

Perché il Controllo Fuzzy ?

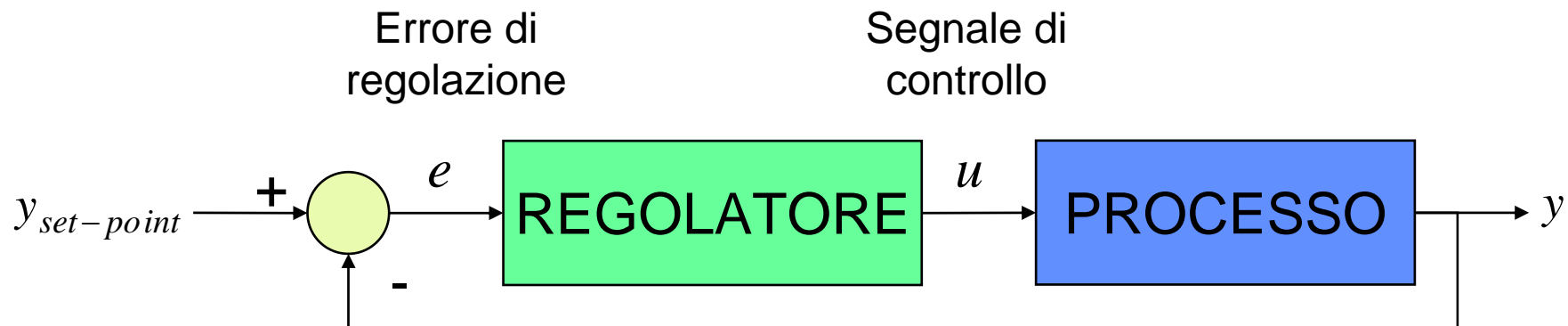
Pregi

- 1 - *Non è necessario un modello matematico dettagliato*
- 2 - *Può incorporare facilmente esperienza umana espressa in termini "qualitativi"*
- 3 - *E' robusto*
- 4 - *E' adattabile alle modifiche del processo*
- 5 - *E' "economico" perché con poche regole si può descrivere un processo di grande complessità*

Difetti

- 1 - *Non fornisce una descrizione dettagliata del processo*
- 2 - *Non è possibile usare tutte le tecniche "classiche" di progettazione, almeno nella versione "a regole" (Mamdani)*
- 3 - *E' euristico (almeno nella forma più semplice)*
- 4 - *Non garantisce alcuna ottimalità (però funziona...)*








Sistema generico di controllo



- ☞ Il regolatore è in genere un sistema dinamico che produce un segnale di controllo u in grado di portare l'uscita del processo y al valore voluto $y_{set-point}$
- ☞ Per fare questo, il regolatore usa generalmente l'errore di regolazione (e) e la sua derivata (r)
- ☞ La struttura del regolatore fuzzy è composta di regole del tipo:

$$IF \ e \ is \ E \ AND \ \frac{de}{dt} \ is \ DE \ THEN \ u \ is \ U$$

Struttura del Regolatore Fuzzy

-  Il regolatore fuzzy è basato sulla definizione delle seguenti quantità:
-  *Un insieme di qualificatori, sia per gli ingressi che per le uscite*
-  *Una procedura di fuzzificazione*
-  *Un insieme di regole che legano gli antecedenti ai conseguenti*
-  *Dei connettivi che realizzano le implicazioni ed i loro collegamenti*
-  *Una procedura di defuzzificazione*
-  *Dei guadagni di normalizzazione/denormalizzazione*

Oltre l'approccio euristico

Passato:

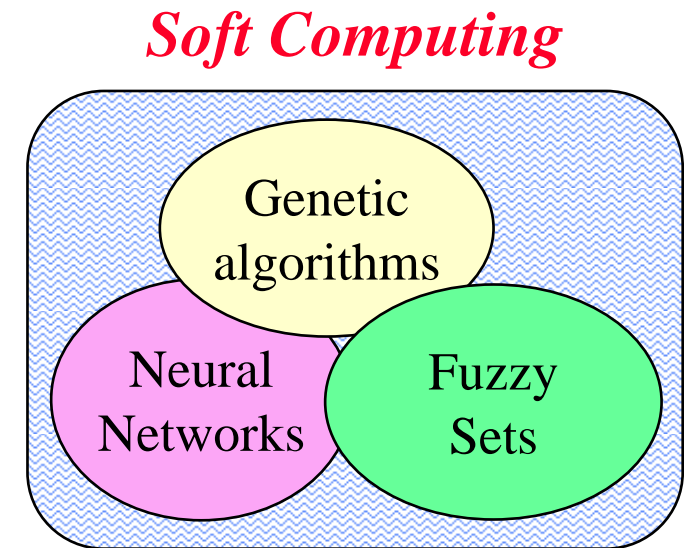
Regole di controllo come replica di comportamenti umani (Approccio euristico)

Presente e Futuro:

Metodi sistematici di definizione delle regole

- Uso di tecniche numeriche ausiliarie come:
Metodi sistematici di sintesi basati su criteri di stabilità

- 👉 Progetto con criteri di stabilità di Lyapounov
- 👉 Reti Neurali (*Controllo Neuro-Fuzzy*)
- 👉 Algoritmi Genetici



Controllore fuzzy a regole

Un regolatore fuzzy è organizzato come una serie di implicazioni logiche dalle quali si ricava in modo deduttivo l'azione di controllo

IF {Condizioni sull' errore} THEN {Controllo}

Utilizzando la logica fuzzy ciò equivale a:

IF (e is A₁) AND (è is A₂) THEN (u is B)

L'affermazione fuzzy *e is A* è da intendersi come il **grado di appartenenza** di *e* al qualificatore fuzzy *A₁*.

Uguualmente per il conseguente.

Più deduzioni fuzzy, si collegano usando il connettivo **ELSE**

*R₁ : IF (e is A_{1,1}) AND (è is A_{1,2}) THEN (u is B₁)
ELSE
R₂ : IF (e is A_{2,1}) AND (è is A_{2,2}) THEN (u is B₂)
ELSE
.....
R_m : IF (e is A_{m,1}) AND (è is A_{m,2}) THEN (u is B_m)*

Inferenza fuzzy applicata al controllo

R_1 : IF (e is $A_{1,1}$) AND (\dot{e} is $A_{1,2}$) THEN (u is B_1)
ELSE

R_2 : IF (e is $A_{2,1}$) AND (\dot{e} is $A_{2,2}$) THEN (u is B_2)

e is $A_{1,1} \rightarrow \mu_1(e)$ \dot{e} is $A_{1,2} \rightarrow \mu_2(\dot{e})$

e is $A_{2,1} \rightarrow \mu_3(e)$ \dot{e} is $A_{2,2} \rightarrow \mu_4(\dot{e})$

u is $B_1 \rightarrow \mu_{b_1}(u)$ u is $B_2 \rightarrow \mu_{b_2}(u)$

Questo blocco di implicazioni viene risolto utilizzando gli operatori che si ritengono più opportuni. Ad esempio:

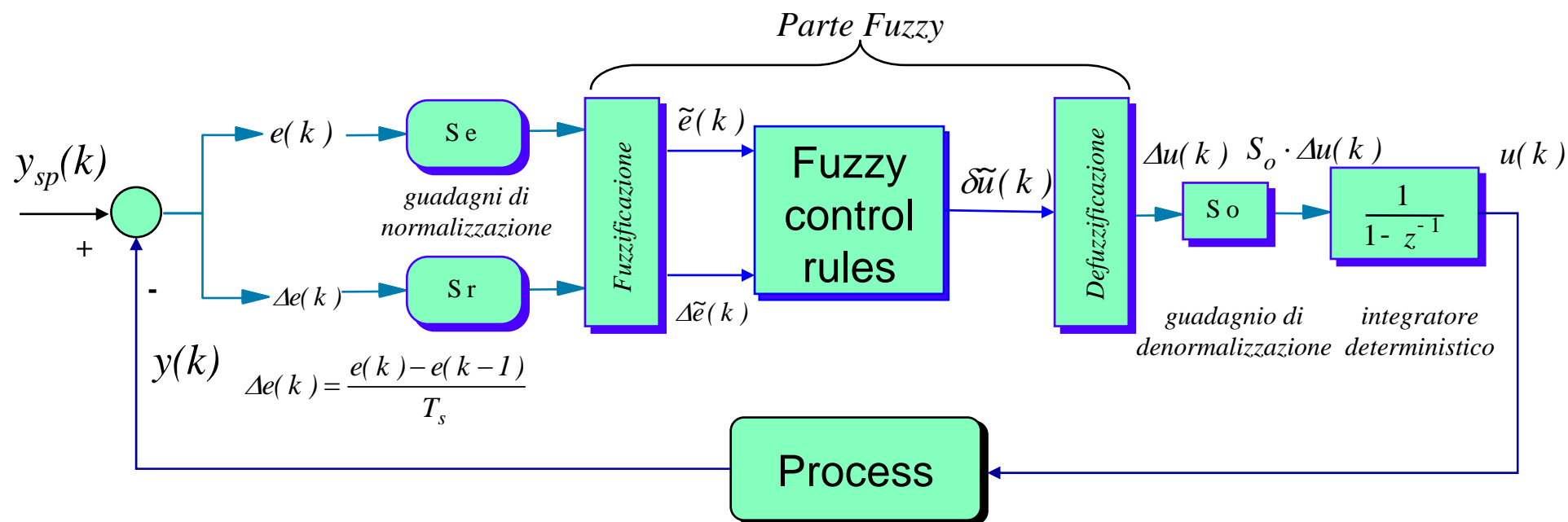
$AND = \min$ $THEN = \min$ $ELSE = \max$

$$\mu(u|e^*, \dot{e}^*) = \max \left\{ \begin{array}{l} \left[\min \left(\min \left(\mu_1(e^*), \mu_2(\dot{e}^*) \right), \mu_{b_1}(u) \right) \right] \\ \left[\min \left(\min \left(\mu_3(e^*), \mu_4(\dot{e}^*) \right), \mu_{b_2}(u) \right) \right] \end{array} \right\}$$

$AND = prod$ $THEN = prod$ $ELSE = \max$

$$\mu(u|e^*, \dot{e}^*) = \max \left\{ \begin{array}{l} \left[\mu_1(e^*) \times \mu_2(\dot{e}^*) \times \mu_{b_1}(u) \right] \\ \left[\mu_3(e^*) \times \mu_4(\dot{e}^*) \times \mu_{b_2}(u) \right] \end{array} \right\}$$

Struttura di un Regolatore Fuzzy



La regolazione è basata sull'errore $e(t)$ e sulla sua derivata $\Delta e(t)$.
 Generalmente si inserisce un'azione integrale (deterministica) all'uscita del regolatore fuzzy, perché questo non dà garanzie di inseguimento

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u(t)$$

Le regole di controllo vengono specificate in modo euristico

Generazione delle Regole di Controllo

Originariamente le regole venivano specificate su base euristica, spesso facendo riferimento ad esperienze di operatori umani. In questo modo si possono introdurre caratteristiche non descrivibili in termini numerici precisi.

Si possono definire delle *meta-regole* generali, del tipo

MR1 Se l'errore $e(t)$ ed il suo incremento $\Delta e(t)$ sono circa zero, mantieni il controllo attuale

MR2 Se l'errore $e(t)$ tende a zero con un rateo soddisfacente, mantieni il controllo attuale

MR3 Se l'errore $e(t)$ non è auto-correttivo, allora l'azione di controllo $\Delta u(t)$ dipende dal segno e grandezza di $e(t)$ ed $\Delta e(t)$

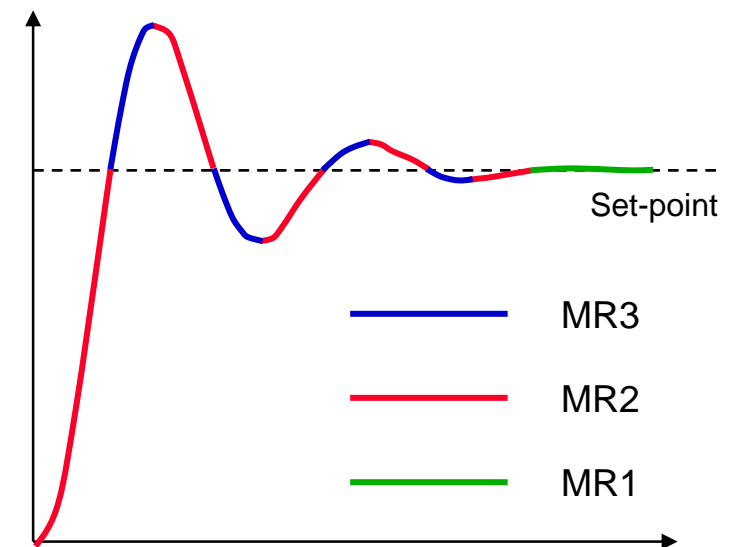


Tabella delle Regole di Controllo

- Se si usano come antecedenti l'errore $e(t)$ e la sua variazione $\Delta e(t)$ l'implicazione fuzzy fra queste ed il segnale di controllo si può rappresentare sotto forma di tabella
- L'incrocio di ogni valore di $e(t)$ e di $\Delta e(t)$ dà la regola da attivare.
- Il grado di attivazione della regola di controllo dipende dal grado di verità complessivo degli antecedenti nella regola corrispondente.

		e				
		PB	PS	ZZ	NS	NB
Δe	PB	PB	PB	PS	PS	ZZ
	PS	PB	PS	PS	ZZ	NS
	ZZ	PS	PS	ZZ	NS	NS
	NS	PS	ZZ	NS	NS	NB
	NB	ZZ	NS	NS	NB	NB

Etichette "linguistiche" delle regole

PB = Positive Big

PS = Positive Small

ZZ = Zero

NS = Negative Small

NB = Negative Big

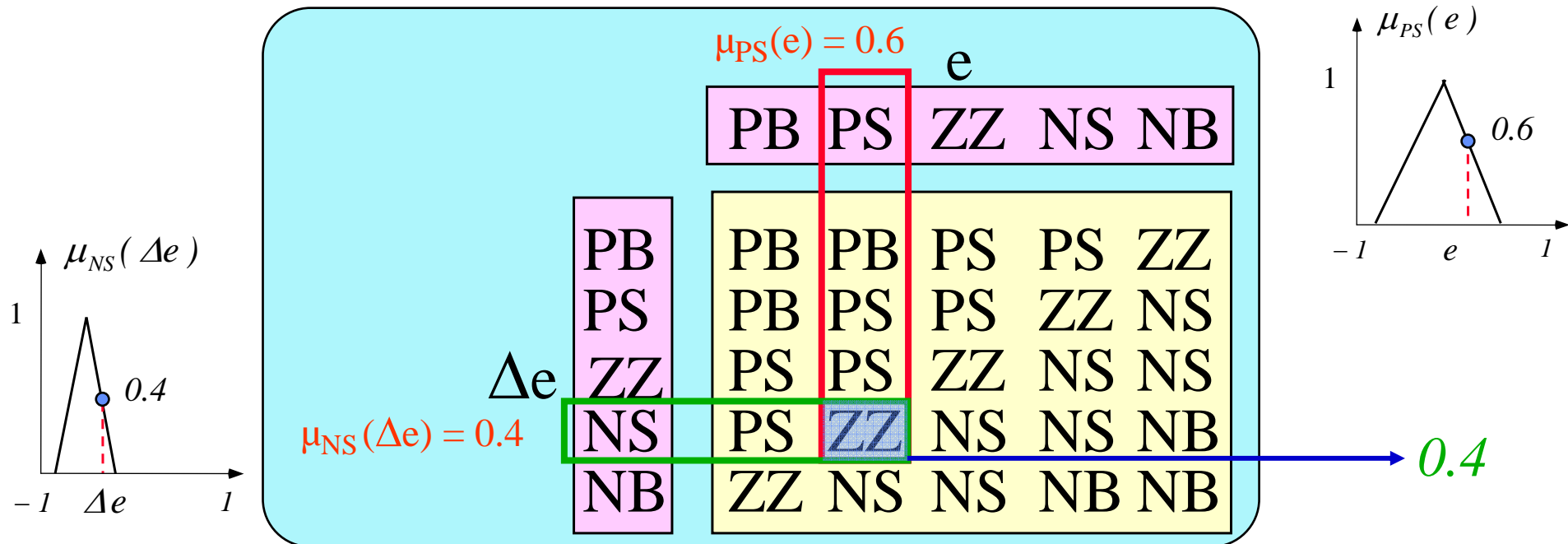
Tabella delle Regole di Controllo

👉 *Esempio:* se il grado di appartenenza di $e(t)$ al rappresentatore PS è 0.6: $\mu_{PS}(e) = 0.6$ e il grado di appartenenza di Δe al rappresentatore NS è 0.4: $\mu_{NS}(\Delta e) = 0.4$, il grado di attivazione della corrispondente regola ZZ è **0.4** nel caso che si sia usato l'operatore MIN

IF (e is PS) *AND* (Δe is NS) *THEN* (u is ZZ)

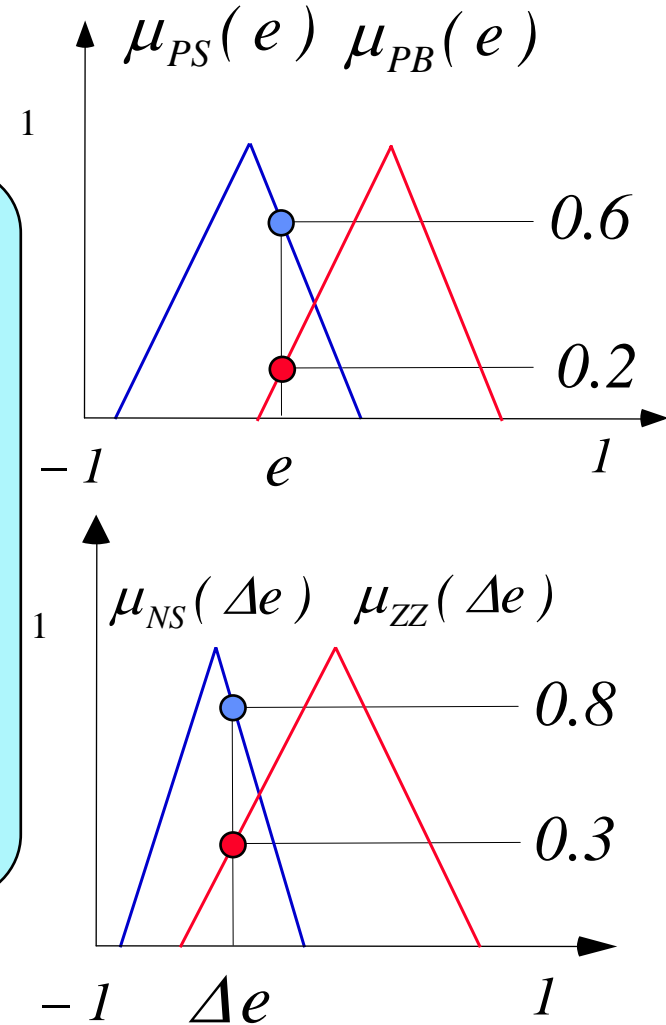
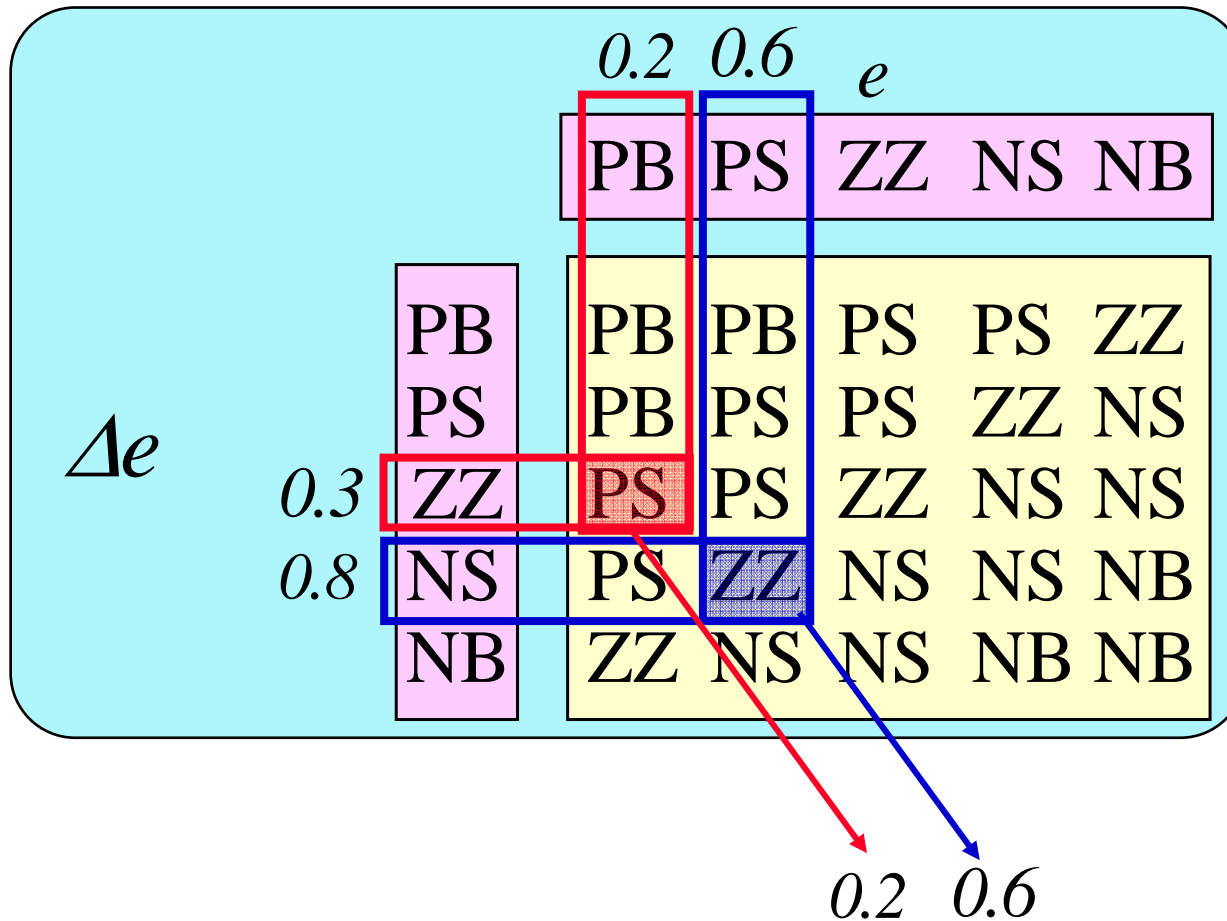
$$\mu_{PS}(e) \wedge \mu_{NS}(\Delta e) \wedge \mu_{ZZ}(\Delta u)$$

$$\mu_{ZZ}(u) = \min(\mu_{PS}(e), \mu_{NS}(\Delta e)) = \min(0.6, 0.4) = 0.4$$



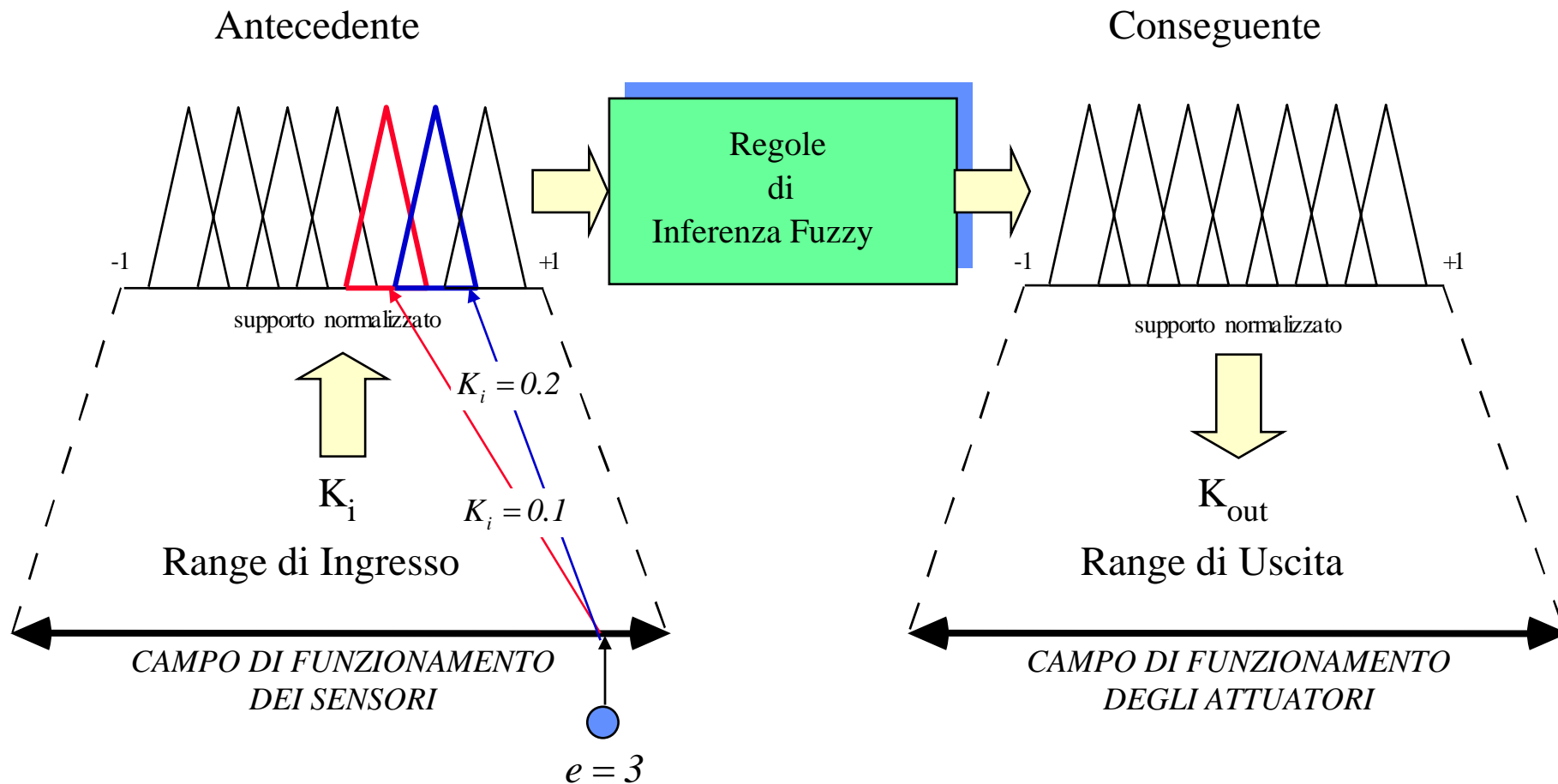
Attivazione di più regole

In generale ogni coppia $(e, \Delta e)$ attiverà più di un rappresentatore, perciò verranno contemporaneamente attivate più regole



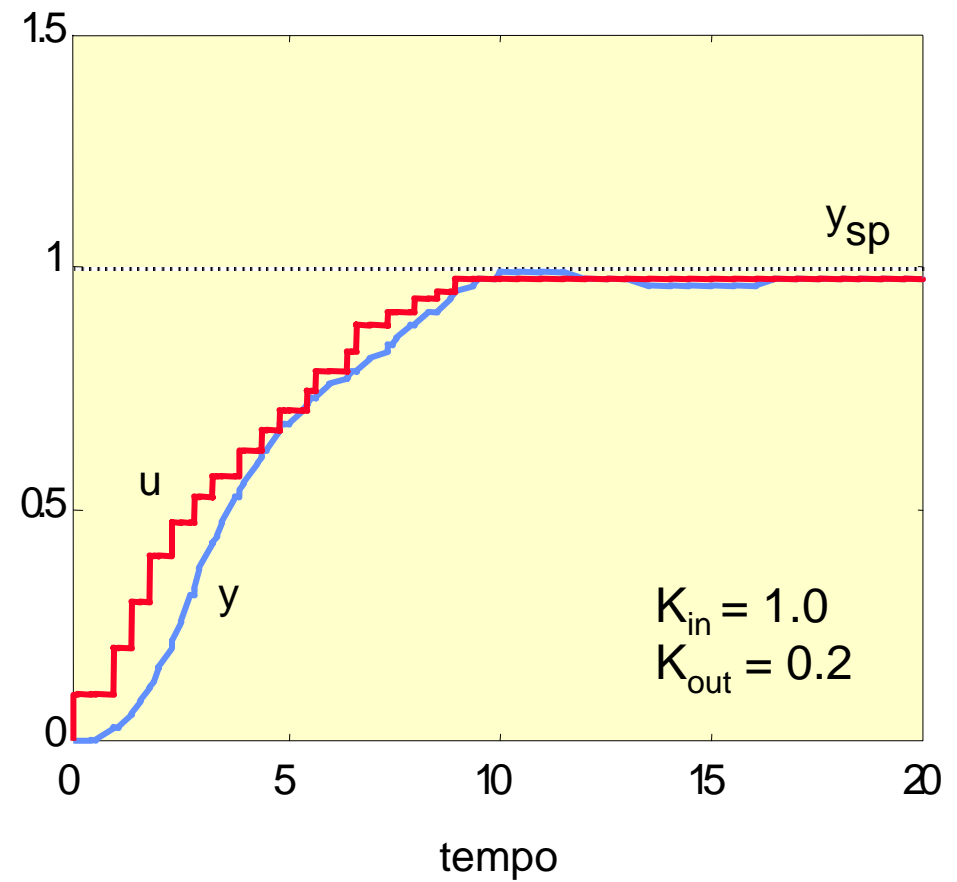
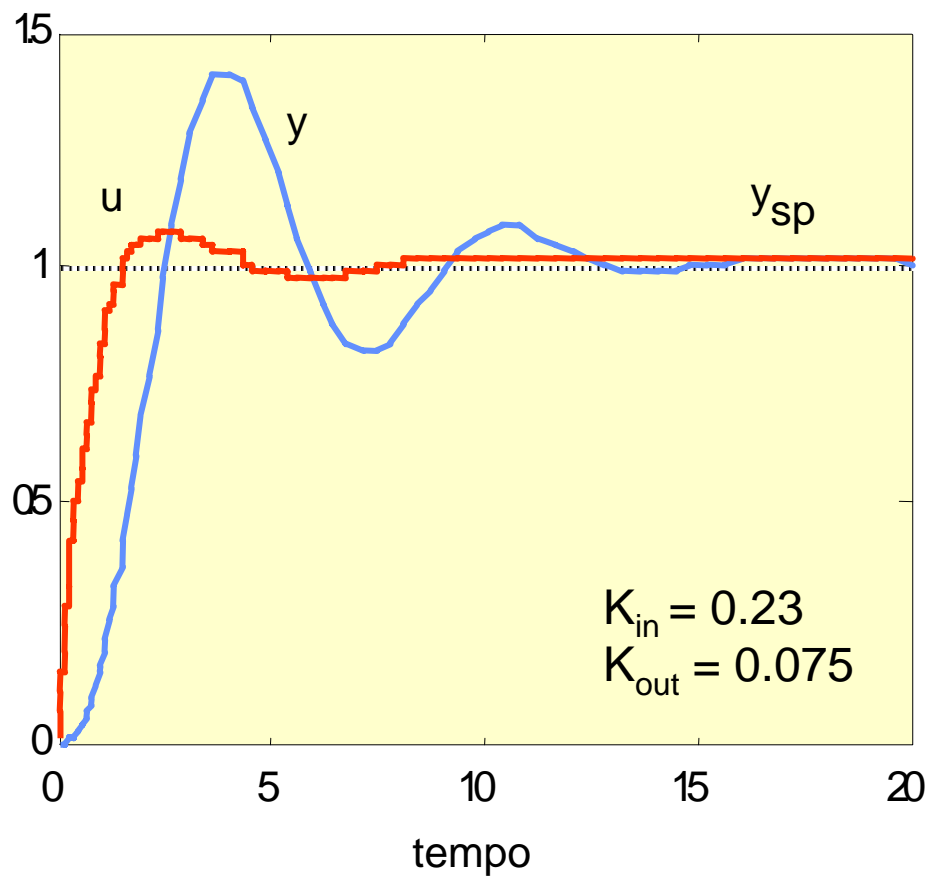
Normalizzazione/Denormalizzazione

I guadagni di Normalizzazione/Denormalizzazione sono necessari per riportare i range delle variabili entro i limiti normalizzati



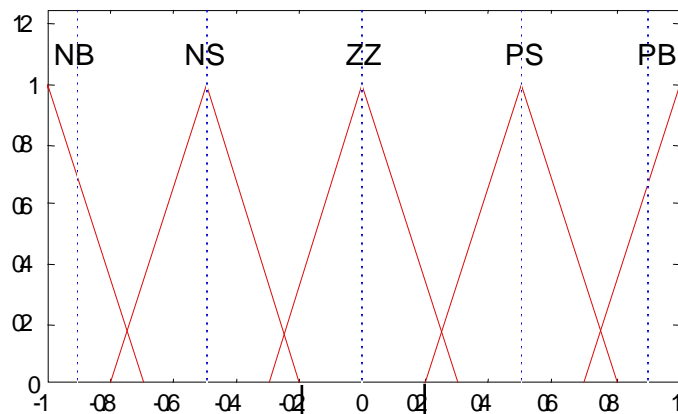
Normalizzazione/Denormalizzazione

- ☞ La scelta dei coefficienti di Normalizzazione/Denormalizzazione può avere effetti drammatici sulla risposta del regolatore fuzzy

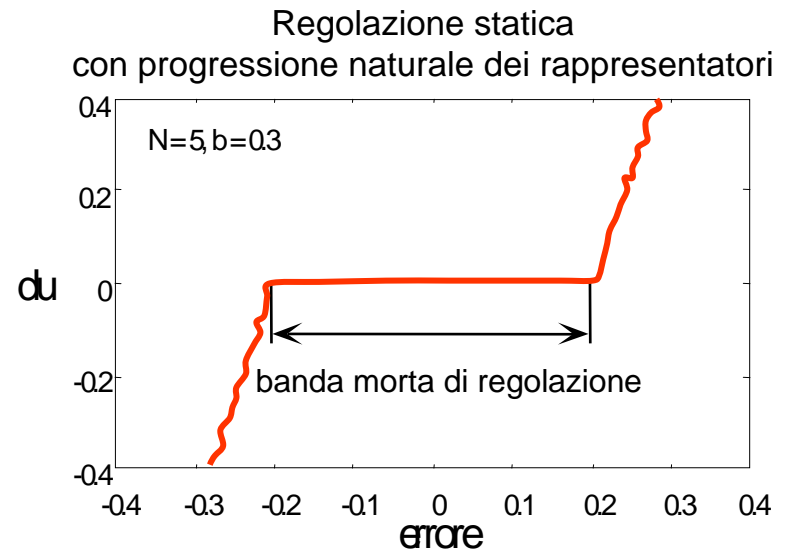


Azione Integrale nel Regolatore Fuzzy

Diversamente dai regolatori deterministici,
l'azione integrale può non garantire l'inseguimento del set-point.
Ciò a causa della "granularità" degli incrementi introdotta dalla fuzzificazione



In questa zona l'unico contributo è dato dal qualificatore ZZ



Se l'errore cade nella banda morta centrale, che attiva 0 in uscita, non si produce alcun incremento per l'azione integrale in uscita


Rimedio: diminuire la banda morta aumentando la sovrapposizione dei rappresentatori

Controllo Fuzzy alla Sugeno

- Usa il medesimo metodo di inferenza in cui però il conseguente è un singolo valore deterministico (*singleton*)

$$R_i : IF e_t \text{ is } A_j \text{ AND } \Delta e_t \text{ is } A_k \text{ THEN } u_i = k_i$$

*Valore assunto dall'uscita in funzione
del grado di verità dell'antecedente*



- Viene eliminato il problema della defuzzificazione: basterà effettuare la media dei vari singleton pesata con i gradi di verità degli antecedenti;
- Si può facilmente estendere l'espressione del controllo da valori costanti ($u = k$) ad una combinazione lineare di errore e sua derivata.

$$R_i : IF e_t \text{ is } A_j \text{ AND } \Delta e_t \text{ is } A_k \text{ THEN}$$

$$u_t^i = a_1^i e_t + a_2^i \Delta e_t + b_i$$

Corrispondenza fra regolatori fuzzy e strutture PID

a) *Proporzionale-Integrale (PI)*

$$PI_{fuzzy} : \Delta u_{fuzzy} = f(e, \Delta e) = f(e(t), e(t-1))$$

$$PI_{det\ erm.} : \Delta u_{PI} = K_p \cdot \Delta e(t) + K_I \cdot e(t)$$

b) *Proporzionale-Derivativo (PD)*

$$PD_{fuzzy} : u_{fuzzy} = f(e, \Delta e) = f(e(t), e(t-1))$$

$$PD_{det\ erm.} : u_{PD} = K_p \cdot e(t) + K_d \cdot \Delta e(t)$$

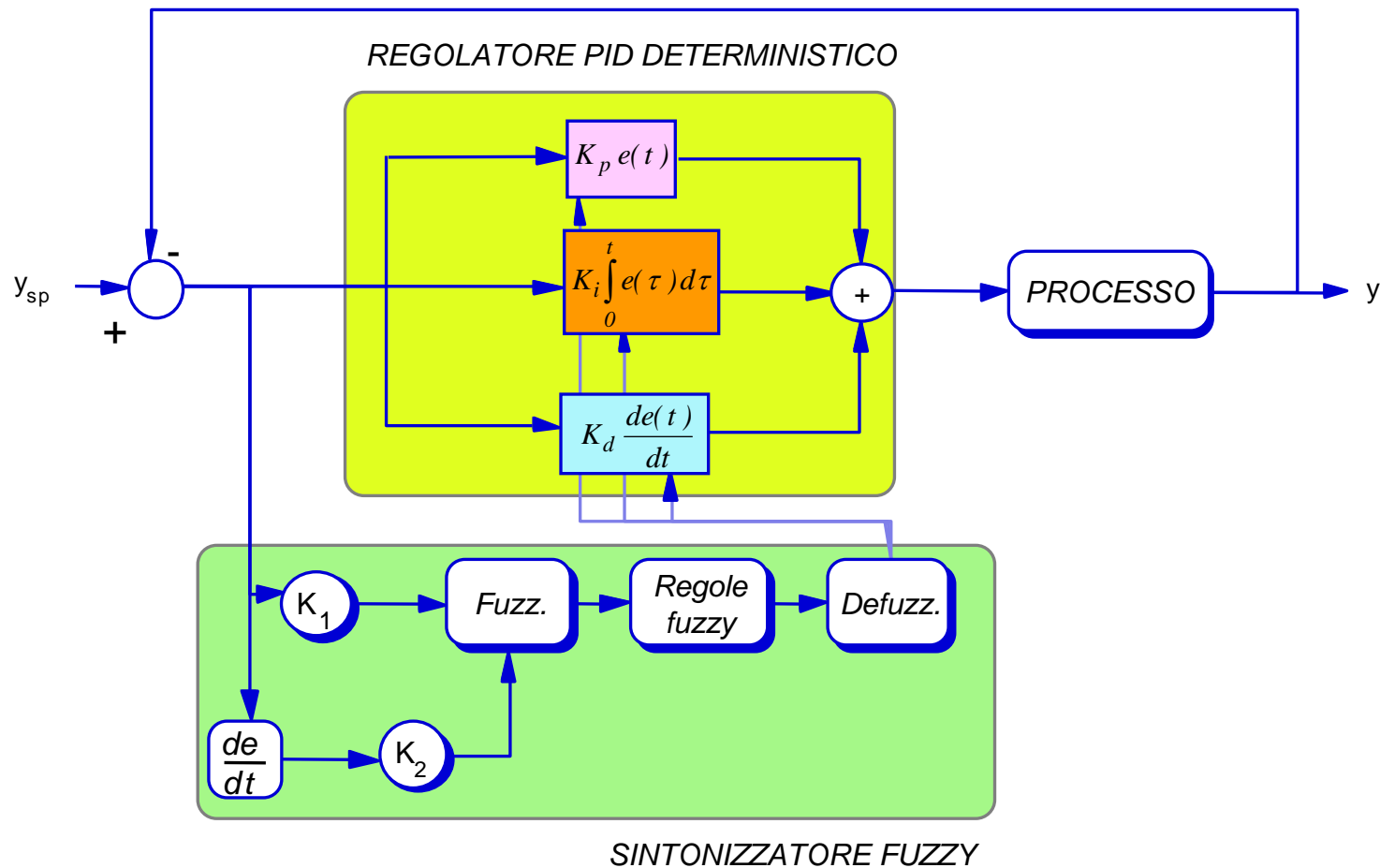
c) *PID completo*

$$PID_{fuzzy} : \Delta u_{fuzzy} = f(e(t), e(t-1), e(t-2))$$

$$PID_{det\ erm.} : \Delta u_{PID} = K_1 \cdot e(t) + K_2 \cdot e(t-1) + K_3 \cdot e(t-2)$$

Sintonizzazione fuzzy di un PID

Una serie di regole fuzzy può essere usata per sintonizzare i parametri di un PID deterministico



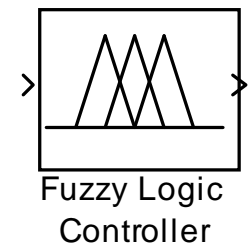
Progetto di un regolatore con la Matlab Fuzzy Toolbox

👉 Nella Fuzzy Toolbox (Matlab)

- ⇒ Definire il tipo di inferenza (Mamdani o Sugeno)
- ⇒ Definire li operatori per i connettivi delle implicazioni (AND, THEN, ELSE)
- ⇒ Definire le membership di ingressi e uscita
- ⇒ Definire le regole
- ⇒ verificare l'attivazione delle regole (rule viewer)
- ⇒ Salvare la FIS su disco con nome (es. **Ciccio.fis**)

👉 In Simulink

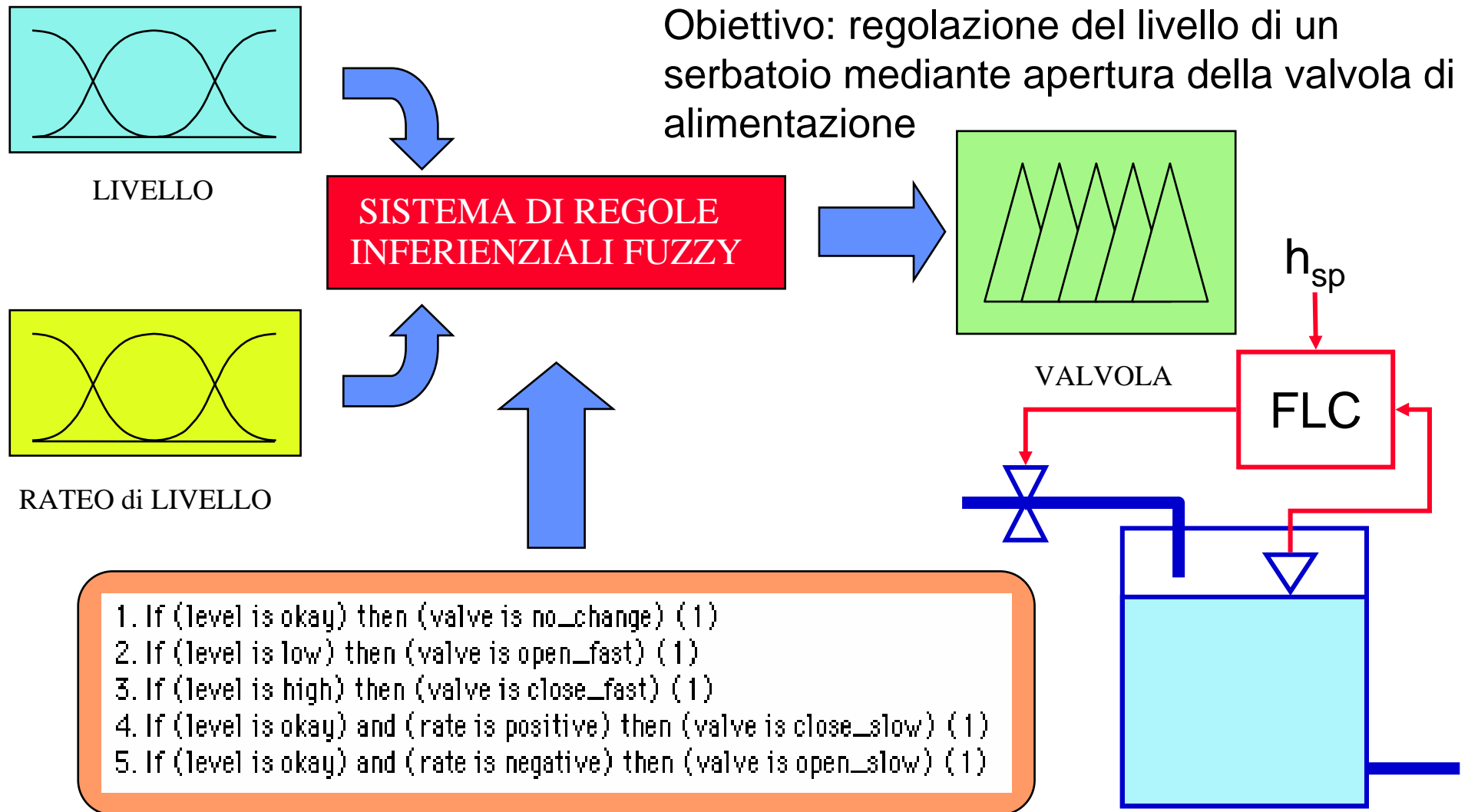
- ⇒ Definire il modello del processo
- ⇒ costruire l'errore di regolazione (e) e il suo incremento (Δe)
- ⇒ Inserire il blocco **Fuzzy Logic Controller** (dalla palette Fuzzy Logic Toolbox)
- ⇒ Inserire il nome della FIS (es. Ciccio) nella maschera dei parametri di questo blocco



👉 Nel programma di lancio

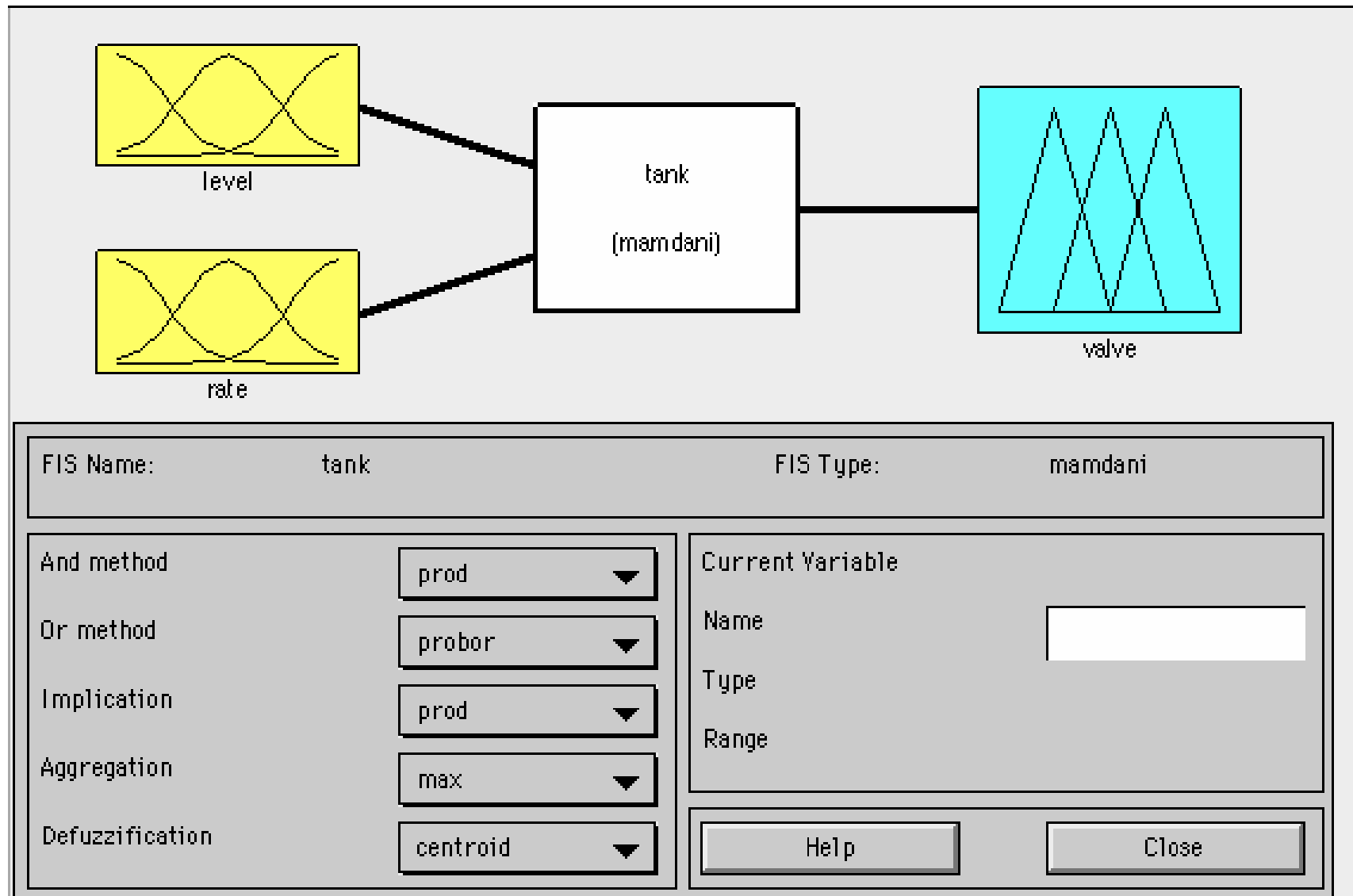
- ⇒ caricare la FIS (**Ciccio=readfis('Ciccio.fis')**)
Nota il nome nei parametri Simulink deve essere uguale al nome assegnato con readfis
- ⇒ effettuare la chiamata al Simulink (**[t,x,y]=sim('Nome Simulink file',tfin)**)

Progetto di Regolatori Fuzzy in Matlab/Simulink

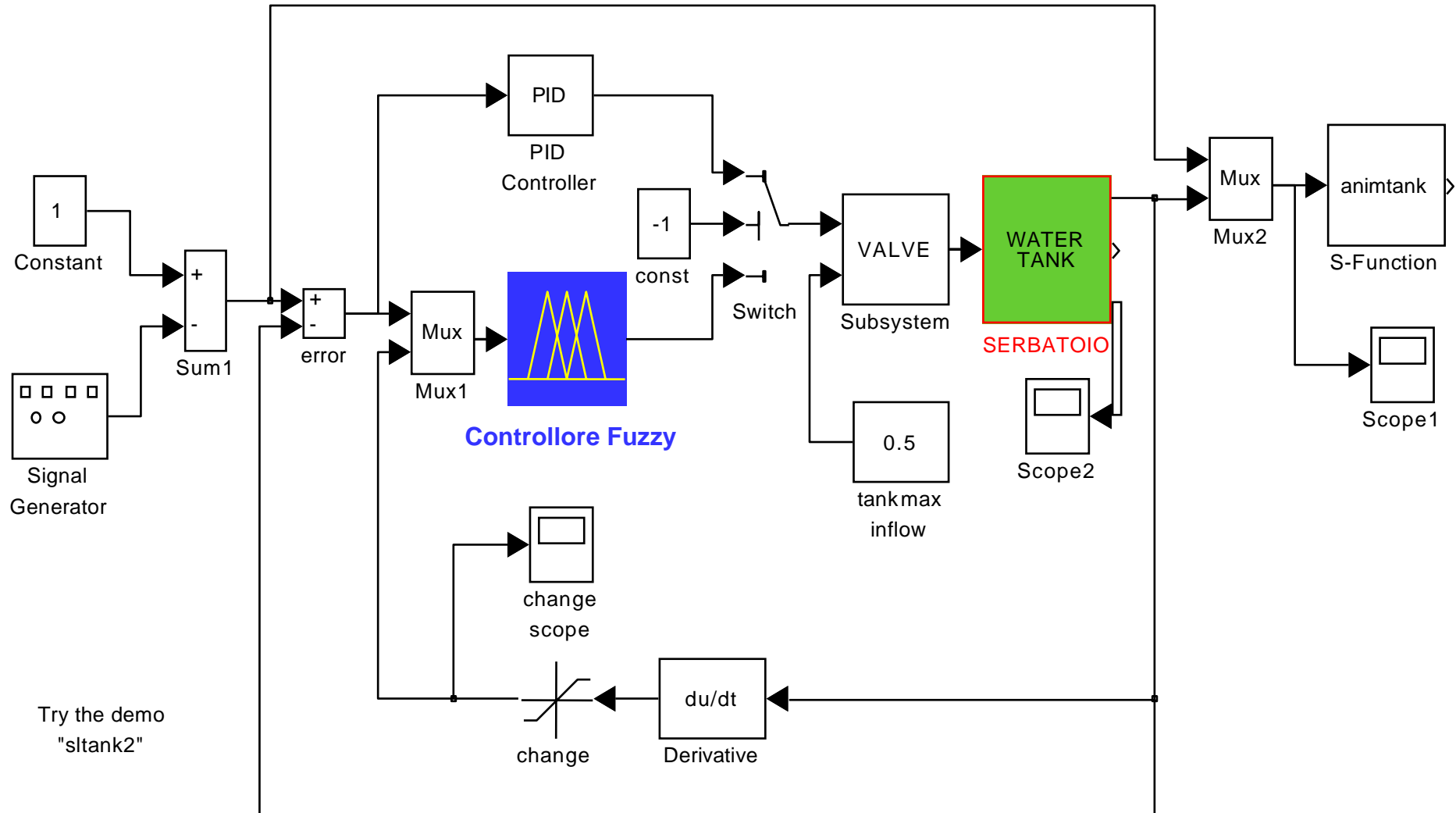


Insieme di regole fuzzy = regolatore

L'ambiente Fuzzy Toolbox di MATLAB

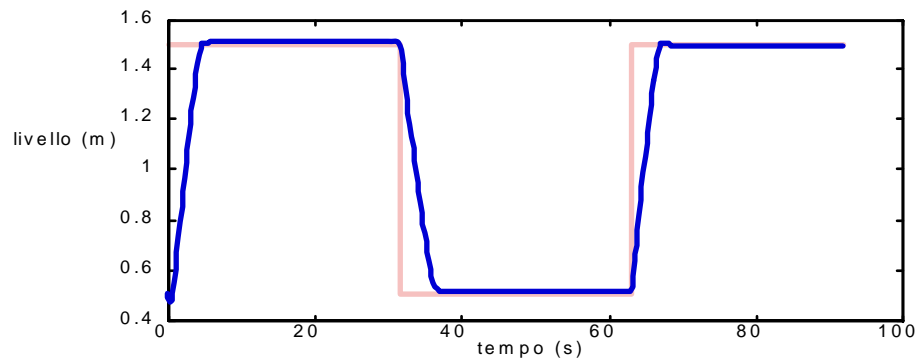
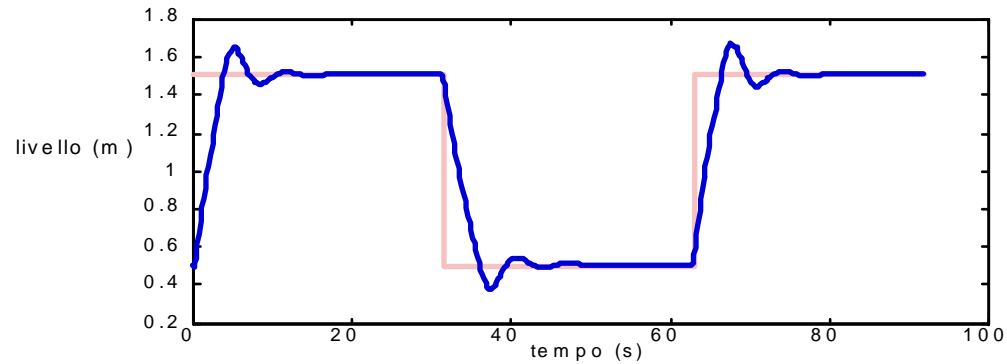


Lo schema Simulink per il problema del serbatoio

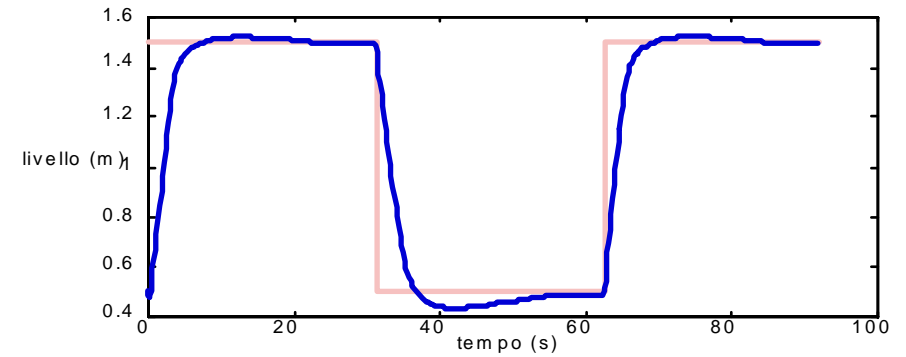


Paragone fra le prestazioni di regolatori fuzzy

Regolatore PID

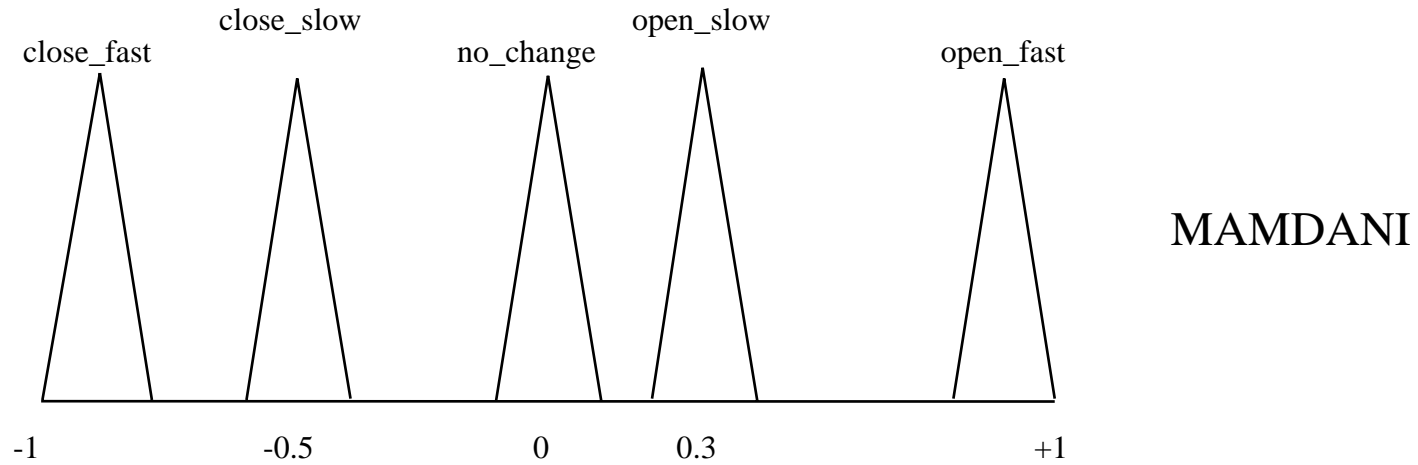


MAMDANI

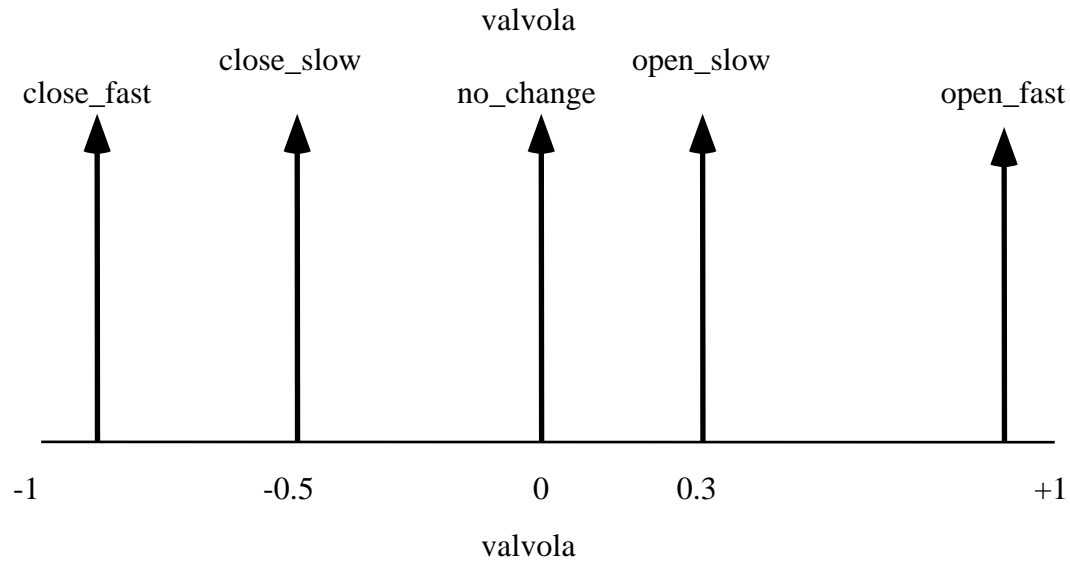


SUGENO

Differenze nei conseguenti



MAMDANI



SUGENO

Controllo fuzzy del DO

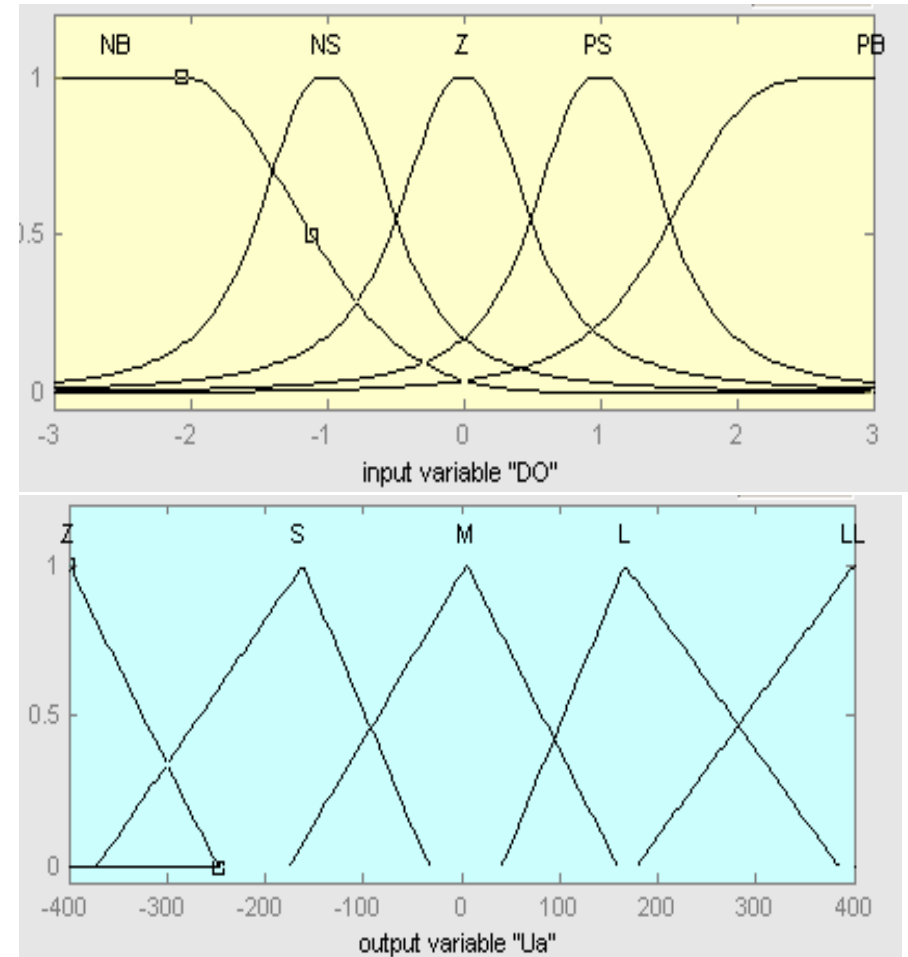
☞ Si vuole mantenere costante la concentrazione di ossigeno disciolto basandosi sull'errore ($DO_{sp} - DO$) ed agendo sul sistema di aerazione

☞ Si definiscono i seguenti qualificatori

- ⇒ **Errore DO:** Negative Big (NB); Negative Small (NS), Zero (Z), Positive Small (PS), Positive Big (PB)
- ⇒ **Portata d'aria:** Zero (Z), Small (S), Medium (M), Large (L), Very Large (LL)
- ⇒ Nota: la portata d'aria è da intendersi come **incremento** e non valore assoluto

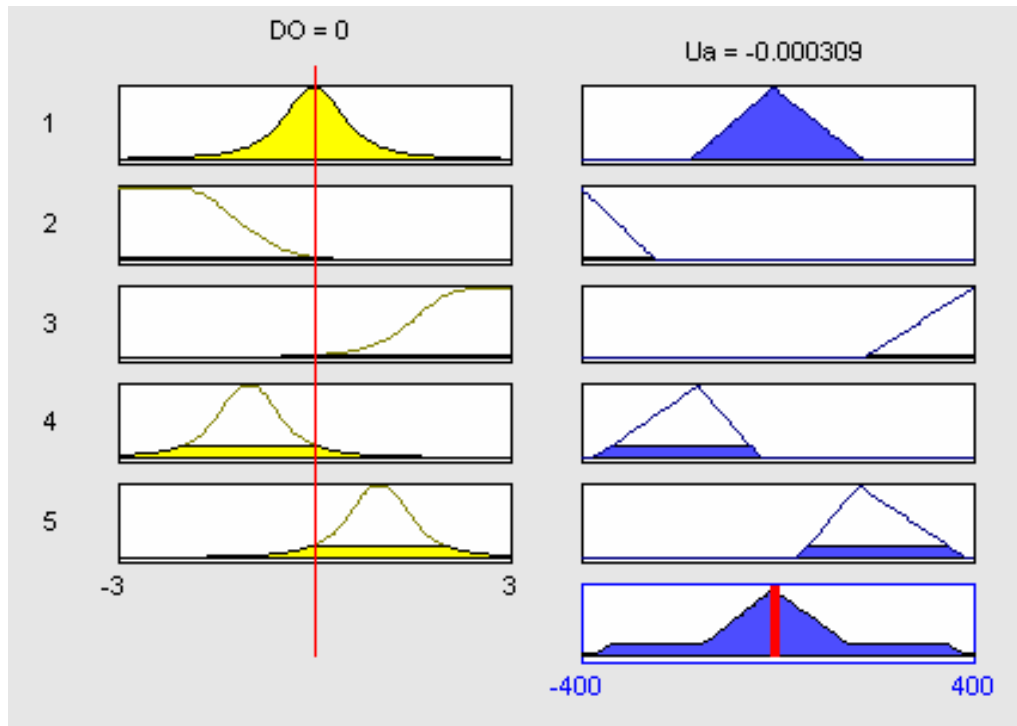
☞ Il regolatore fuzzy comprenderà le seguenti semplici regole:

1. If (DO is Z) then (Ua is M) (1)
2. If (DO is NB) then (Ua is Z) (1)
3. If (DO is PB) then (Ua is LL) (1)
4. If (DO is NS) then (Ua is S) (1)
5. If (DO is PS) then (Ua is L) (1)



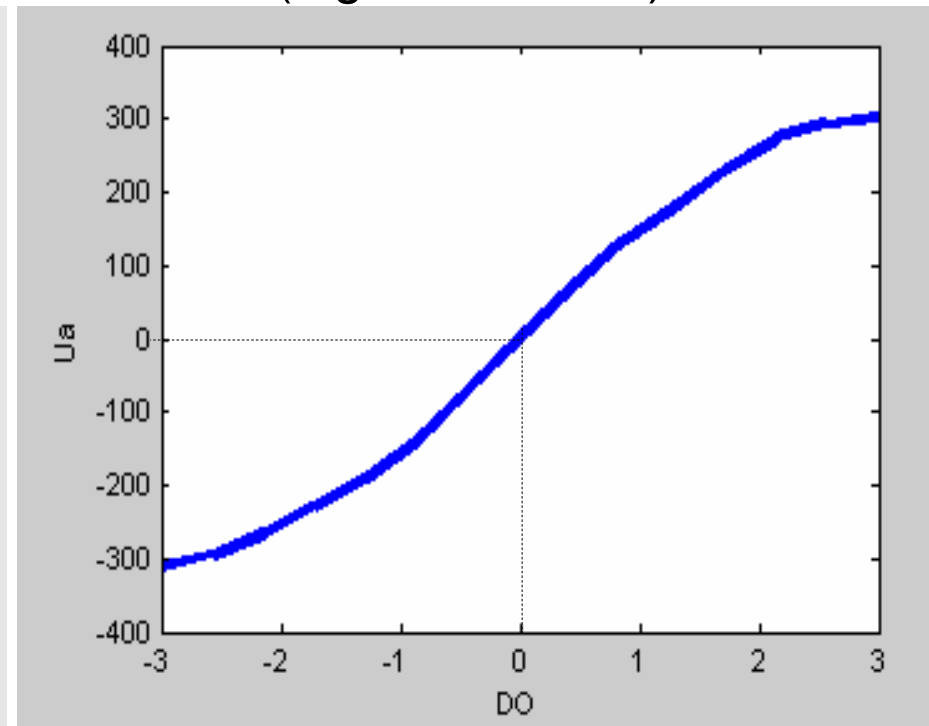
Attivazione delle regole

Vista dell'attivazione delle regole



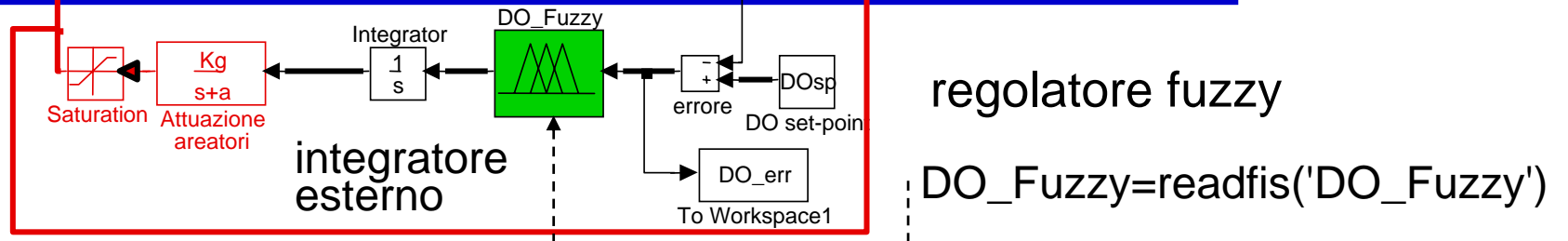
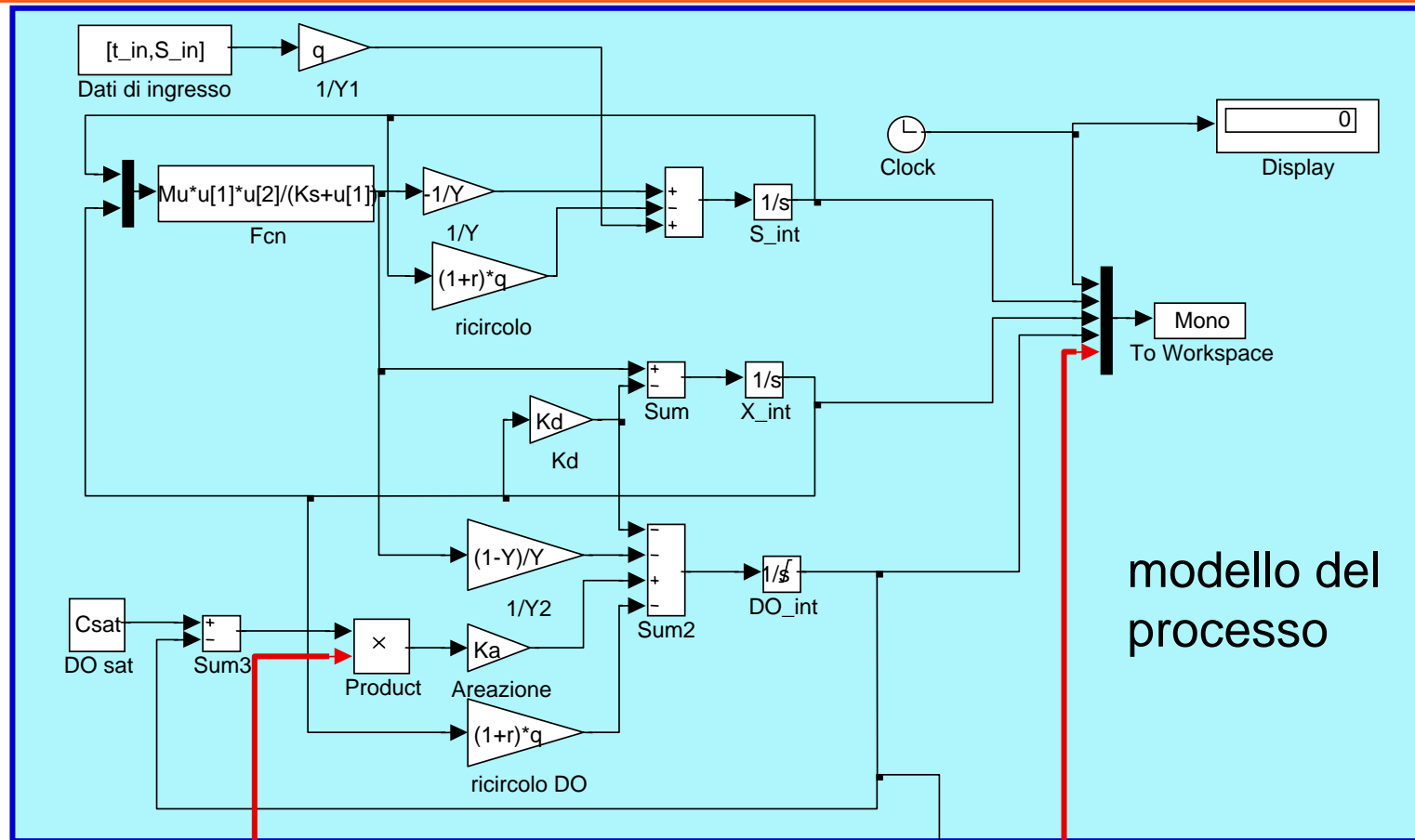
quando l'errore è zero, l'incremento di uscita è anch'esso zero

Vista della funzione di controllo (ingresso/uscita)

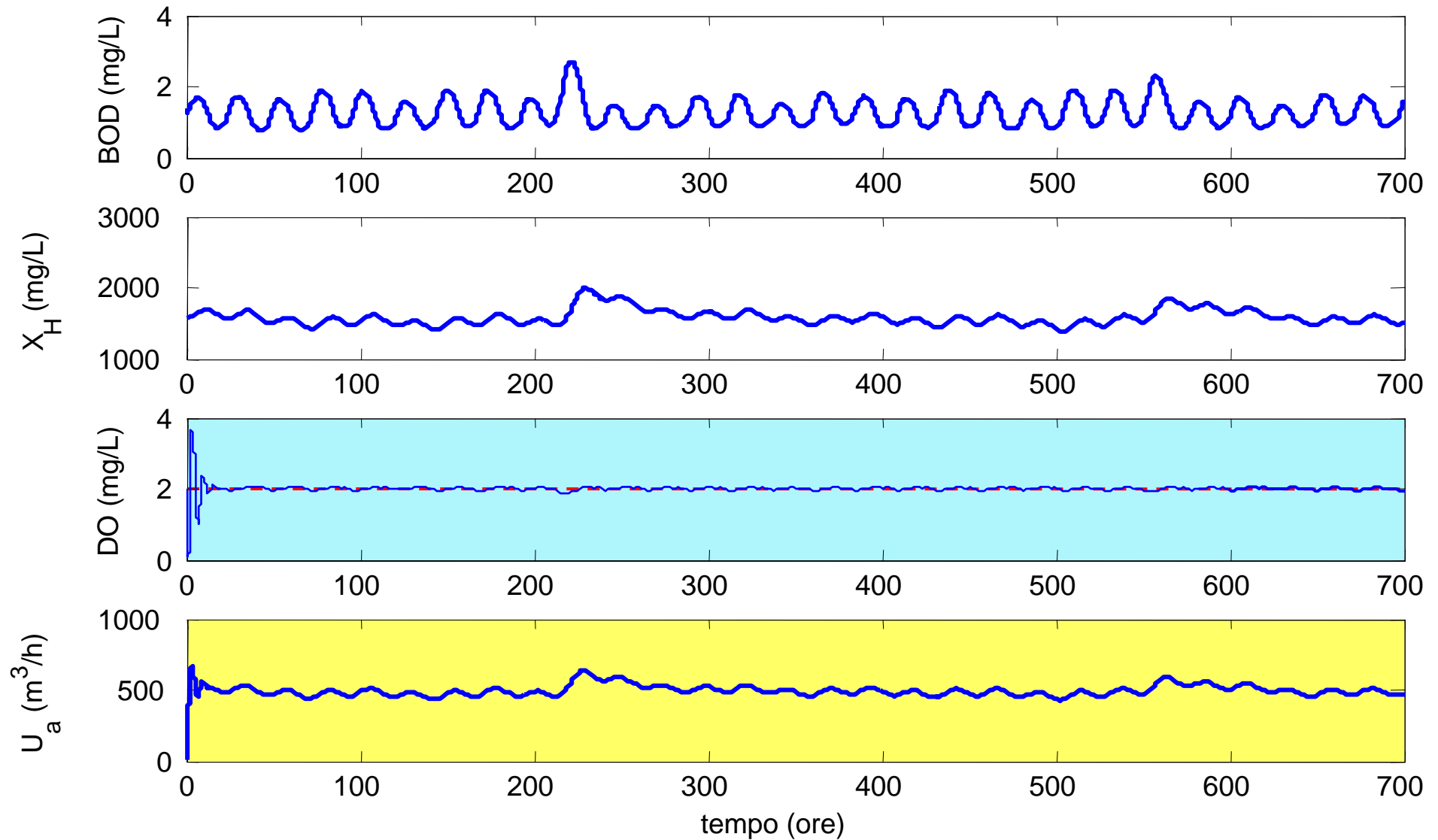


questa curva rappresenta l'uscita (U_a) calcolata dal regolatore fuzzy in funzione dell'errore di DO.

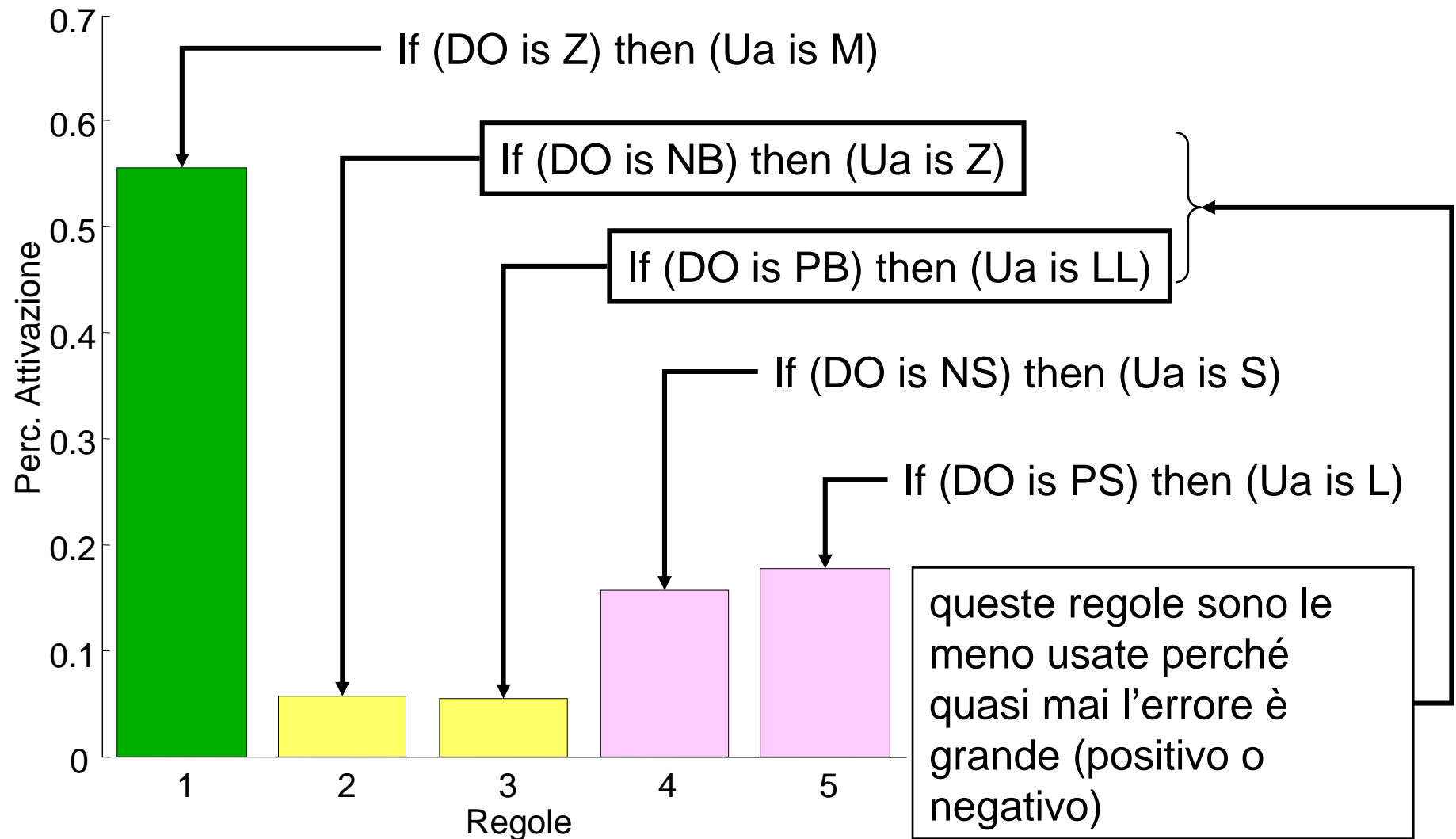
Schema Simulink con controllo DO fuzzy



Prestazione del regolatore fuzzy



Attivazione delle regole durante la regolazione



Bibliografia

- 👉 Yager R.R. e Filev D.P. (1994) *Essentials of Fuzzy Modelling and Control*, Wiley.
- 👉 Klir. G.J. e T.A. Folger (1988) *Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information*, Prentice-Hall.
- 👉 Ross T.J. (1995) *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, McGraw-Hill.
- 👉 Driankov D, Hellendoorn H., Reinfrank M. (1993) *An introduction to Fuzzy Control*, Springer-Verlag.
- 👉 Patyra M.J. e Mlynek D.M. (editors) (1996) *Fuzzy Logic, Implementation and Applications*, Wiley Teubner.
- 👉 Nguyen H.T., Sugeno M., Tong R. Yager R.R. (editors) (1995) *Theoretical Aspects of Fuzzy Control*, Wiley.
- 👉 Yager R.R. e Zadeh L.A. (editors) (1994) *Fuzzy Sets, Neural Networks, and Soft Computing*, Van Nostrand Reinhold.
- 👉 Wang, L. X. (1994) *Adaptive Fuzzy Systems and Control*. PTR Prentice Hall.