

12

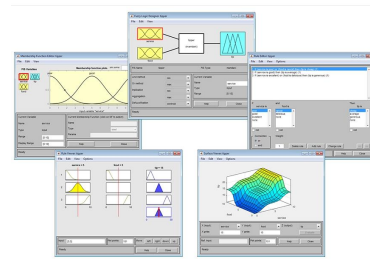
Sistemas de Controlo Inteligente

IC 22/23

Introdução

Os Controladores Inteligentes Difusos, à semelhança dos sistemas Difusos, são constituídos por quatro módulos principais:

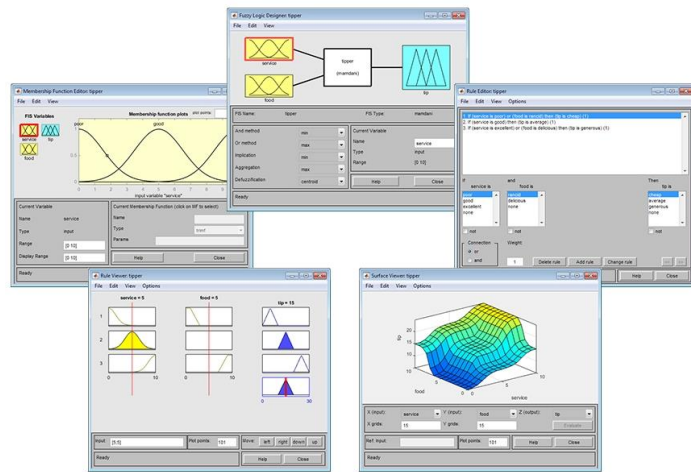
1. Módulo de fuzificação
2. Base de conhecimento
3. Módulo de inferência
4. Módulo de desfuzificação



[Mathworks.com](https://www.mathworks.com)

Introdução

- Módulos:



Fuzificação

- Desempenha o papel de converter o valor real (ou físico ou crespo) numa variável de estado do processo na sua representação difusa.
- Efetua uma transformação de escala (ou seja, normalização da entrada)
 - converte os valores físicos das variáveis de estado do processo num universo de “discurso” normalizado (domínio normalizado).

Fuzificação

■ Exemplo

Variável linguística: erro E

Conjunto de termos linguísticos $LE = \{NG, NM, NP, ZO, PP, PM, PG\}$

$E = [-15, 15]$, universo de discurso;

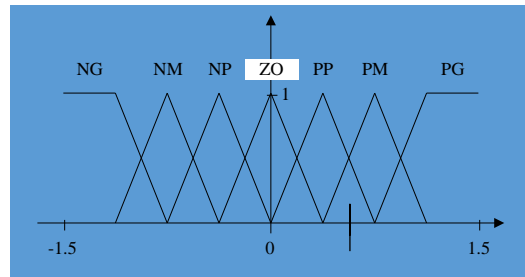
Fator de escala = **0.1**;

Crespo: $e = 7.5$

Normalizado: $e = 0.75$

Difuso:

$E = \{0.5/PP, 0.5/PM\}$



Base de Regras

- A base de regras **define a estratégia de controle**, expressando o conhecimento que o humano (quem está a desenhar o controlador) tem acerca do processo que pretende controlar.
- As regras são da seguinte forma:
 - Se “estado do sistema” =? então “saída do controlador”=?

Base de Regras

- **Parâmetros** envolvidos na construção da base de regras:

1. **Variáveis linguísticas**

- de entrada e saída do controlador;

2. **Termos linguísticos**

- definidos para cada variável linguística;

3. Síntese do **conjunto de regras**.

Base de Regras

■ Escolha das Variáveis Linguísticas

*As variáveis de entrada do controlador (**antecedentes**) são escolhidas de entre:*

- **Erro (valor de Referência desejada-valor de Saída do sistema);**
- **Variação do Erro;**
- Somatório do erro (menos usual).

*As variáveis de saída do controlador (**consequente**) são escolhidas de entre:*

- **Variação da Ação de controle;**
- Ação de controle (menos usual).

Base de Regras

■ ...

Por analogia com um controlador convencional, os valores assumidos pelas variáveis correspondentes são dados por:

$$e_k = r_k - y_k$$

$$\Delta e_k = e_k - e_{k-1}$$

$$\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$$

Base de Regras

- **Escolha do Conjunto de Termos Linguísticos**

Exemplos típicos de conjuntos de termos linguísticos, com três, cinco, sete e nove termos.

$$LX = \{NE, ZO, PO\}$$

$$LX = \{NG, NP, ZO, PP, PG\}$$

$$LX = \{NG, NM, NP, ZO, PP, PM, PG\}$$

$$LX = \{NG, NM, NP, NZ, ZO, PZ, PP, PM, PG\}$$

Base de Regras

• Síntese das Regras

Existem várias abordagens para a síntese das regras de um controlador difuso:

1. baseada numa base de **regras padrão**;
2. baseada na experiência e **conhecimento que o operador** tem acerca do processo;
3. Aprendizagem automática - o controlador **aprende** as regras por ele próprio (adaptativo, sistema **neuro-difuso**)

Base de Regras

Base de regras de MacVicar-Whelan

- Pode ser utilizada como uma aproximação inicial ou ponto de partida, devendo posteriormente ser melhorada através da inclusão, exclusão ou modificação de regras consoante o sistema a controlar.

ΔE (Variação do erro)

	NG	NM	NP	ZO	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	ZO
NM	NG	NG	NG	NM	NP	ZO	PP
NP	NG	NG	NM	NP	ZO	PP	PM
ZO	NG	NM	NP	ZO	PP	PM	PG
PP	NM	NP	ZO	PP	PM	PG	PG
PM	NP	ZO	PP	PM	PG	PG	PG
PG	ZO	PP	PM	PG	PG	PG	PG

Grupo 0
 Grupo 1
 Grupo 2
 Grupo 3
 Grupo 4

Base de Regras

- ...
 - Versão simplificada:

		change in error		
		<i>N</i>	<i>Z</i>	<i>P</i>
error	<i>N</i>	NB	NS	Z
	<i>Z</i>	NS	Z	PS
	<i>P</i>	Z	PS	PB

13

Base de Regras

Conhecimento Pericial

Como construir a tabela? A partir da experiência do operador humano ao controlar um processo:

Regra	E	ΔE	ΔU
1	N	N	?
2	N	Z	?
3	N	P	?
4	Z	N	?
5	Z	Z	?
6	Z	P	?
7	P	N	?
8	P	Z	?
9	P	P	?

		ΔE		
		N	Z	P
E	N	1	2	3
	Z	4	5	6
	P	7	8	9

77

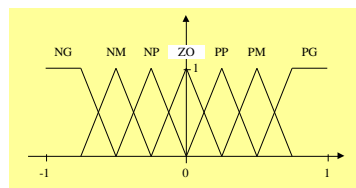
Base de Dados

- A Base de Dados faculta a informação necessária ao funcionamento do Módulo de Fuzificação, Inferência e do Módulo de Desfuzificação.
- Esta informação inclui:
 - As **funções de pertença** que representam o significado dos termos linguísticos das variáveis de entrada/saída do controlador;
 - **Os domínios físicos** e correspondentes domínios normalizados, bem como os factores de escala (normalização/"desnormalização").

Base de Dados

■ Especificação das Funções de Pertença

O tipo das funções de pertença que descrevem os termos linguísticos afetam o desempenho do controlador difuso. Normalmente usam-se funções triangulares!



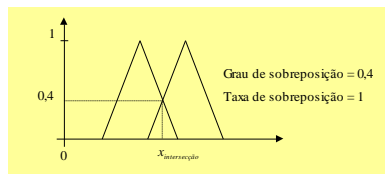
Base de Dados

■ ...

Sobreposição

O grau de sobreposição entre duas funções de pertença é definido como sendo o grau de pertença correspondente ao ponto do universo de discurso em que se intersectam.

O grau de sobreposição é um valor entre 0 e 1.

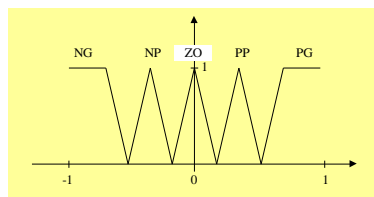


Base de Dados

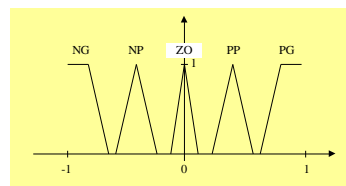
■ ...

Se o grau de sobreposição entre duas funções de pertença é zero apenas disparará uma regra de cada vez.

Foi demonstrado que 0,5 é o valor ótimo para o grau de sobreposição.



grau de sobreposição zero.



grau de sobreposição insuficiente!

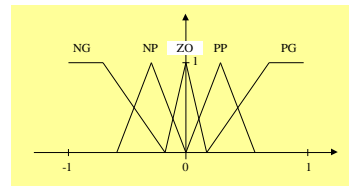
Base de Dados

Simetria e largura

Numa primeira abordagem, para a realização de um controlador difuso as funções de pertinência que descrevem os termos linguísticos devem ser simétricas e equidistantes.

Nos controladores difusos é frequente encontrar funções de pertinência com larguras diferentes: as funções de pertinência com maior largura são menos importantes pois o controlo é menos preciso;

Para obter um controlo mais preciso, ou mais fino, é necessário utilizar funções de pertinência com menor largura.



Base de Dados

• Escolha dos Factores de Escala

A utilização de domínios normalizados requer uma transformação de escala que mapeie os valores físicos das variáveis de estado do processo num domínio normalizado - normalização da entrada.

Da mesma forma, é necessária uma transformação de escala que converta o valor normalizado da variável de saída do controlador num valor pertencente ao domínio físico dessa variável.

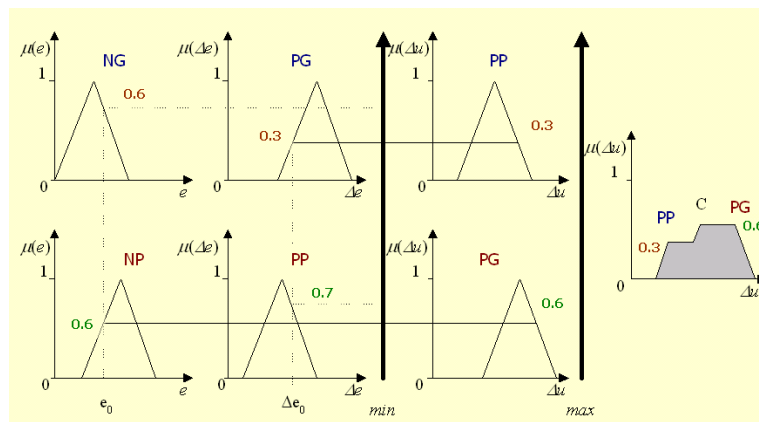
Inferência

Mecanismo de inferência (síntese)

A partir dos valores crespos das variáveis E e ΔE :

- É feita a sua fuzificação obtendo-se representações difusas;
- Destas últimas e da base de regras obtém-se a saída do controlador (conjunto difuso)
- Finalmente, e porque se pretende um valor real à saída do controlador, é necessário aplicar um dos métodos de desfuzificação a esse conjunto difuso, para se obter o valor crespo da variação da ação de controlo

Inferência



Desfuzificação

O módulo de desfuzificação desempenha a operação de desfuzificação, que converte o conjunto difuso relativo à variável de saída do controlador num valor crespo.

Efectua a “desnormalização” da saída, convertendo o valor crespo normalizado num valor pertencente ao domínio físico da variável.

Os métodos de desfuzificação mais utilizados são:

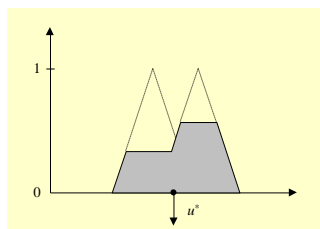
- método do centro da área;
- método da altura;

Desfuzificação

- **Método do centro da área** CoA.

Este método tem em consideração a área como um todo (U).

Complexo do ponto de vista computacional, resultando num processo de inferência mais lento, dificultando a aplicação em tempo real.



$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^I u_i \cdot \mu_U(u_i)}{\sum_{i=1}^I \mu_U(u_i)}$$

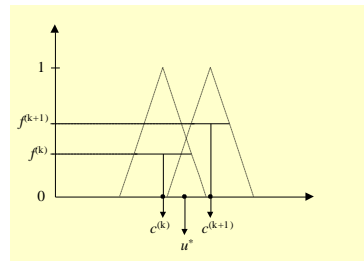
Desfuzificação

- **Método da altura**

Este método, em vez de utilizar o valor difuso global da saída do controlador, recorre às saídas individuais das regras.

O método toma o valor máximo de cada conjunto difuso e calcula soma pesada pelos pontos de corte destes valores.

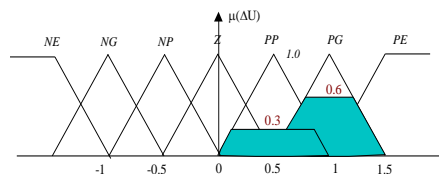
É um método simples e rápido.



$$u^* = \frac{\sum_{k=1}^m c^{(k)} \cdot f_k}{\sum_{k=1}^n f_k}$$

Desfuzificação

- **Método da altura - Exemplo**

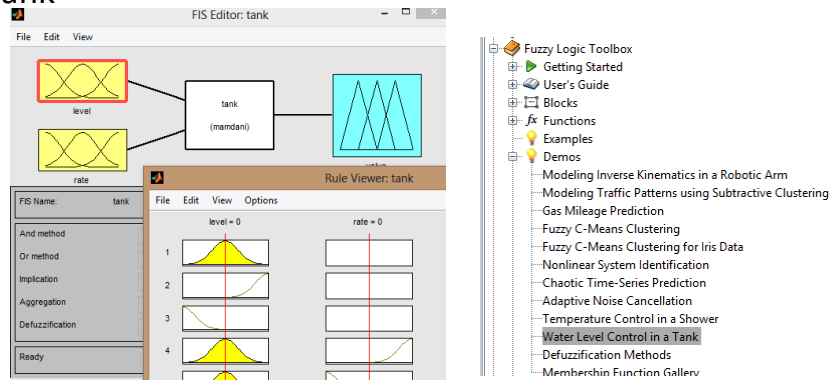


$$\Delta U = \frac{0.3 \cdot 0.5 + 0.6 \cdot 1.00}{0.3 + 0.6}$$

Exemplos

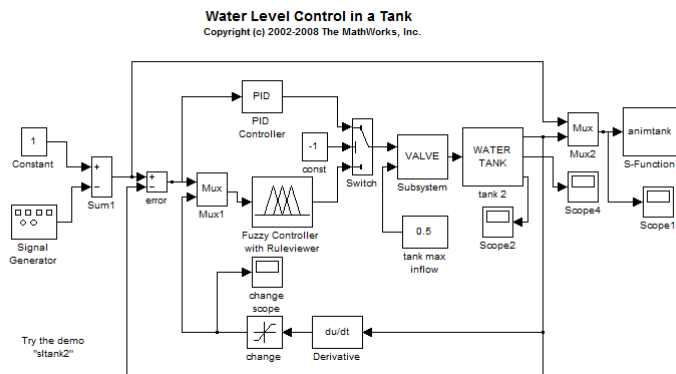
- Exemplo no Matlab

>> fuzzy tank



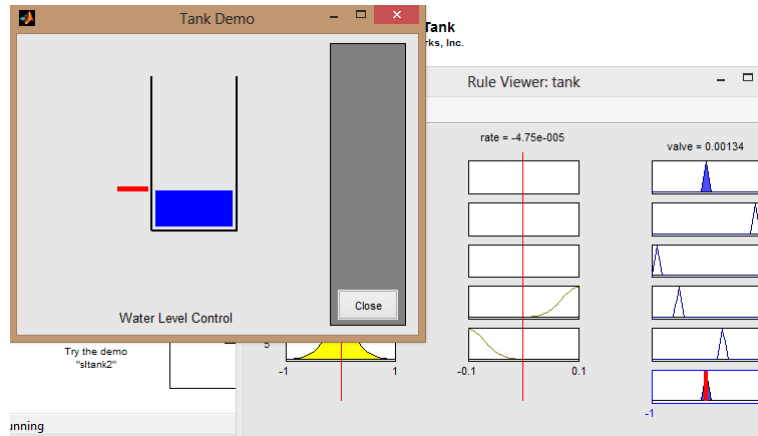
Fuzzy tank

- ...
- Simulink



Fuzzy tank

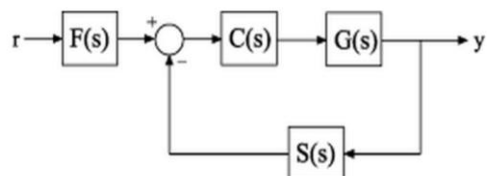
- ...



29

Esquemas de Controlo

- Controlo por Realimentação (feedback)

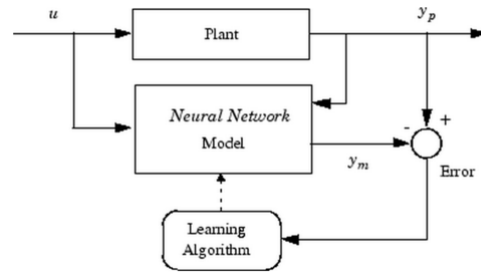


- Funções de Transferência:
 - $S(s)$ Dinâmica do Sensor
 - $F(s)$ Filtro do sinal de referência
 - $C(s)$ **Controlador**
 - $G(s)$ Sistema (ou Planta ou Processo)

30

Esquemas de Controlo

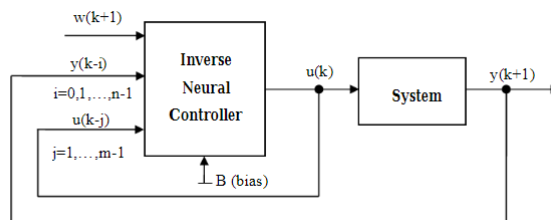
- Identificação de Sistemas com redes neuronais



31

Esquemas de Controlo

- Controlo por Modelo Inverso

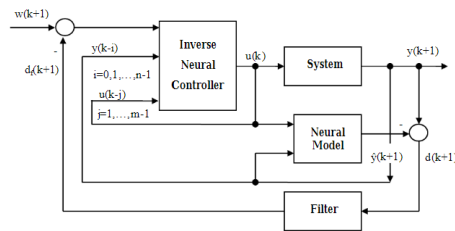


- Problema: Como eliminar erro em regime final?

32

Esquemas de Controlo

- Controlo por Modelo interno
 - Internal Model Control (IMC)

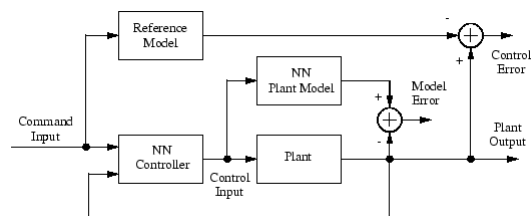


- Usa modelo inverso como controlador!
- Usa a diferença entre saída do sistema e do modelo com feedback para eliminar erro em regime final (referência-saída)
 - Pode usar um filtro para atenuar mudanças bruscas da referência

33

Esquemas de Controlo

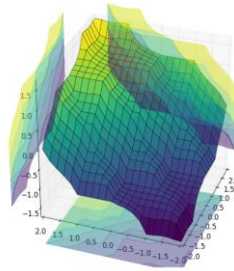
- Controlo por Modelo de Referência



34

Exemplos

- ...
 - https://pythonhosted.org/scikit-fuzzy/auto_examples/plot_control_system_advanced.html#



35

Referências

- Computational Intelligence, Andries Engelbrecht, Cap. 22
- Matlab Fuzzy Logic Toolbox

36