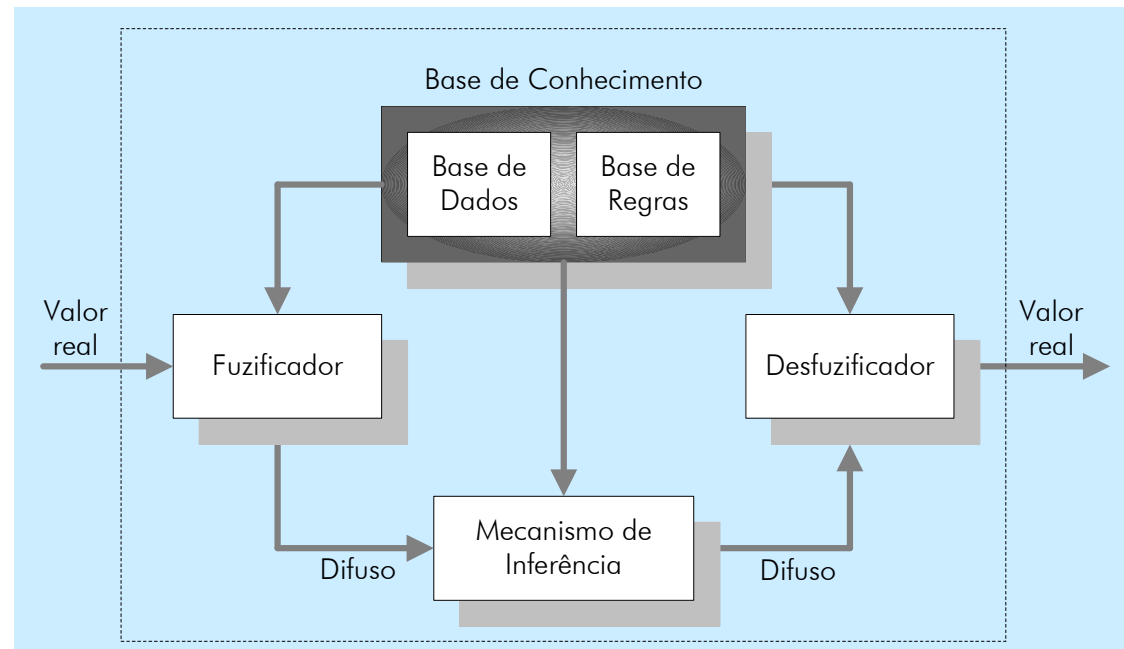


Sistemas Difusos



Jorge Henriques



Departamento de Engenharia Informática, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra

Dei, Dezembro de 2010

Sumário

- 1. Sistema a Controlar**
- 2. Esquema de Controlo**
- 3. Controlador difuso**
- 4. Matlab (sistemas difusos)**
- 5. Trabalho 4 - controlo difuso**

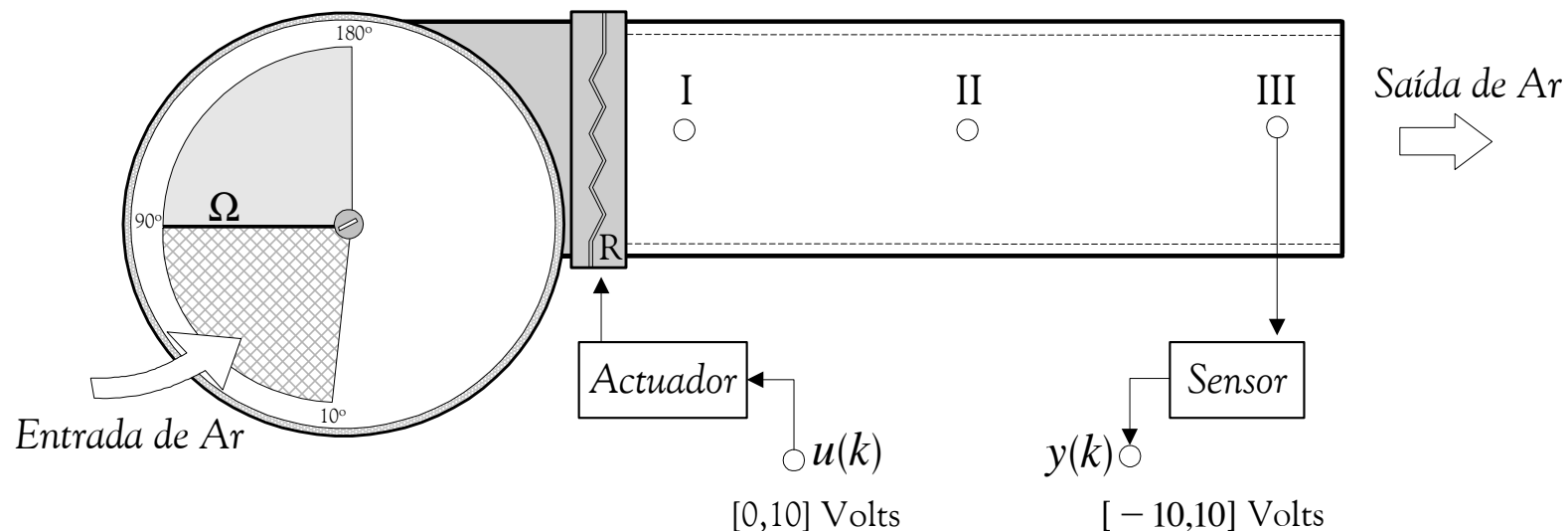
1. Sistema a Controlar

Variável a controlar (**temperatura do ar à saída do aquecedor**), medido por um sensor (termómetro)

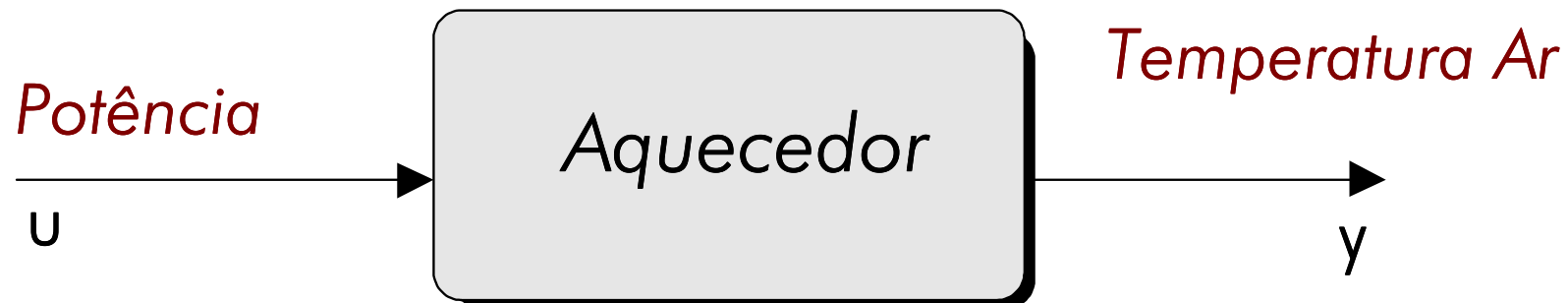
■ Operacional no intervalo $[0..50] \text{ } ^\circ\text{C.} \equiv [-10,..10,] \text{ Volts}$

Como? Manipulando a **potência a fornecer à grelha de aquecimento**

■ No intervalo $[0..100] \% \equiv [0,..10,] \text{ Volts}$

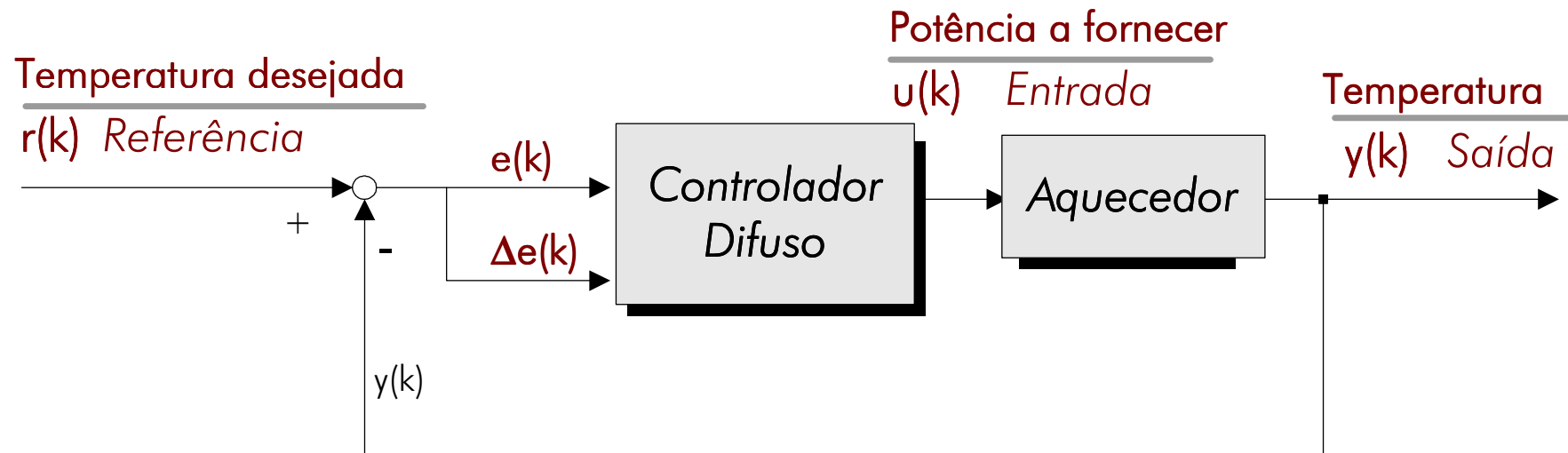


Graficamente (diagrama de blocos)



- U - entrada – potência a fornecer à grelha [0..100] %
- Y - saída – temperatura do ar [0..50] °C

2. Esquema de controlo



Entradas do sistema (controlador) difuso:

erro e variação do erro

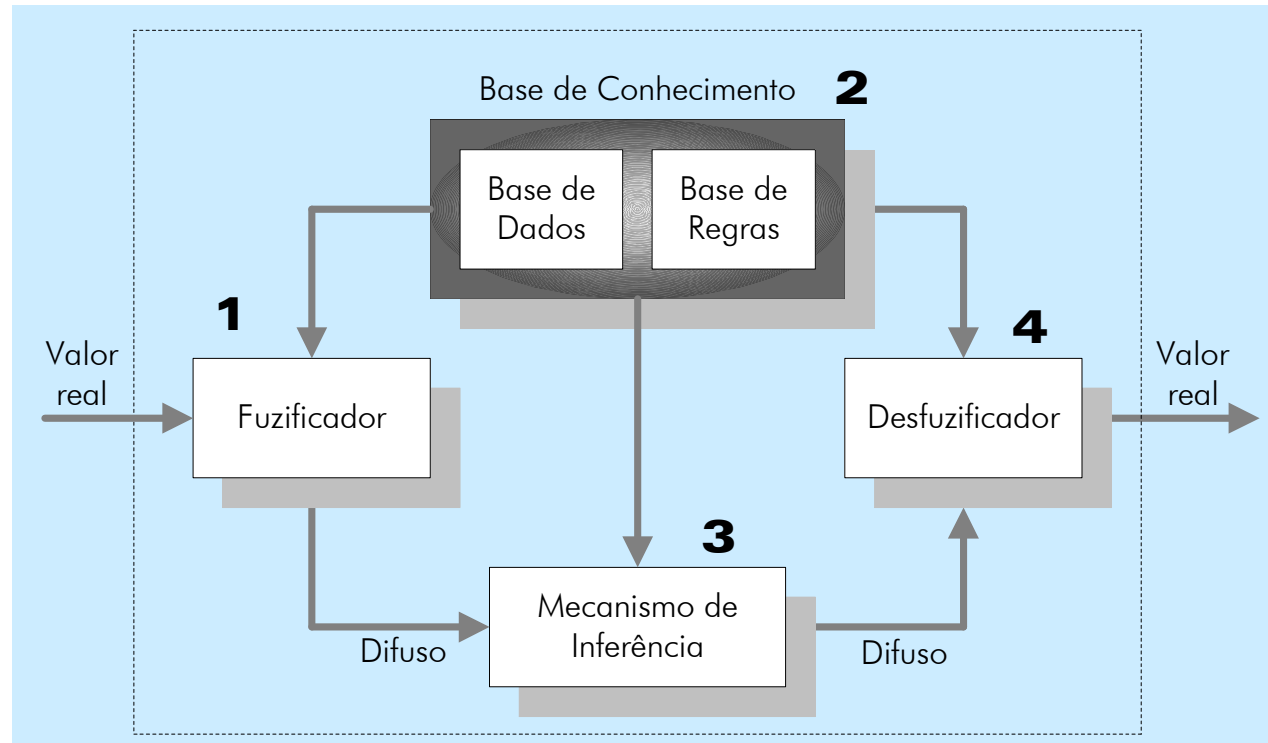
Saídas do sistema (controlador) difuso:

variação da acção de controlo



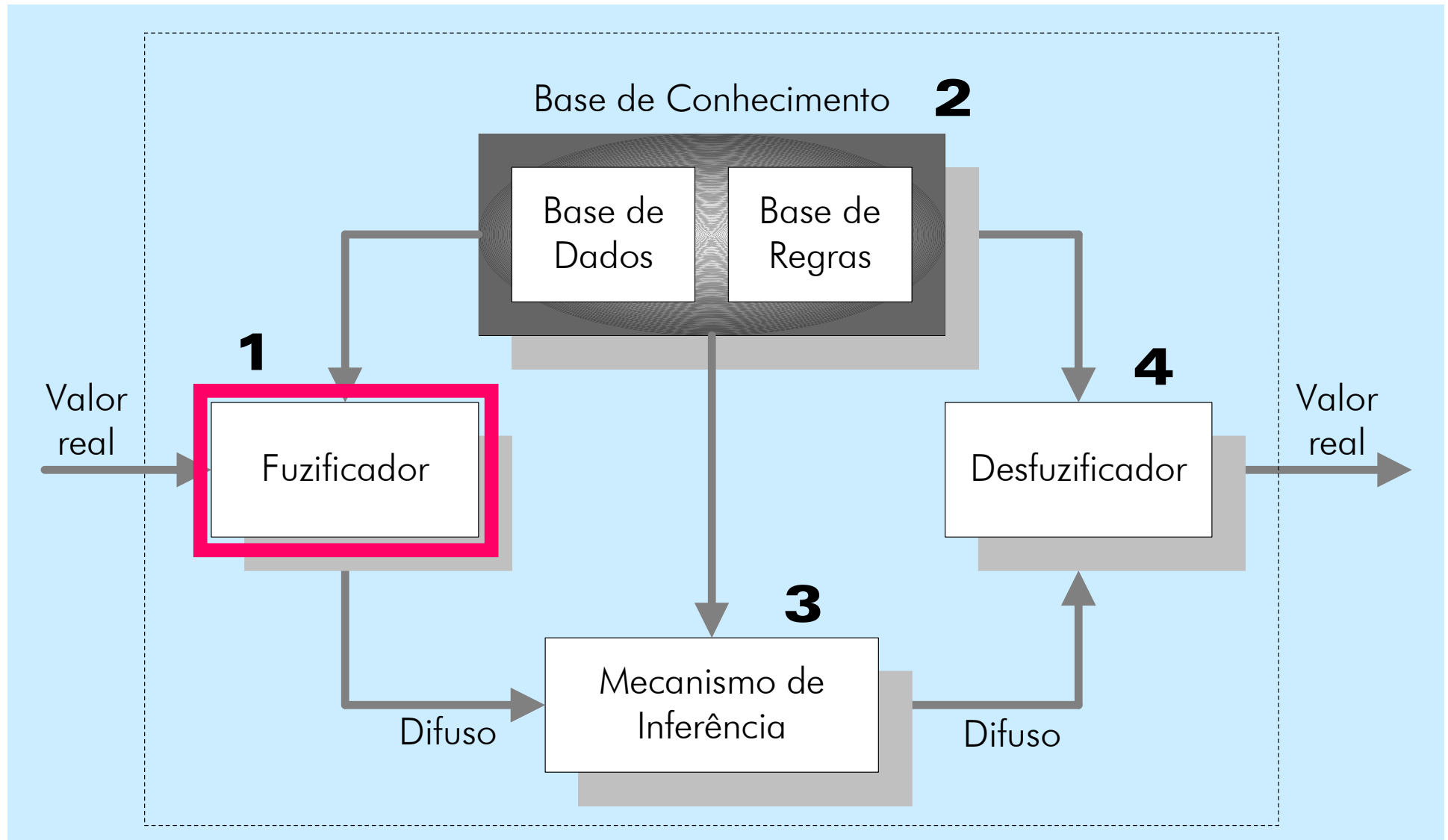
$$\begin{aligned}e(k) &= r(k) - y(k) \\ \Delta e(k) &= e(k) - e(k-1) \\ \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1)\end{aligned}$$

3. Controlador Difuso



Um controlador difuso é constituído por quatro módulos principais:

- 1. **Módulo de** fuzificação **ou fuzificador;**
- 2. **Base de conhecimento;**
- 3. **Mecanismo de** inferência;
- 4. **Módulo de** desfuzificação **ou desfuzificador.**



3.1 Módulo de Fuzificação

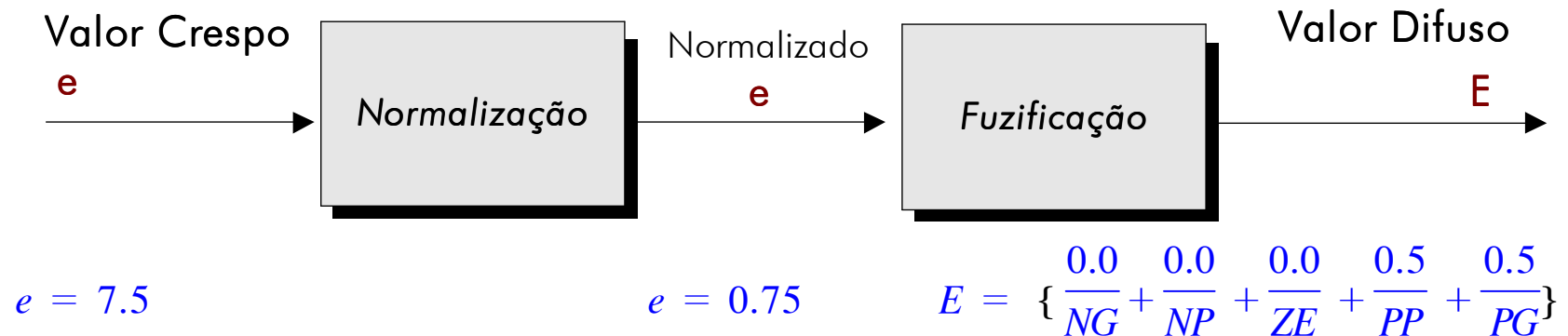
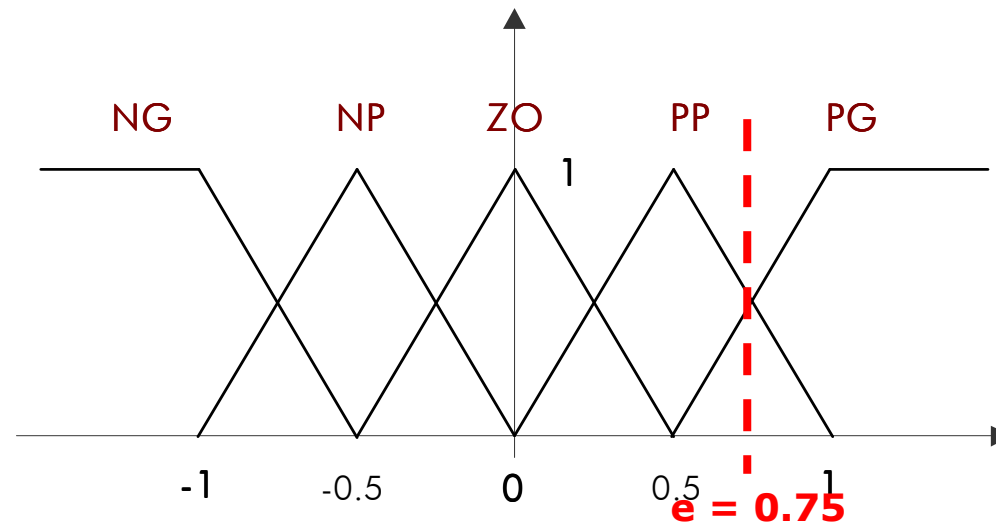
O objectivo da operação de fuzificação é converter um valor numérico na sua representação difusa. Implica definir:

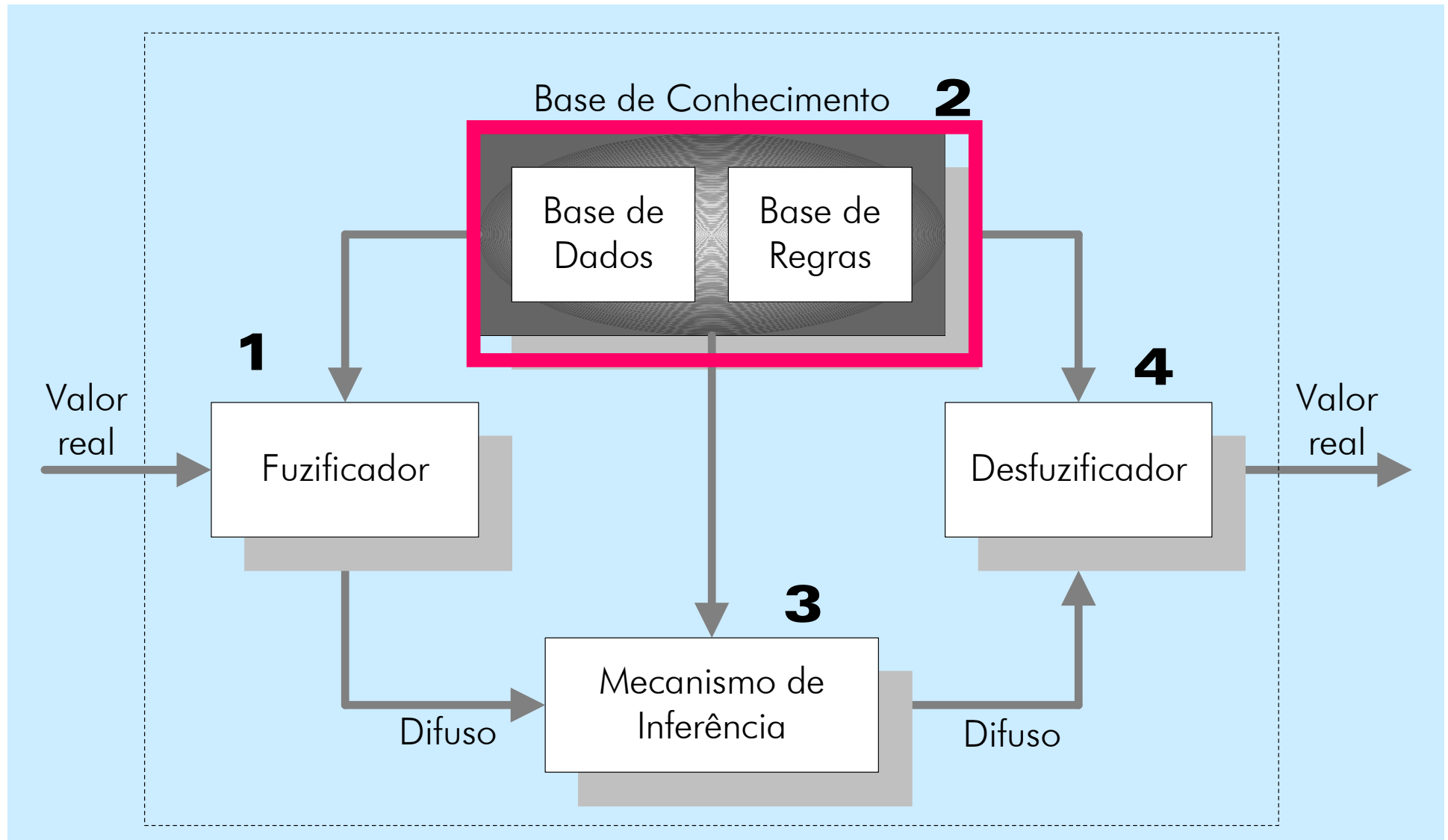
- **Factores de escala;**
- **Variáveis linguísticas;**
- **Universo de discurso;**
- **Termos linguísticos**
- **e respectivos conjuntos difusos.**

Exemplo

- E , variável linguística erro;
- $LE = \{ NG, NP, ZO, PP, PG \}$, conjunto de termos linguísticos;
- $E = [-10, 10]$, universo de discurso;
- **Factor de escala = 0.1** (*normalização para o intervalo $[-1,1]$*)
- **Conjuntos difusos triangulares**

Variável erro, 5 termos linguísticos, conjuntos difusos triangulares.





3.2 Módulo de regras e de Dados

Base de Regras

A base de regras **define a estratégia de controlo**, expressando o conhecimento que quem está a projectar o controlador tem acerca do processo. As regras são da seguinte forma:

SE < estado do processo > ENTAO < valor do controlador >

A parte do *SE < >* de uma regra é designada por **antecedente** da regra.

A parte do *ENTAO < >*, designa-se por **consequente** da regra.

Exemplo

- **SE** <Erro é muito negativo> **e** <Variação do Erro é pequena> **ENTÃO**
- <Variação da acção de controlo será muito positiva>

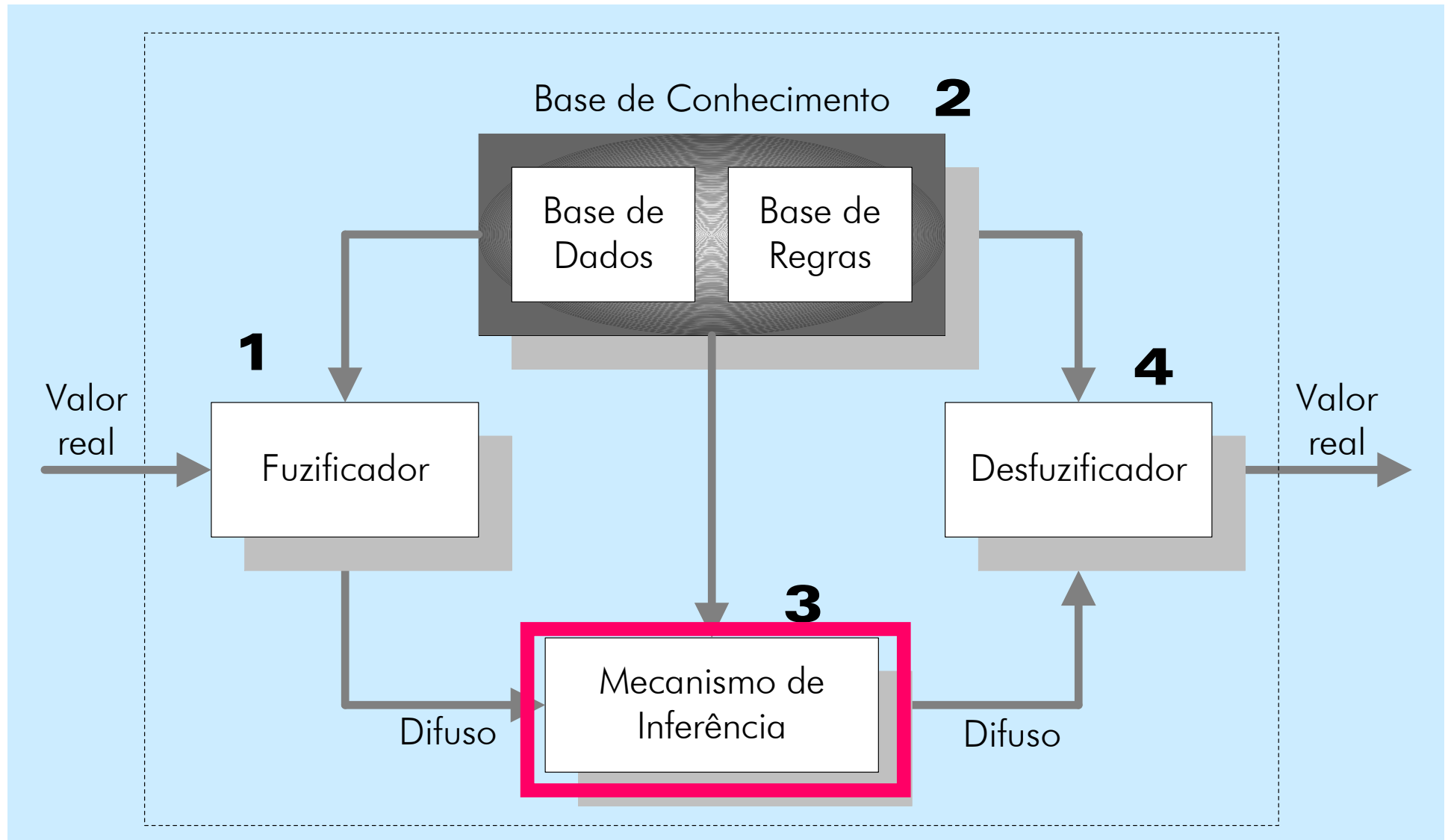
Como construir a tabela = como controlar um processo ?

Bom senso !!!

Exemplo:

<i>regra</i>	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



3.3 Modulo de Inferência

Implicação de Mamdani

A mais conhecida no que diz respeito ao controlo difuso. A sua definição é baseada

1. **operação de intersecção para os antecedentes;**
2. mecanismo de inferência: **conceito de raciocínio aproximado para os consequentes.**

1. Operação de intersecção (mínimo)

São combinados os antecedentes por uma qualquer operação de conjunção, por exemplo o *mínimo* ou o *produto*.

2. Inferência: raciocínio aproximado

Regra: Se o *diospiro* está *vermelho* então o *diospiro* está *maduro*

Antecedente: O *diospiro* está *muito vermelho*

Consequente:

∴ O diospiro está muito maduro

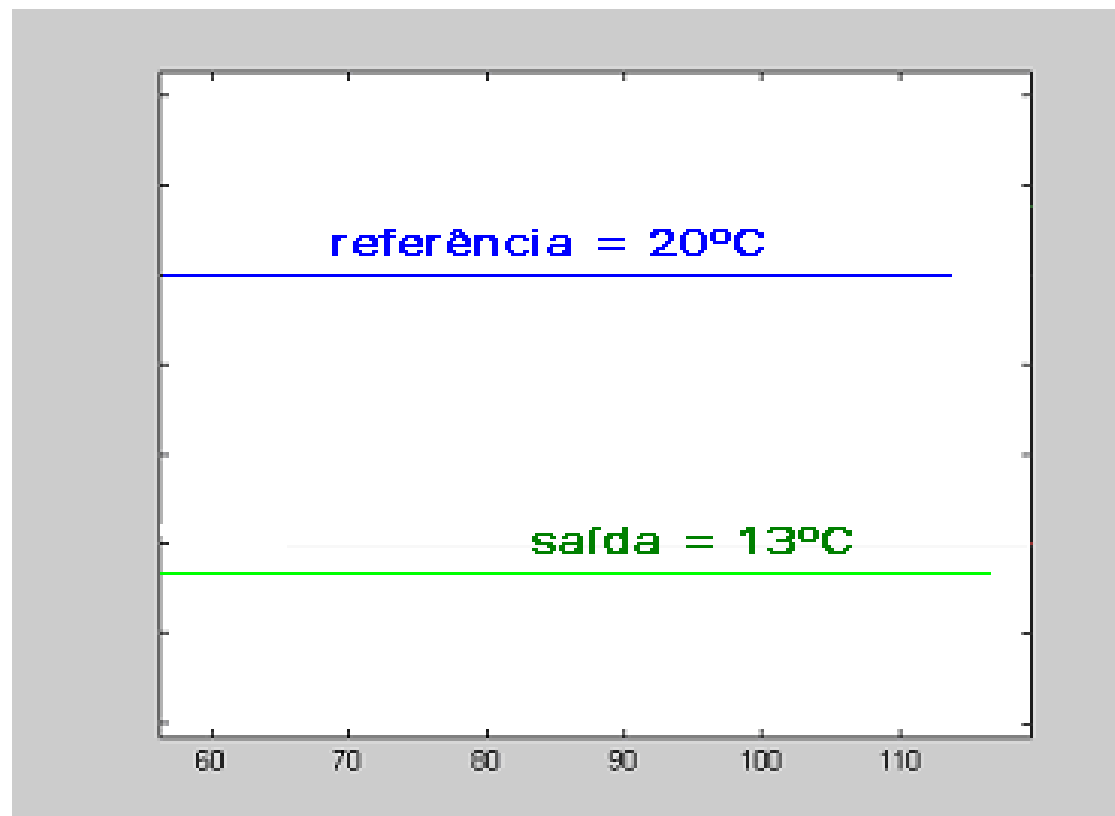
- **Por outras palavras se o antecedente é verdade com um grau X o consequente será verdade com o mesmo grau X .**

Exemplo

Estado actual

Admita-se que se deseja um valor de temperatura (referência) de 20 °C e que o valor actual é de 13° C.

- tem-se portanto um erro de 7°C ($e(k) = r(k) - y(k)$) e
- uma variação do erro nula ($\Delta e = e(k) - e(k-1)$).



1. Fuzificação

i) Entradas

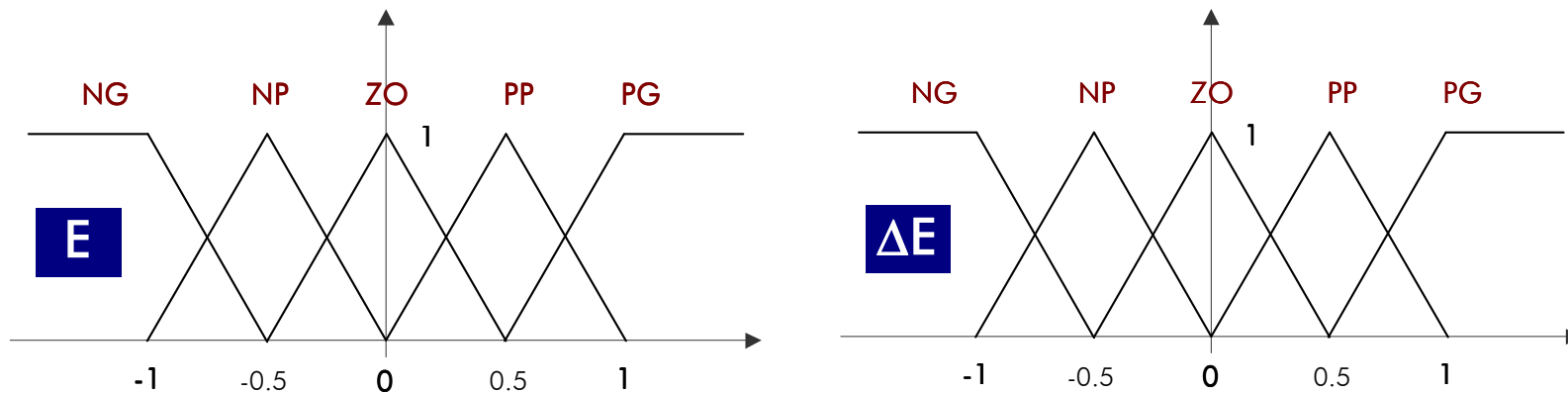
Consideram-se como variáveis de entrada do sistema difuso

■ Erro (E) e variação do erro (ΔE)

Consideram-se, por exemplo, os **termos linguísticos** para o erro e variação do erro

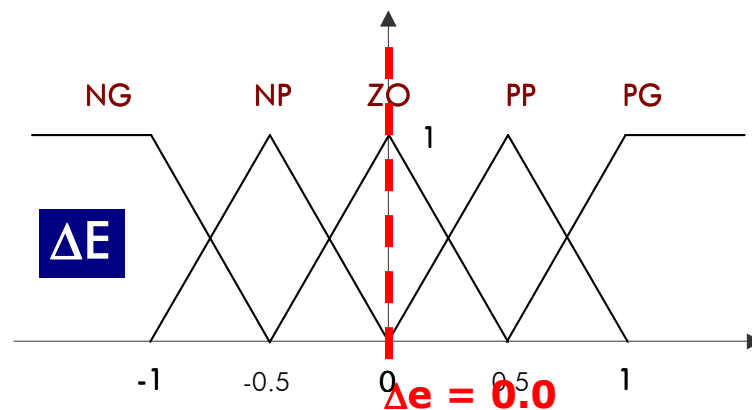
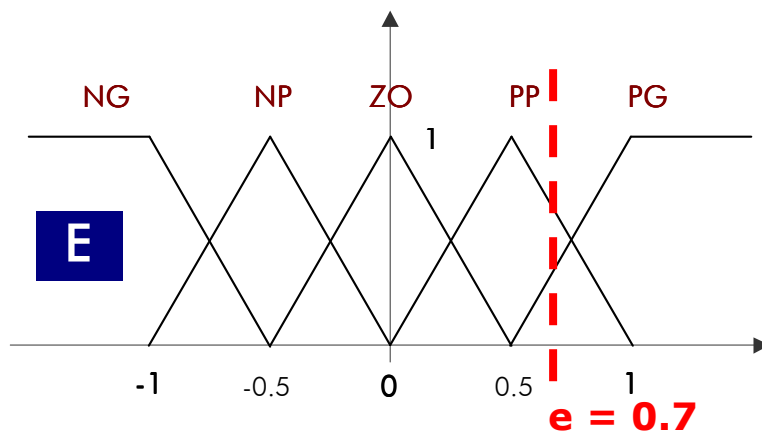
$$LE = \{ NG, NP, ZO, PP, PG \}$$

$$L\Delta E = \{ NG, NP, ZO, PP, PG \}$$



ii) Fuzificação

Os valores crespos de $e=7$ e $\Delta e = 0$, resultam nos seguintes valores difusos



$$E = \left\{ \frac{0}{NG} + \frac{0}{NP} + \frac{0}{ZO} + \frac{0.6}{PP} + \frac{0.4}{PG} \right\}$$

$$E = \left\{ \frac{0.6}{PP} + \frac{0.4}{PG} \right\}$$

$$\Delta E = \left\{ \frac{0}{NG} + \frac{0}{NP} + \frac{1.0}{ZO} + \frac{0}{PP} + \frac{0}{PG} \right\}$$

$$\Delta E = \left\{ \frac{1.0}{ZO} \right\}$$

3 Mecanismo de Inferência

Admitimos a activação das seguintes regras:

Regra 1) $SE \langle E \text{ e } PP \rangle \text{ e } \langle \Delta E \text{ e } ZO \rangle \text{ ENTAO } \langle \Delta U \text{ e } ZO \rangle$

Regra 2) $SE \langle E \text{ e } PG \rangle \text{ e } \langle \Delta E \text{ e } ZO \rangle \text{ ENTAO } \langle \Delta U \text{ e } PP \rangle$

1. Antecedentes: operação de intersecção (**mínimo**)

Regra 1)

$$E = \frac{0.6}{PP} \text{ e } \Delta E = \frac{1.0}{ZO} \qquad \min(0.6, 1.0) = 0.6$$

Regra 2)

$$E = \frac{0.4}{PG} \text{ e } \Delta E = \frac{1.0}{ZO} \qquad \min(0.4, 1.0) = 0.4$$

2. Inferência: raciocínio Aproximado

Regra 1)

$$\Delta U = \frac{0.6}{ZO}$$

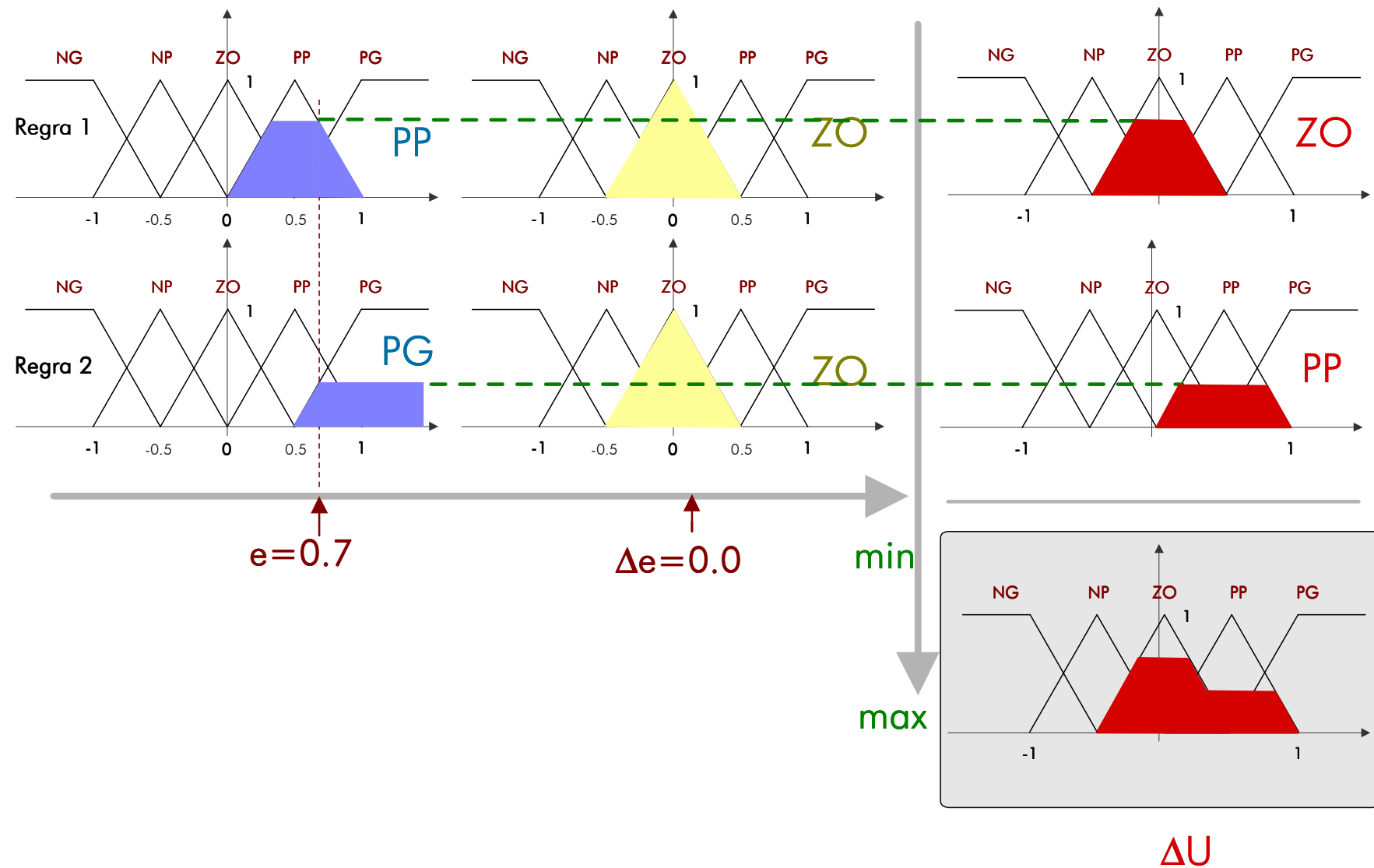
Regra 2)

$$\Delta U = \frac{0.4}{PP}$$

3. Conclusão (mecanismo de inferência) (**máximo**)

$$\Delta U = \left\{ \frac{0.6}{ZO} + \frac{0.4}{PP} \right\}$$

Graficamente



Regra 1

SE <E e PP> e <ΔE e ZO> ENTÃO <ΔU e ZO>

$$E = \frac{0.6}{PP} \text{ e } \Delta E = \frac{1.0}{ZO} \Rightarrow \Delta U = \frac{0.6}{ZO}$$

Regra 2

SE <E e PG> e <ΔE e ZO> ENTÃO <ΔU e PP>

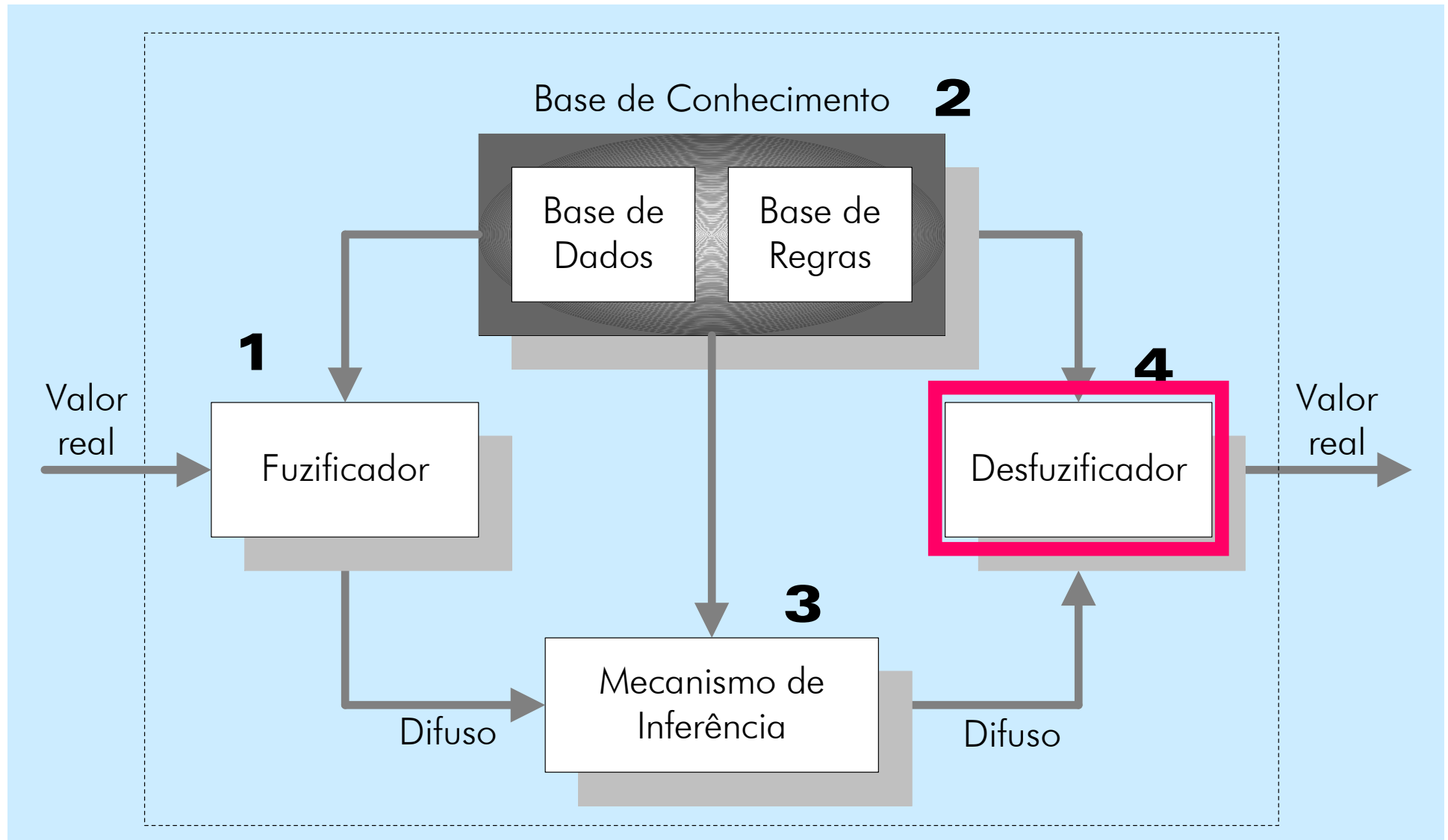
$$E = \frac{0.4}{PG} \text{ e } \Delta E = \frac{1.0}{ZO} \Rightarrow \Delta U = \frac{0.4}{PP}$$

Agregação

$$\Delta U = \left\{ \frac{0.6}{ZO} + \frac{0.4}{PP} \right\}$$

4. Desfuzificação

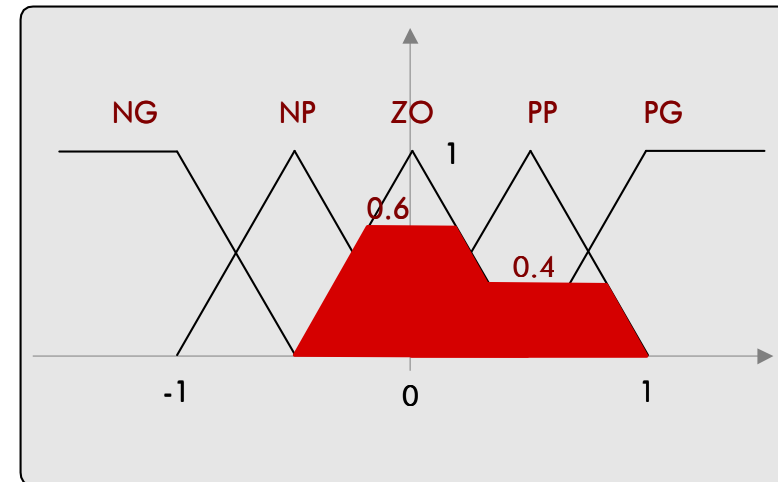
Finalmente, e porque se pretende um valor real à saída do controlador, é necessário aplicar um dos métodos de desfuzificação a esse conjunto difuso, para assim se obter o valor crespo para a acção de controlo.



3.4 Módulo de desfuzificação

Por fim é necessário **converter conjunto difuso num valor crespo** (numérico).

$$\Delta U = \left\{ \frac{0.6}{ZO} +, \frac{0.4}{PP} \right\}$$



Valores dos picos

$$ZO = 0.0 \quad e \quad PP = 0.5$$

$$\Delta U(k) = \frac{0.0 \times 0.6 + 0.4 \times 0.5}{0.6 + 0.4} = 0.02$$

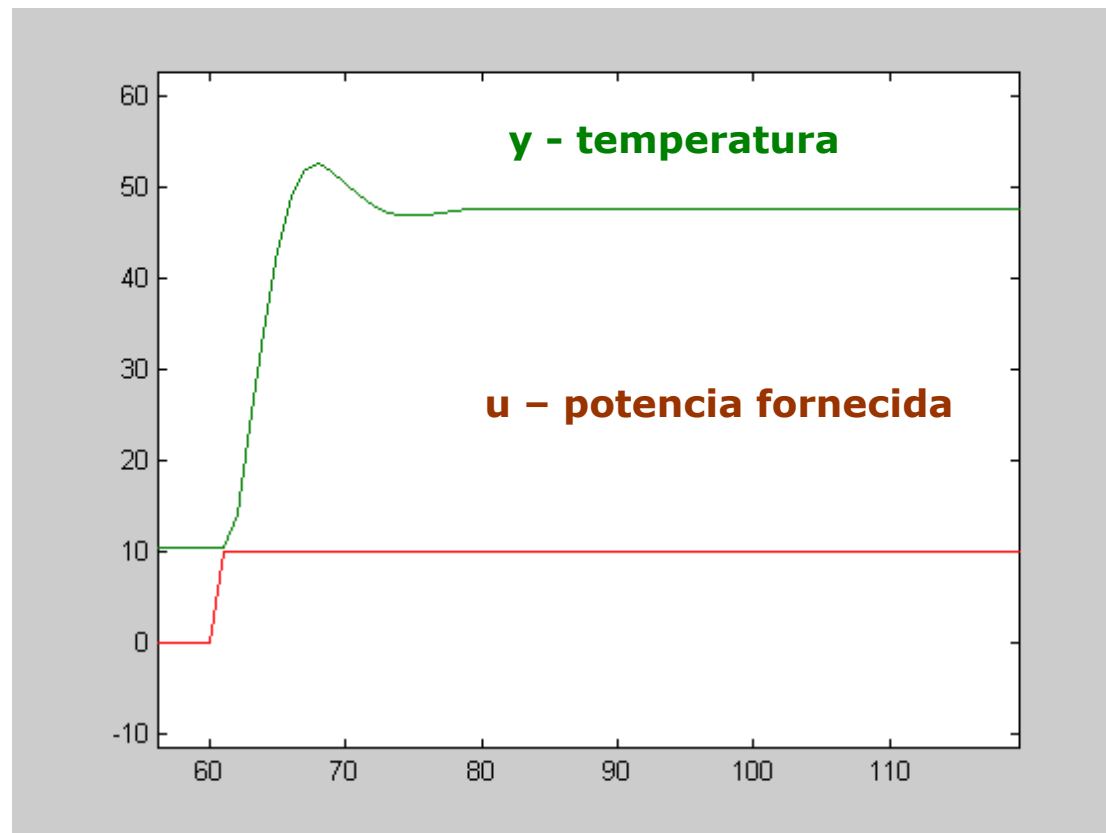
$$u(k) = u(k-1) + \Delta U(k) = u(k-1) + 0.02$$

Conclui-se que a acção de controlo no próximo instante deve ser incrementada 0.02 unidades.

4. MatLab

1 Sistema (pt326)

$$y(k) = pt326(u(k-1), u(k-2), y(k-1), y(k-2))$$



2. Controlador Proporcional

Assumindo, por exemplo, que se deseja implementar um controlador proporcional, o código Matlab poderá ser:

```
%----- Valores globais
N=300
R=25*ones(N,1);           % referencia (25=temp.desejada)
Y=zeros(N,1);             % saida (temperatura)
U=zeros(N,1);             % entrada (potencia grelha)
%----- Valores em cada instante
yk =0; yk1=0; yk2=0;
uk =0; uk1=0; uk2=0;
rk =0;
ek =0;
%----- Controlador
gP = 0.31; % ganho do controlador
```

```

%----- Ciclo Principal
for i=1:N

    %----- 1. saída do sistema - temperatura
    %::: adquire temperatura do processo pt326 - [0..50] °C
    yk=pt326(uk1,uk2,yk1,yk2);

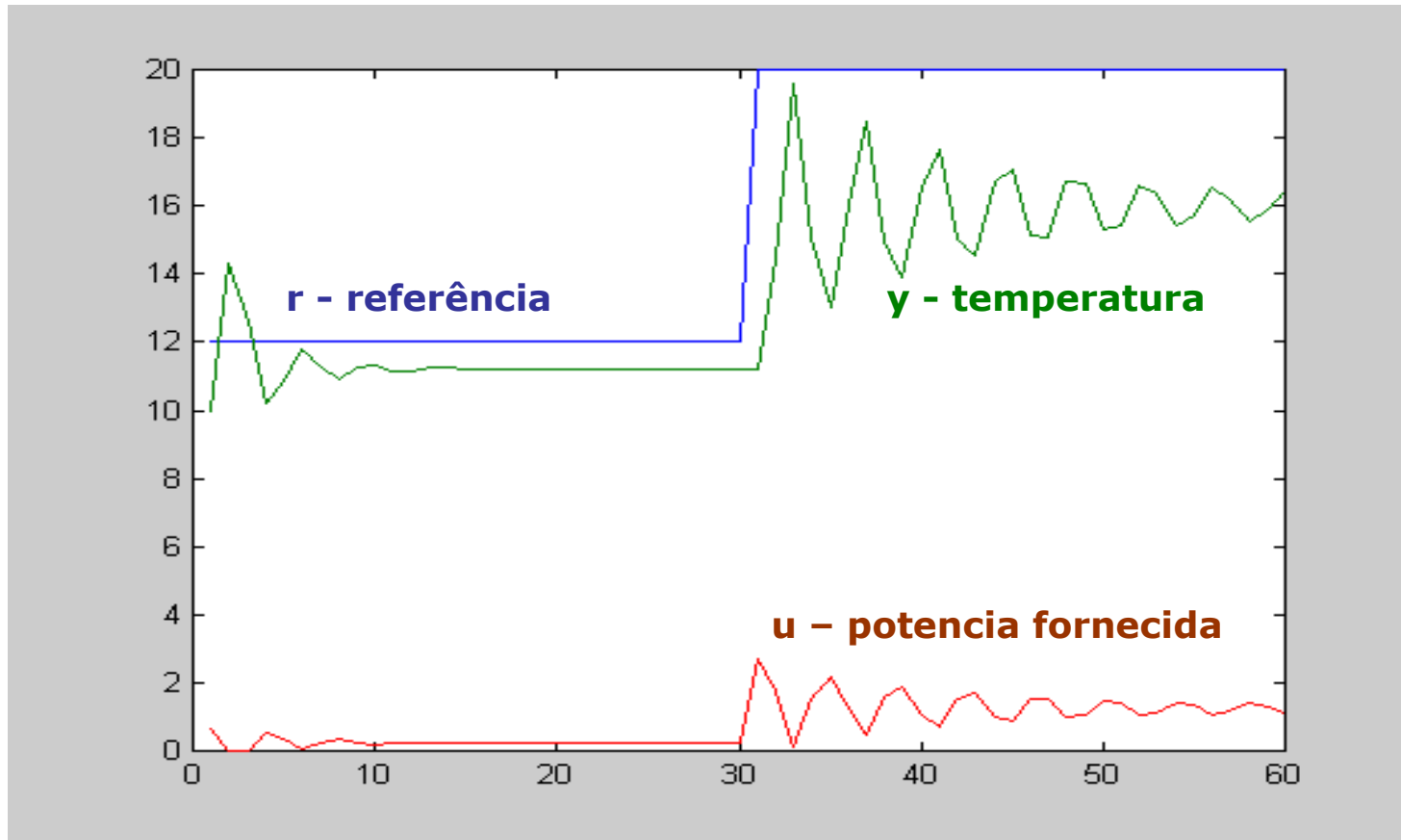
    %----- 2. referencia e erro
    rk = R(i);
    ek = rk-yk;

    %----- 3. acção de controlo (potencia)
    duk = gP*ek;
    uk = uk1 + duk;
    if uk< 0; uk= 0; end % limites físicos da potencia
    if uk>100; uk=100; end % do aquecedor [0..100]%
    %::: envia sinal ao processo pt326

    %----- 4. guardar dados e actualização
    Y(i)=yk;
    U(i)=uk;
    uk2=uk1; uk1=uk;
    yk2=yk1; yk1=yk;
end

```

```
%----- Erro Total e Visualizacao  
erro = sum( (R-Y).^2 )  
plot([R Y U])
```



3. Controlador Difuso

Definição

O MatLab disponibiliza um interface gráfico para o desenvolvimento de sistemas difusos, que será utilizado neste trabalho.

```
» fuzzy
```

Após o desenvolvimento do controlador difuso (`controladorDifuso`) deve-se guardar o controlador (save to disk), extensão *.fis.

Validação

Depois, para “abrir” o controlador guardado usa-se a função `readfis`

```
» cc=readfis('controladorDifuso.fis')
```

o valor da acção de controlo poderá ser determinada através da função `evalfis`.

```
» duk = evalfis([ erro varerro ], cc);
```

NOTA

A linha de código anterior deverá substituir o controlador proporcional (código MatLab) atrás descrito, ou seja deve modificar a linha de código

```
duk = gP*ek;
```

Além das normalizações e “desnormalizações” necessárias é a única alteração a fazer

5. Conclusão: Trabalho/relatório

1. Entradas: Erro e Variação do erro

Universo de discurso a considerar

Factor de normalização (ou escala) (?)

■ Mecanismo de fuzificação:

Conjunto e número de termos linguísticos $LE = \{ NG, NP, ZO, PP, PG \}$, (?)

Tipo de funções de pertença (triangulares, gaussianas, ?) (?)

2. Base de regras

Baseada na experiência ou “**bom senso**”, do tipo: (?)

$$SE \langle E \text{ e } NG \rangle \text{ e } \langle \Delta E \text{ e } PG \rangle \text{ ENTÃO } \langle \Delta U \text{ e } NP \rangle$$

Note-se que considerando **cinco termos linguísticos** para o erro e variação do erro devem-se definir **25 regras**.

3. Agregação de regras e mecanismo de inferência

Inferência de Mamdani ($\max\{\min\}$?) (?)

4. Saída: Variação do erro

Método de Desfuzificação

- Método das alturas (?) (?)

Avaliação: Como medir o desempenho de um controlador ?

Possível critério

$$\sum [r(k)-y(k)]^2 + \sum [u(k)-u(k-1)]^2$$

- Erro quadrático
- Tendo em conta a variação do actuador