\left\{ \begin{array}{l} e(t) = \frac{\pi}{8} \\ \frac{de(t)}{dt} = \frac{\pi}{32} \end{array} \right. \text{ então } \left\{ \begin{array}{l} \mu_{zero}(e(t)) = 0,5 \\ \mu_{possmall}\left(\frac{d}{dt}e(t)\right) = 0,25 \end{array} \right.$$

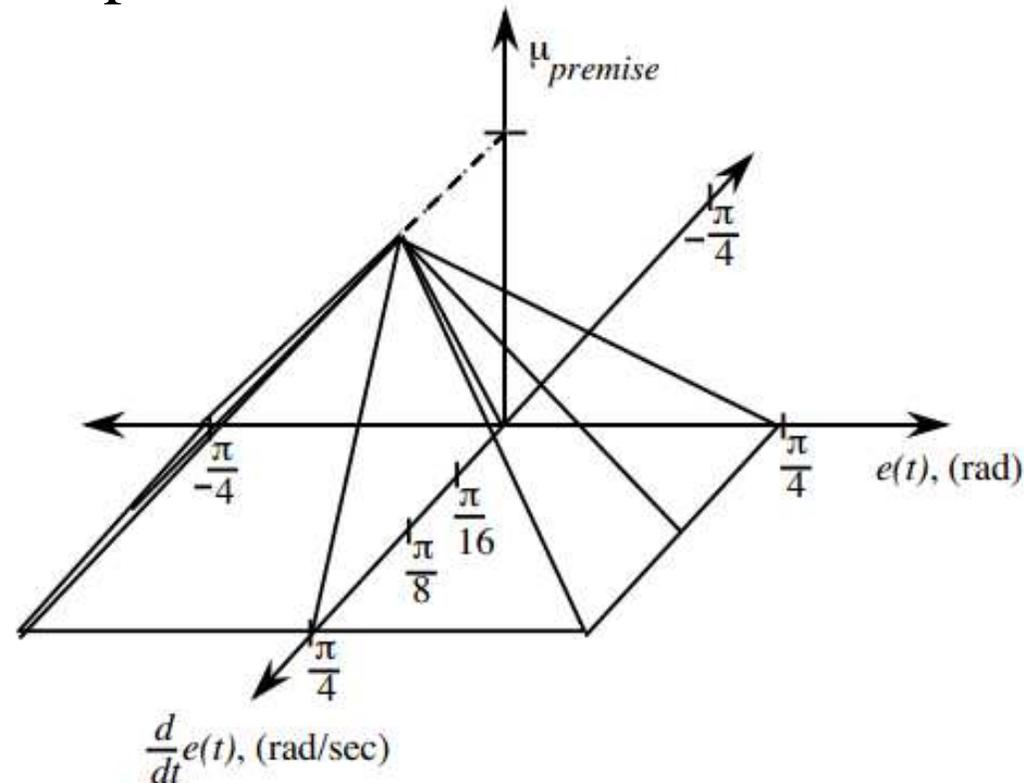
- Operação AND (pode ser calculada de 2 modos):

Mínimo: $\mu_{premissa} = \min\{0,5;0,25\} = 0,25$

Produto: $\mu_{premissa} = (0,5)(0,25) = 0,125$

Exemplo de Controlador Nebuloso

- Determinação das regras a serem empregadas no exemplo:
 - Função de pertinência para a regra 1 quando a operação mínimo representa o AND:



Exemplo de Controlador Nebuloso

- Determinação das regras a serem empregadas no exemplo:

- Regras ON e OFF

- Regra ON:

$$\mu_{premissa}\left(e(t), \frac{de(t)}{dt}\right) > 0;$$

- Caso contrário a será OFF e não será disparada.

Exemplo de Controlador Nebuloso

Para $e(t) = 0$; $de(t)/dt = \pi/8 - \pi/32$;

$\mu_{zero}(e(t)) = 1$; $\mu_{possmall}(e(t)) = 0$;

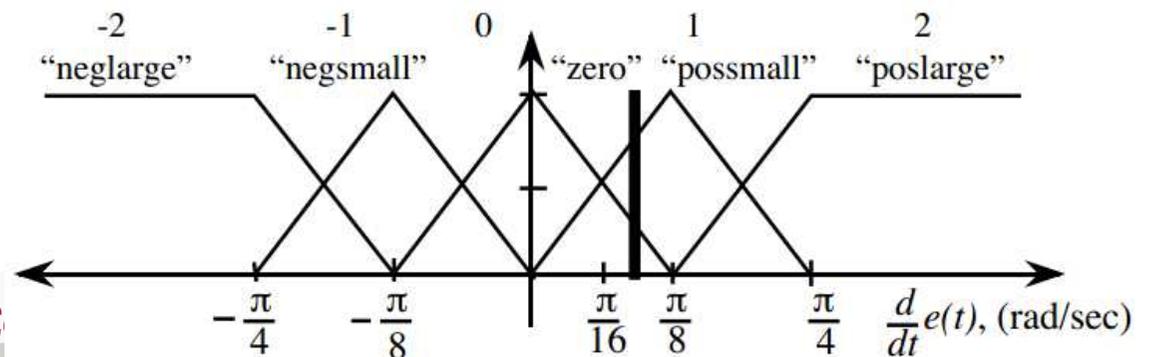
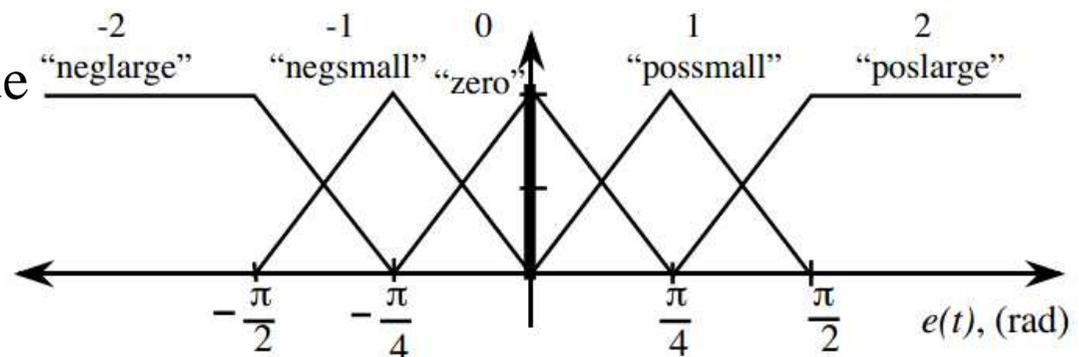
$\mu_{zero}(de(t)/dt) = 0,25$; $\mu_{possmall}(de(t)/dt) = 0,75$;

As regras ON são aquelas que têm como premissas:

-“error is zero”

-“change-in-error is zero”

-“change-in-error is possmall”



Exemplo de Controlador Nebuloso

- Passo de inferência

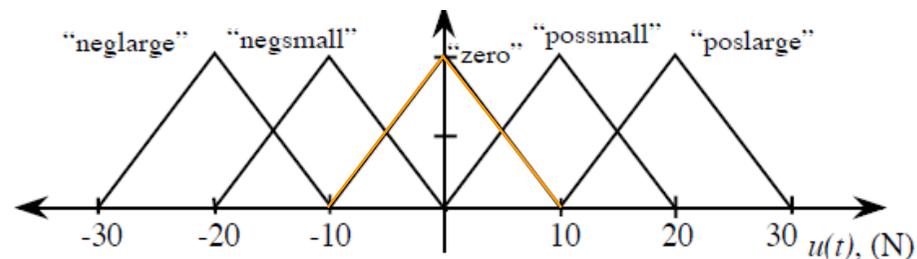
- É necessário tirar as conclusões com respeito às regras ON:

- Regra 1:

If error is zero and change-in-error is zero Then force is zero

- Regra 1: $\mu_{premissa(1)} = \min\{1; 0,25\} = 0,25;$

- Função de pertinência a partir da conclusão acima:



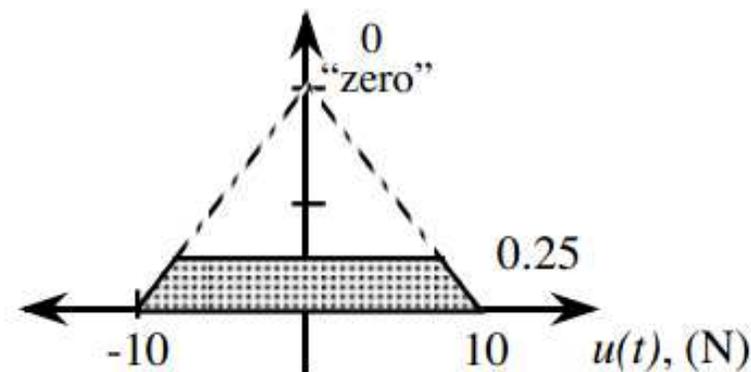
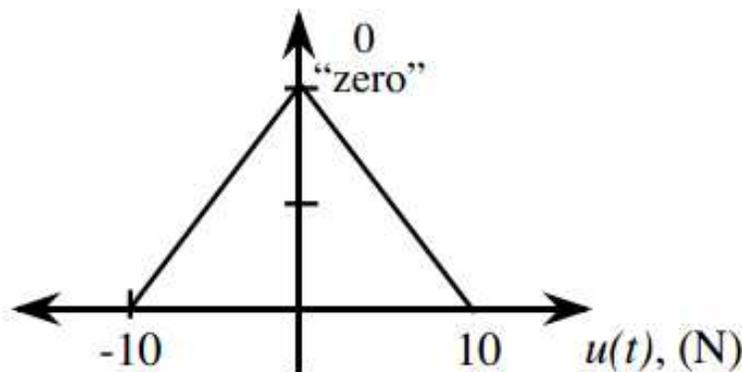
Exemplo de Controlador Nebuloso

- Passo de inferência

- Função de pertinência a partir da conclusão acima: Não se pode estar mais certo sobre o consequente que a premissa.

$$\mu_{(1)}(u) = \min\{0,25; \mu_{zero}(u)\};$$

- Função de pertinência da regra 1:



Exemplo de Controlador Nebuloso

- Passo de inferência

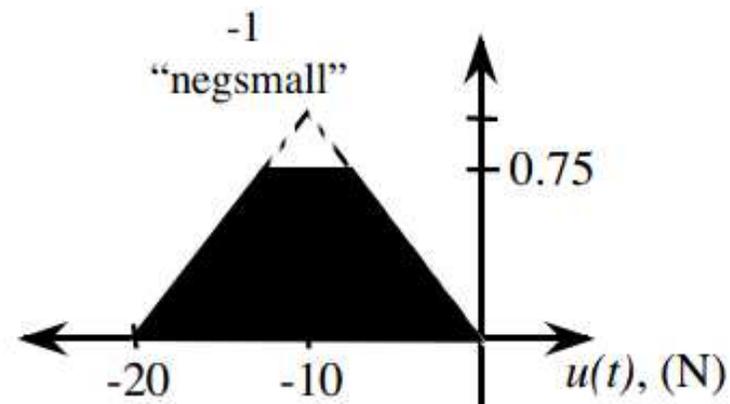
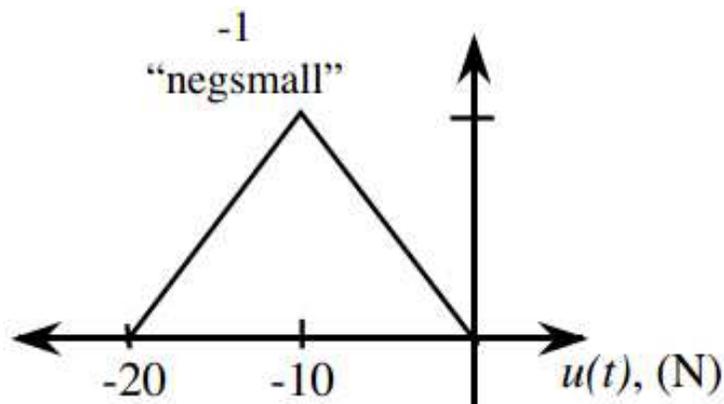
$$\text{Regra 2: } \mu_{premissa_{(2)}} = \min\{1; 0,75\} = 0,75;$$

Função de pertinência a partir da conclusão acima:

$$\mu_{(2)}(u) = \min\{0,75; \mu_{negsmall}(u)\};$$

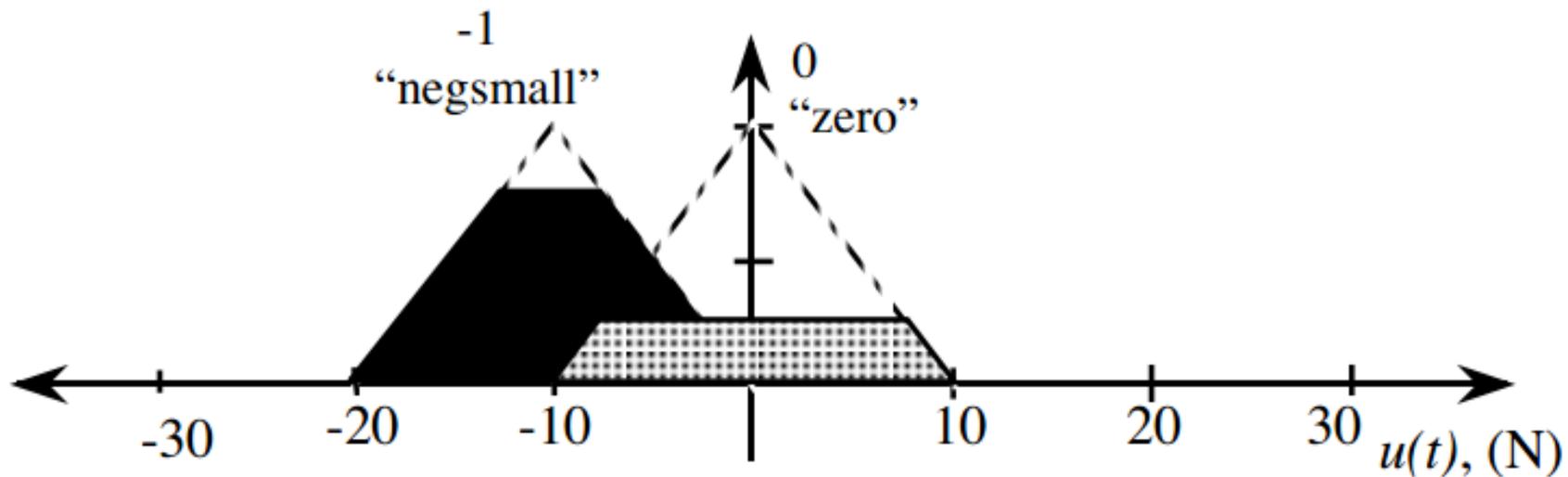
Exemplo de Controlador Nebuloso

- Passo de inferência
 - Função de pertinência para a regra 2:



Exemplo de Controlador Nebuloso

- Passo de inferência
 - Combinando as funções:

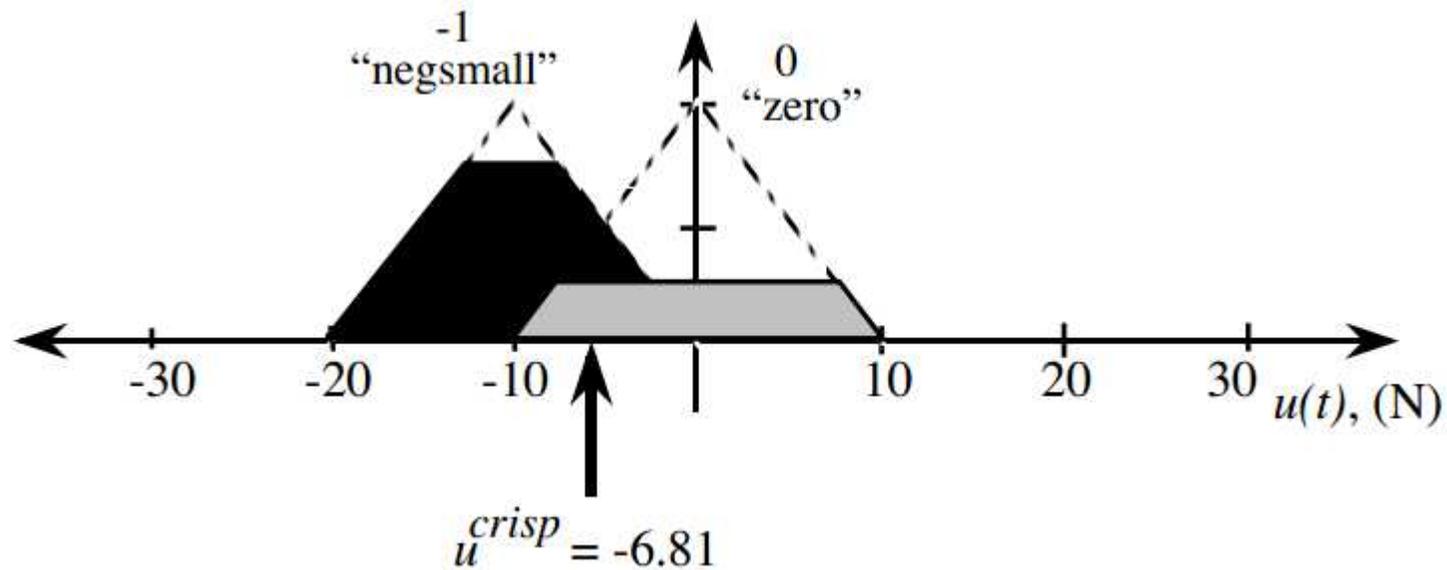


Exemplo de Controlador Nebuloso

- Convertendo decisões em ações
 - Emprego do centro de gravidade:
 - $b_1 = 0$;
 - $b_2 = -10$

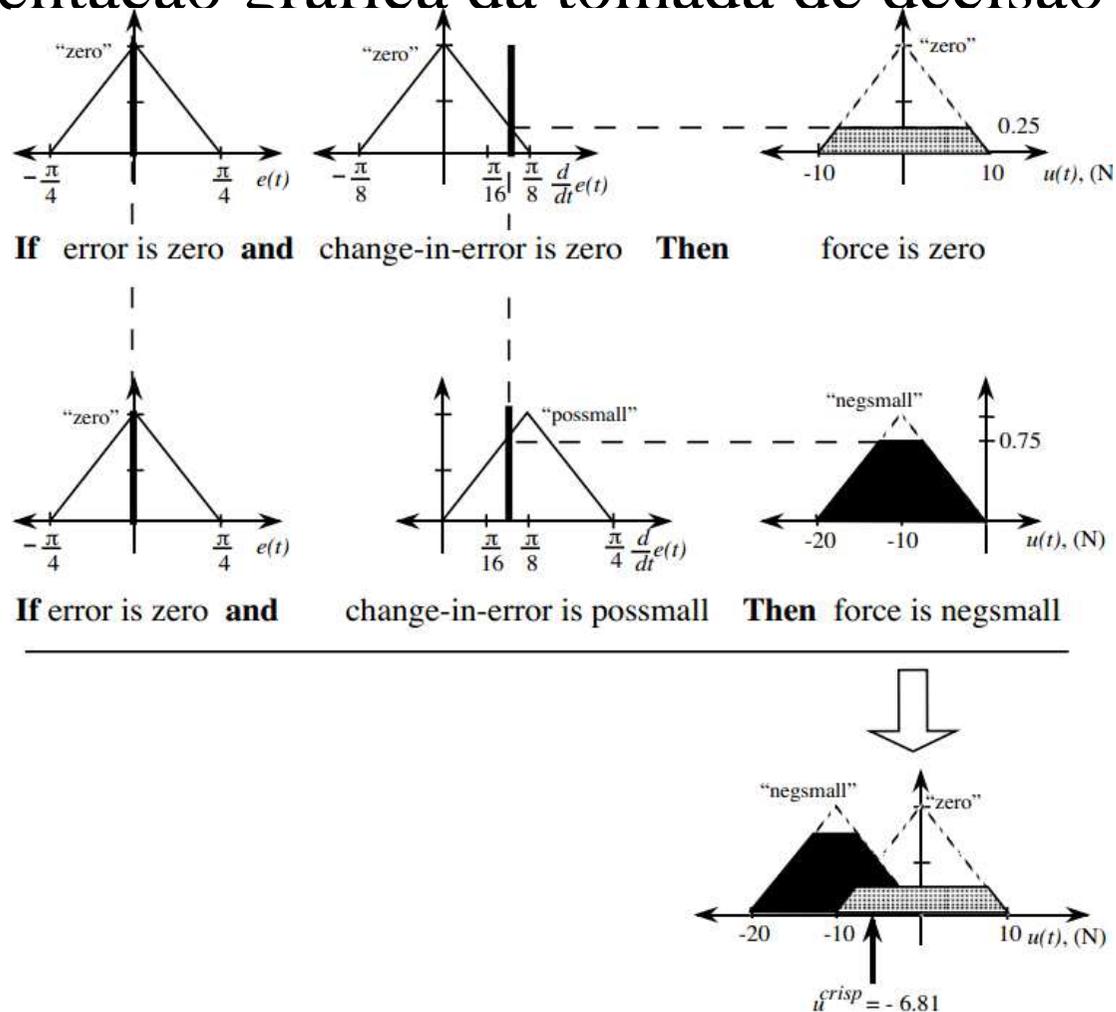
$$u^{crisp} = \frac{\sum_i b_i \int \mu_{(i)}}{\sum_i \int \mu_{(i)}} \therefore u^{crisp} = \frac{(0)(4,375) + (-10)(9,375)}{4,375 + 9,375} = -6,81$$

Exemplo de Controlador Nebuloso



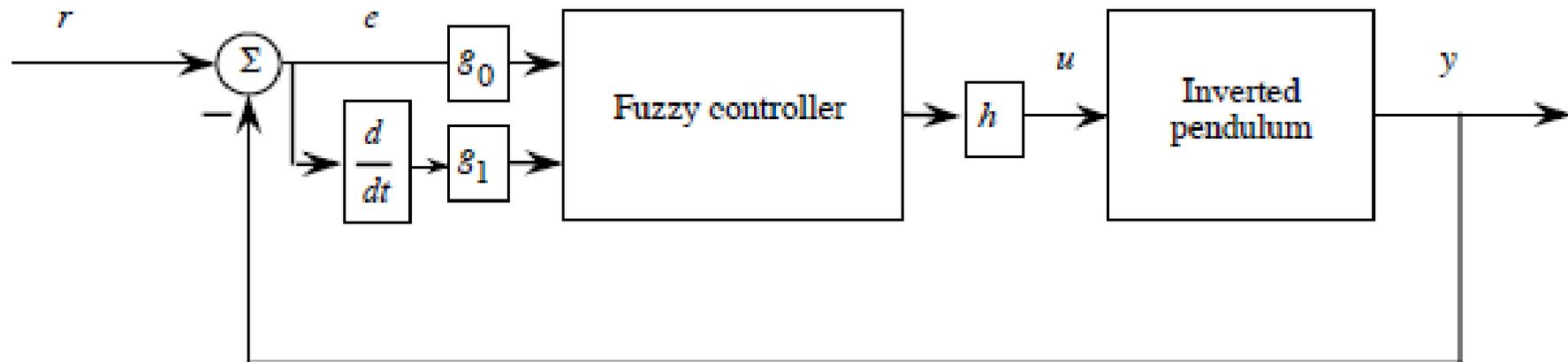
Exemplo de Controlador Nebuloso

- Representação gráfica da tomada de decisão nebulosa



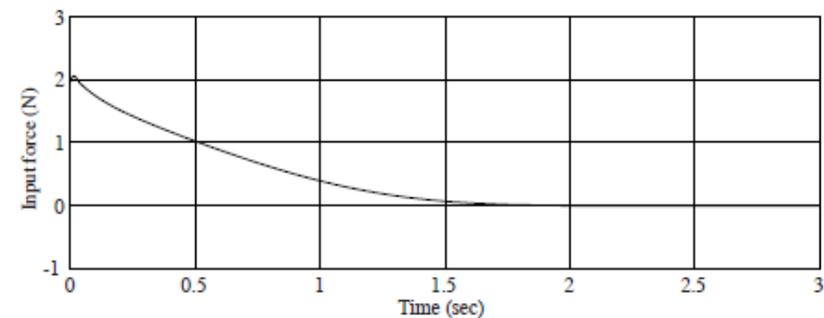
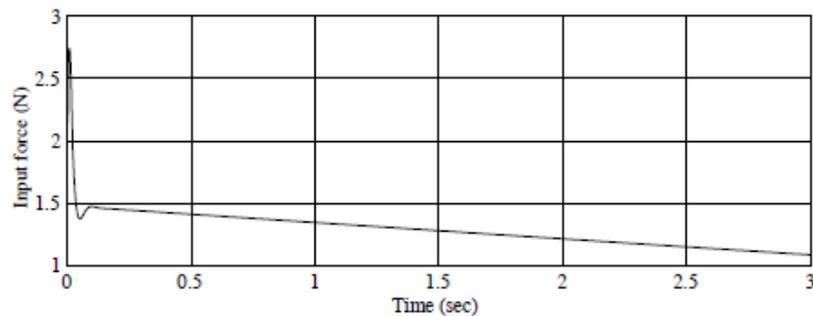
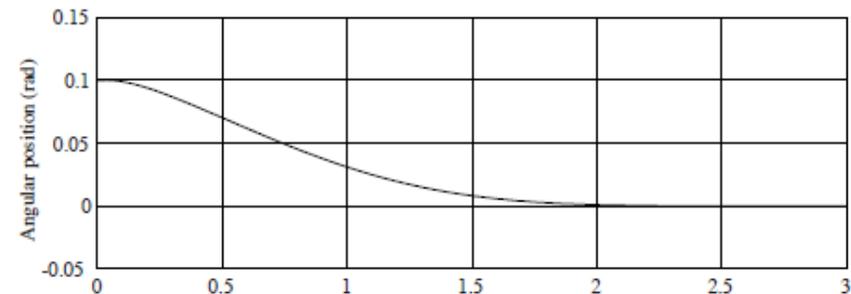
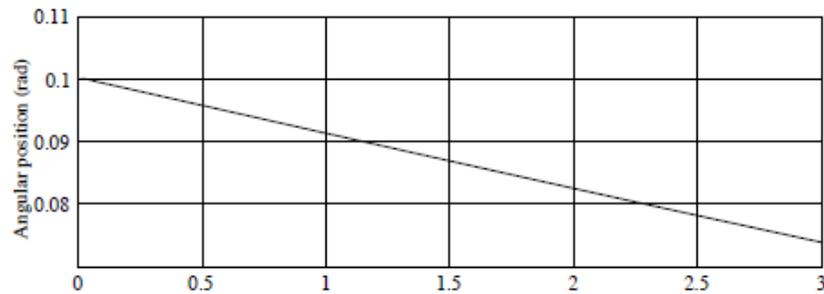
Exemplo de Controlador Nebuloso

- Melhoramentos



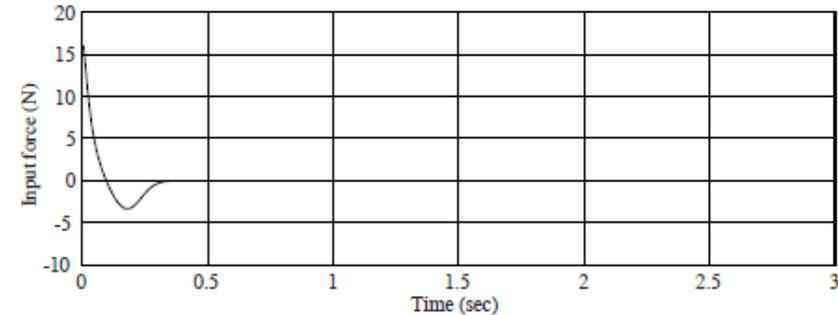
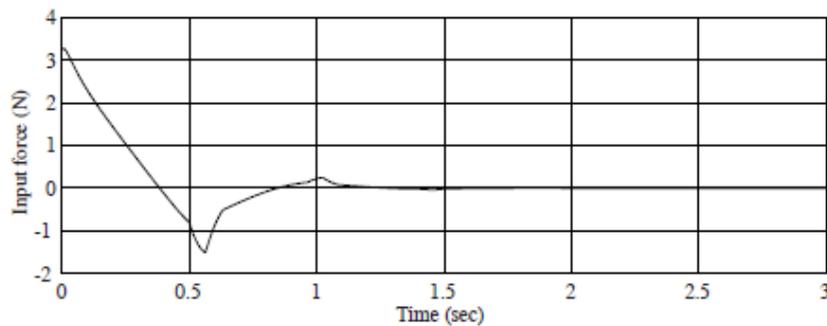
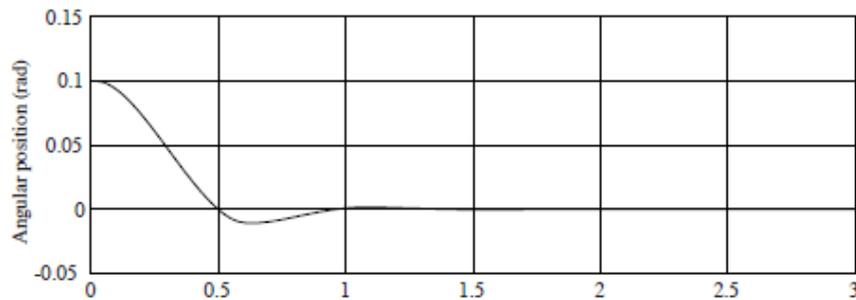
Exemplo simples de projeto: o pêndulo invertido

- Antes (sem derivada do erro) ---- Depois: $g_0=1$; $g_1=0,1$ e $h=1$.



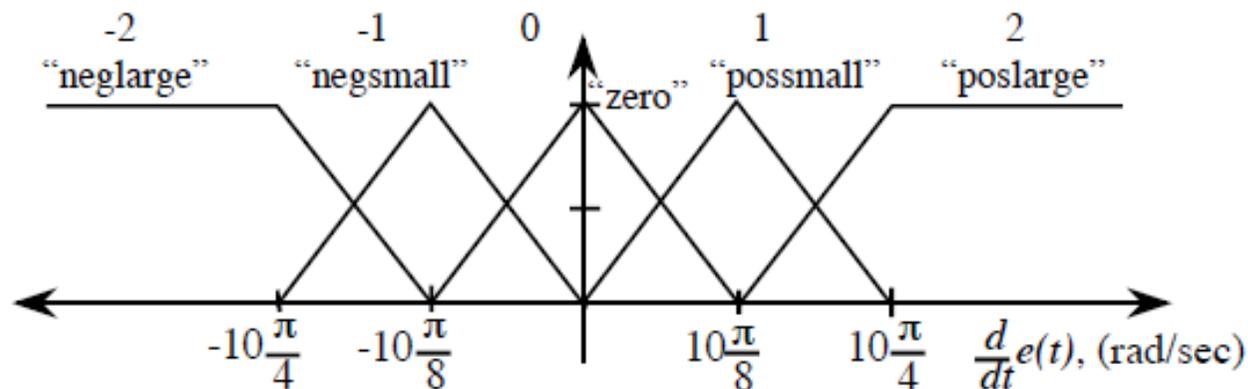
Exemplo simples de projeto: o pêndulo invertido

- $g_0=2; g_1=0,1$ e $h=1$ ----- $g_0=2; g_1=0,1$ e $h=5$.



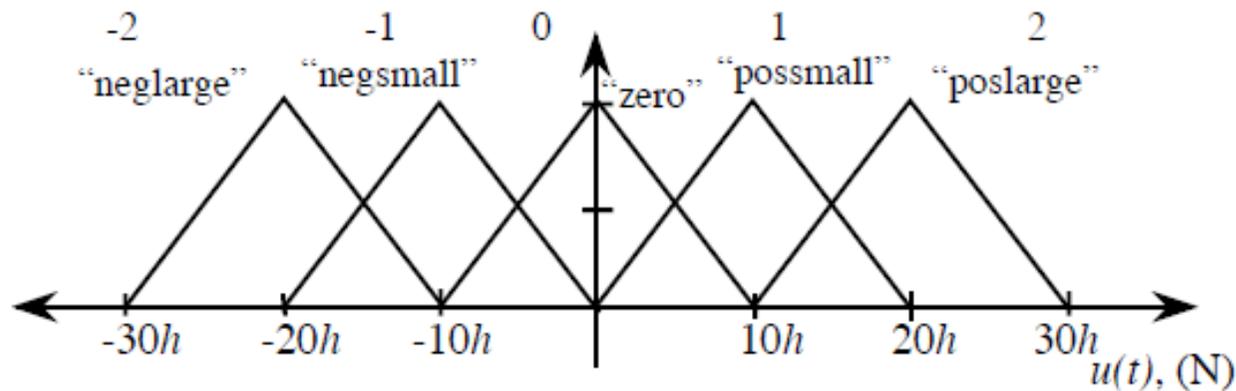
Exemplo simples de projeto: o pêndulo invertido

- Função de pertinência na entrada (para $g_0=1$; $g_1=0,1$ e $h=1$)
 - Só muda para a derivada do erro:



Exemplo simples de projeto: o pêndulo invertido

- Função de pertinência na saída (para $g_0=1$; $g_1=0,1$ e $h=1$)
 - Permanece inalterada:

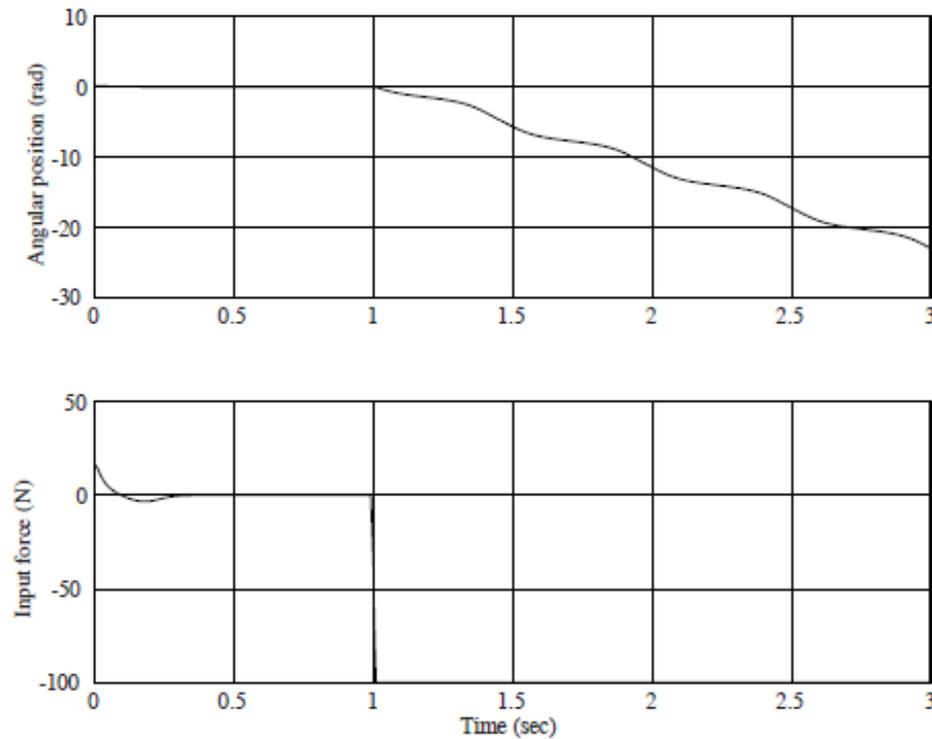


Exemplo simples de projeto: o pêndulo invertido

- Melhorando as funções de pertinência
 - Método para mudar o posicionamento das funções de pertinência, ou seja, fazer com que o ganho aumente ao se afastar do zero
 - $c^i = 10i$
 - $c^i = 10hi$
 - $c^i = 5h \text{sign}(i)i^2$

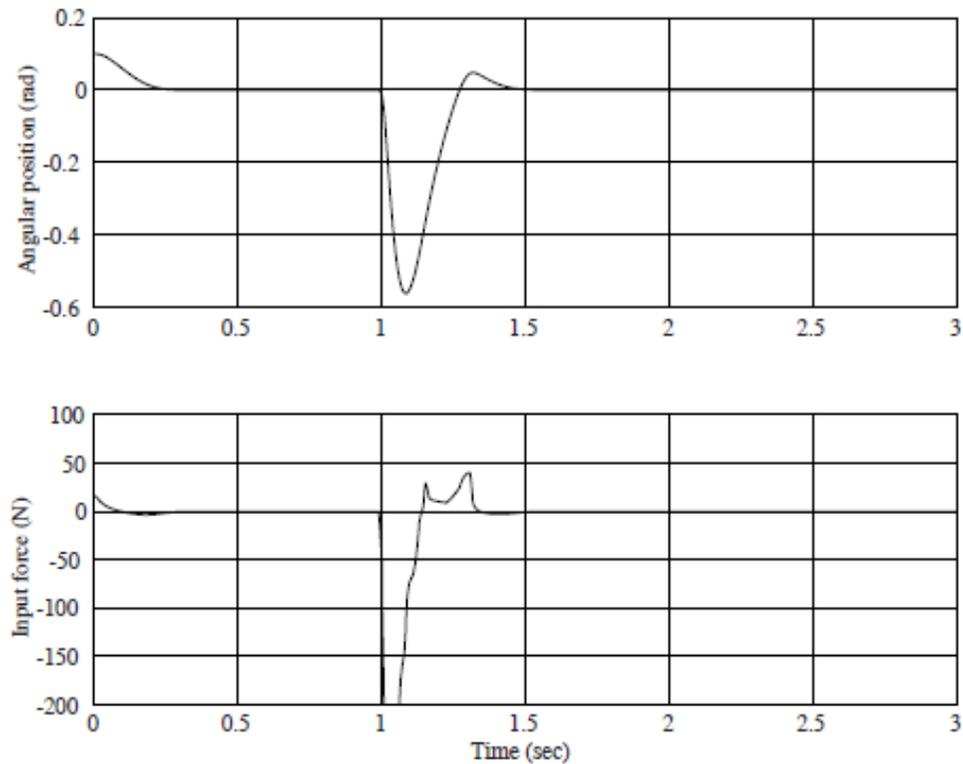
Exemplo simples de projeto: o pêndulo invertido

- Antes



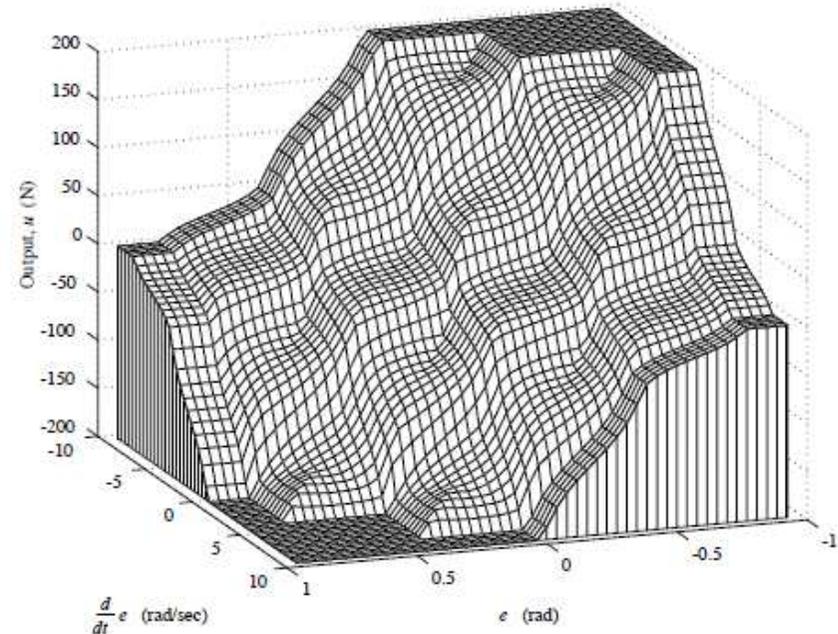
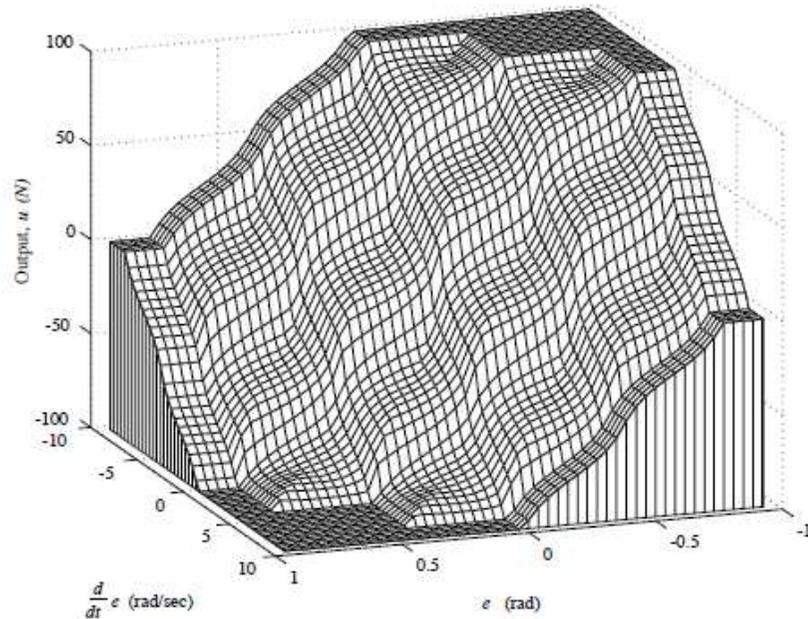
Exemplo simples de projeto: o pêndulo invertido

• Depois



Exemplo simples de projeto: o pêndulo invertido

- Comparativo das superfícies de um controlador



Simulação de sistemas de controle nebulosos

• Pseudo-código

1. Obtain x_1 and x_2 values
(Get inputs to fuzzy controller)
2. Compute $mf1[i]$ and $mf2[j]$ for all i, j
(Find the values of all membership functions given the values for x_1 and x_2)
3. Compute $prem[i,j]=\min[mf1[i],mf2[j]]$ for all i, j
(Find the values for the premise membership functions for a given x_1 and x_2 using the minimum operation)

Simulação de sistemas de controle nebulosos

4. Compute $\text{imps}[i,j]=\text{areaimp}[\text{rule}[i,j],\text{prem}[i,j]]$ for all i, j
(Find the areas under the membership functions for all possible implied fuzzy sets)
5. Let $\text{num}=0, \text{den}=0$
(Initialize the COG numerator and denominator values)
6. For $i=0$ to 4, For $j=0$ to 4,
(Cycle through all areas to determine COG)

 $\text{num}=\text{num}+\text{imps}[i,j]*\text{center}[\text{rule}[i,j]]$
 (Compute numerator for COG)

 $\text{den}=\text{den}+\text{imps}[i,j]$
 (Compute denominator for COG)
7. Next i , Next j
8. Output $\text{ucrisp}=\text{num}/\text{den}$
(Output the value computed by the fuzzy controller)
9. Go to Step 1.



Análise Teórica de Controladores Nebulosos

- O modelo de equações de estado de um sistema SISO de malha fechada, linear, invariante no tempo e discreto é:

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A} \mathbf{x}(k) + \mathbf{b}^T u(k) \\ y(k) = \mathbf{c}^T \mathbf{x}(k) \\ u(k) = d y(k) \end{array} \right\} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A} \mathbf{x}(k) + \mathbf{b}^T u(k) \\ u(k) = d \mathbf{c}^T \mathbf{x}(k) \end{array} \right.$$

onde A é matriz $n \times n$, \mathbf{b} e \mathbf{c} são vetores e d é uma escalar.

Análise Teórica de Controladores Nebulosos

- A forma geral de uma lei de controle:

$$u(k) = f(e(k), e(k-1), \dots, e(k-n), u(k-1), \dots, u(k-n))$$

onde $u(k)$ é a entrada de controle, $e(k) = y_d - y(k)$ é o erro entre a saída desejada e a obtida; $f(\cdot)$ é uma função não linear que descreve a lei de controle.

- Possibilidades para o controlador: proporcional (P), derivativo (D), integrativo (i) e suas combinações (PI, PD, PID).
- Parâmetros de projeto do sistema de regras nebulosas incluem:
 - Escolha de variáveis de estado e controle e seus settings;
 - Escolha dos antecedentes e consequentes das regras;
 - Construção de um conjunto de regras.

Análise Teórica de Controladores Nebulosos

- As variáveis de estado do processo representando o conteúdo dos antecedentes das regras são
 - Erro, $e(k)$;
 - Variação do erro, $\Delta e(k)$;
 - Soma do erro, $\Sigma e(k)$.
- As variáveis de controle, entrada do processo, representam dos consequentes das regras são selecionadas como:
 - Sinal de controle, $u(k)$;
 - Variação do sinal de controle, $\Delta u(k)$;

Análise Teórica de Controladores Nebulosos

- Analogamente ao controlador convencional, variáveis de entrada:

$$e(k) = y_d - y(k)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1)$$

$$\sum_{k=1}^n e(k) = \sum_{k=1}^{n-1} e(k) + e(k)$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k - 1) \therefore u(k) = u(k - 1) + \Delta u(k)$$

onde y_d é a saída desejada, $y(k)$ é a saída do processo, k é o intervalo de amostragem e n é o número máximo das amostras consideradas.

- O erro, sua variação e seu somatório são usadas como variáveis de entrada para um controlador de lógica nebulosa (FLC).

Tipos de Controladores Nebulosos

- FLC tipo P:

- Descrição:

$$u(k) = k_p \cdot e(k)$$

- onde k_p é o ganho proporcional.

- A regra para esse controlador é dada pela forma simbólica:

- If e is A_i then u is B_j

- onde A_i e B_j , $i, j=1, 2, \dots, n$, são variáveis linguísticas.

Tipos de Controladores Nebulosos

- FLC tipo PD:

– Descrição:

$$u(k) = k_p \cdot e(k) + k_d \cdot \Delta e(k)$$

onde k_p é o ganho proporcional e k_d é o ganho diferencial.

- A regra para esse controlador é dada pela forma simbólica:

If e is A_i and Δe is B_j then u is C_k

onde A_i , B_j e C_k $i=1,\dots,n_1$, $j=1,\dots,n_2$, $k=1,\dots,m$, são variáveis linguísticas.

O número de regras é dado por $n_1 \times n_2$

Tipos de Controladores Nebulosos

- FLC tipo PI:

- Descrição:

$$u = k_p \cdot e + k_i \int edt$$

onde k_p e k_i são os ganhos proporcional e integrativo.

Derivando com respeito ao tempo :

$$\dot{u} = k_p \cdot \dot{e} + k_i e, \quad \text{para sistema discreto no tempo :}$$

$$\Delta u(k) = k_p \cdot \Delta e(k) + k_i e(k), \quad \text{lembre - se que}$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k), \quad \text{logo, substituindo - se } \Delta u(k) \text{ e } u(k)$$

$$u(k) = k_p \cdot e(k) + k_i \sum e(k)$$

Tipos de Controladores Nebulosos

- FLC tipo PI:
- Regra para este controlador na forma simbólica:
If e is A_i and Δe is B_j then Δu is C_k
onde A_i , B_j e C_k $i=1,\dots,n_1$, $j=1,\dots,n_2$, $k=1,\dots,m$, são variáveis linguísticas.
- Regra para controlador tipo PI absoluto:
If e is A_i and Σe is B_j then Δu is C_k
onde A_i , B_j e C_k $i=1,\dots,n_1$, $j=1,\dots,n_2$, $k=1,\dots,m$, são variáveis linguísticas.

Tipos de Controladores Nebulosos

- FLC tipo PID:

- Descrição:

$$u_{PID}(k) = k_p \cdot e(k) + k_d \cdot \Delta e(k) + k_i \cdot \sum e(k)$$

onde k_p , k_d e k_i são os ganhos proporcional, derivativo e integrativo.

- A regra para esse controlador é dada pela forma simbólica:

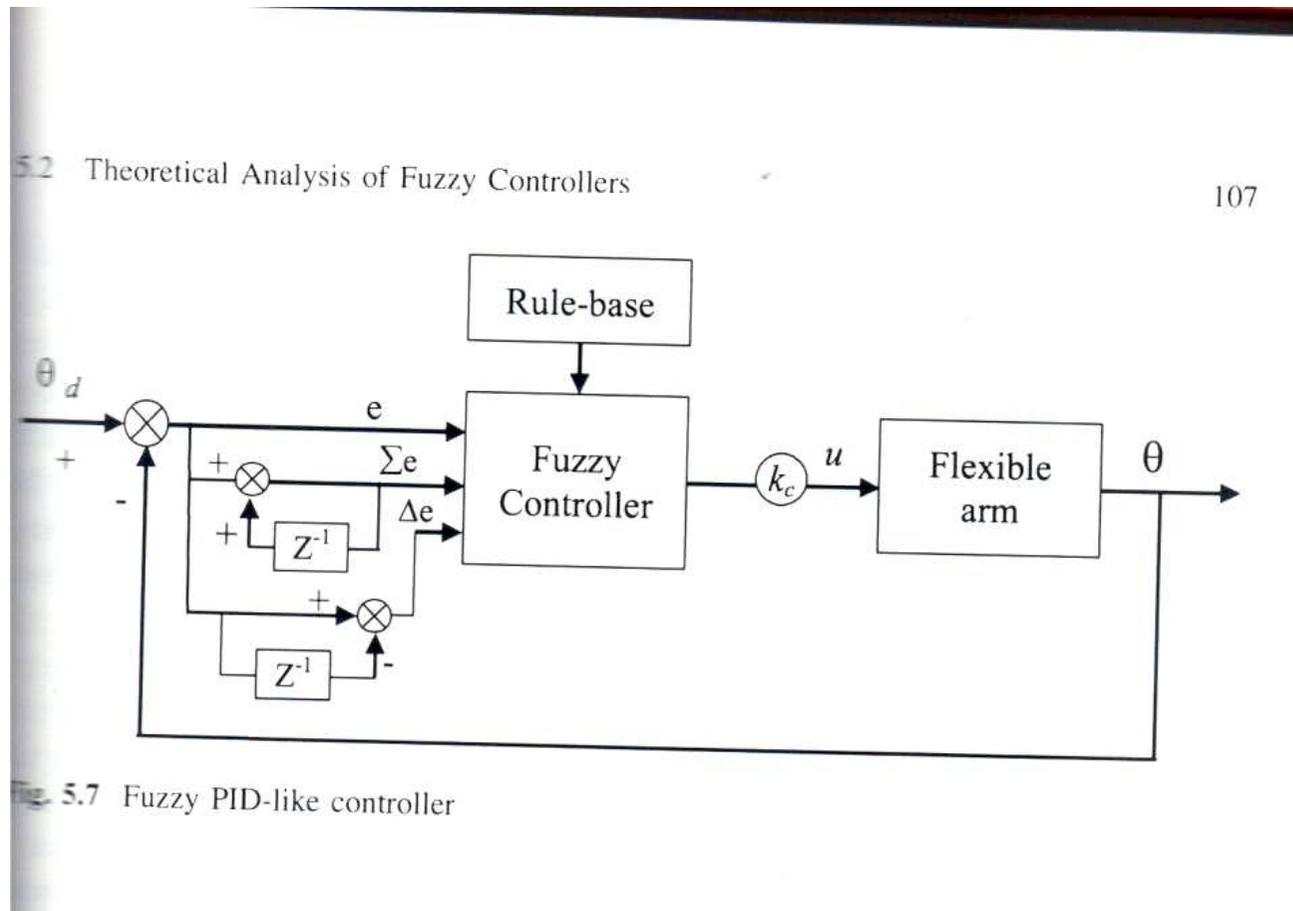
If e is A_i and Δe is B_j and Σe is C_k then u is D_l

onde A_i , B_j , C_k , D_l $i=1,\dots,n_1$, $j=1,\dots,n_2$, $k=1,\dots,n_3$, $l=1,\dots,m$, são variáveis linguísticas.

O número de regras é dado por $n_1 \times n_2 \times n_3$

Tipos de Controladores Nebulosos

- FLC tipo PID:



Aplicação de Controle Nebuloso

- Máquina de lavar roupas

20
YEARS



W 5873 WPS

Drum: Miele patented HoneycombCare drum, 8.0 kg load capacity

Intelligent washing: Automatic load adjustment with fuzzy logic that will adjust water automatically for best wash results and electricity and time savings.

Spin speeds: Maximum spin speed 1600 rpm; "Rinse hold" option; "Without final spin" option; Imbalance monitoring; Gentle run up to spin.

Design: Sloping fascia; Timeless, classic design with an elegant lotus white fascia control panel.

Controls: Programme selector dial and display; Programme sequence indication on screen.

Additional functions; Time remaining display; Delay start up to 24 hours; "AutoClean" detergent drawer.

Standard and special programmes; Automatic plus; Cottons; Minimum iron; Delicates; Express 20; Dark garments/Denim; Handwash / Woollens Shirts; Proofing; Outerwear; Maintenance programme; Drain/rinse Separate rinse/starch; Hygiene.

Extra options; Pre-wash: Soak; Short; Water plus; Extra quiet; Stains; Eco Feedback ...



Referências

- Behera, L. & Kar, I. (2010). *Intelligent Systems and Control: Principles and Applications*. Oxford University Press. ISBN13: 978-0-19-806315-5.
- Sala, A., Guerra, T. M., & Babuska, R. (2005). Perspectives of fuzzy systems and control. *Fuzzy Sets and Systems*, 156 (3): 432-444.
- Siddique, N. (2013). *Intelligent Control: A Hybrid Approach Based on Fuzzy Logic, Neural Networks and Genetic Algorithms*. Springer, ISBN-13: 978-3319021348 ISBN-10: 3319021346.