

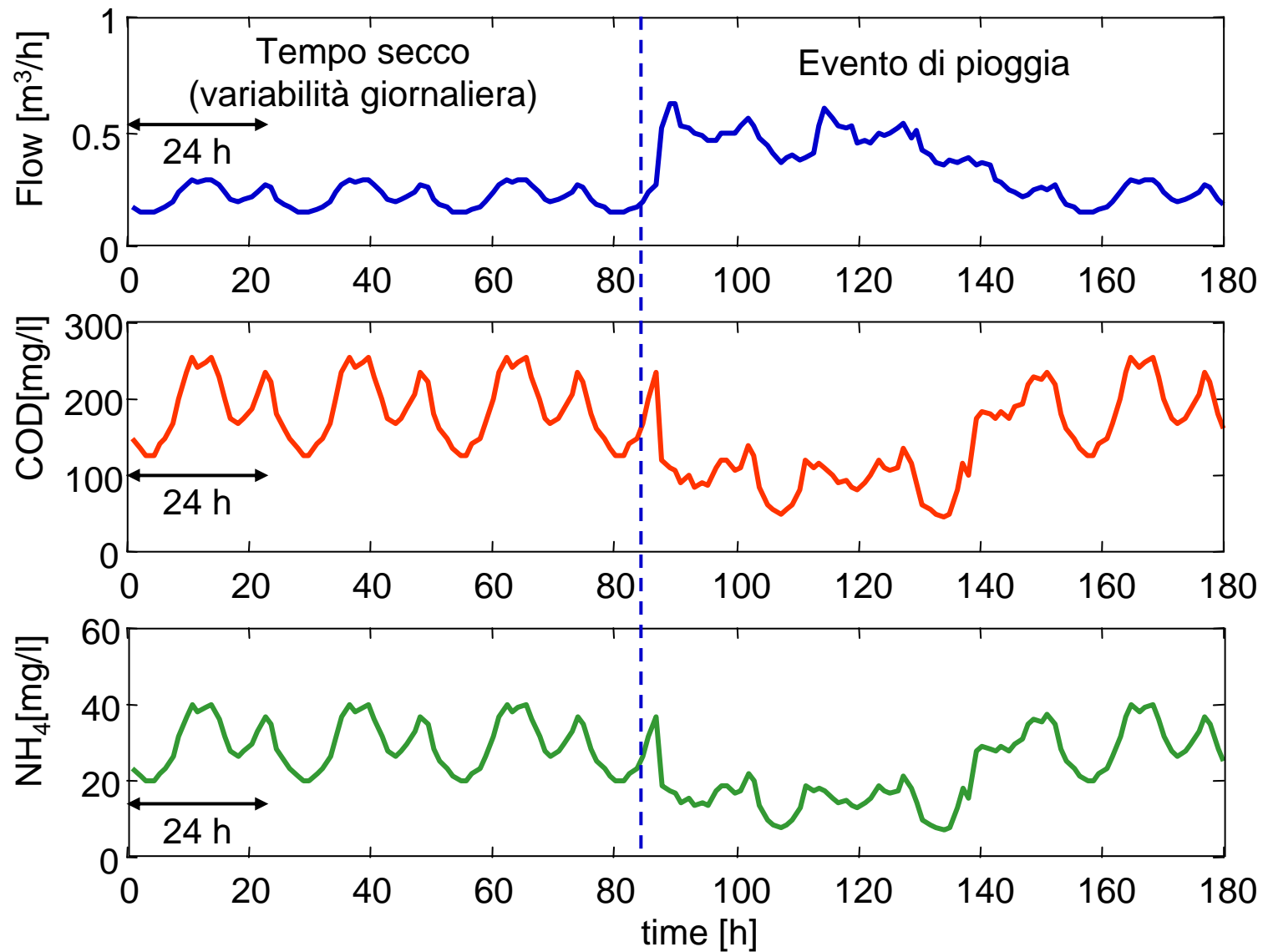


***Controllo dei Processi
di Depurazione Biologica***

Perché controllare?

- 👉 Il processo non opera *mai* in stato stazionario perché:
 - ⇒ L'influenza cambia continuamente, sia in portata che in composizione
 - ⇒ Le condizioni ambientali cambiano con ritmo giornaliero e stagionale
 - ⇒ Le prestazioni richieste cambiano con la situazione ambientale e del corpo idrico recettore
- 👉 In condizioni tempo varianti è necessario un controllo in tempo reale per garantire:
 - ⇒ Che l'effluente sia entro i limiti di legge
 - ⇒ La salvaguardia dell'impianto
 - ⇒ L'economicità della gestione
- 👉 Difficoltà del controllo:
 - ⇒ Spesso si devono armonizzare obiettivi contrastanti
 - ⇒ Le dinamiche di processo sono nonlineari e tempo-varianti

Tipica serie storica di processo



Obiettivi del controllo

Controllo idraulico

- ⇒ Garantire il ricambio idrico
- ⇒ Evitare sovraccarichi, specialmente sul sedimentatore secondario

Controllo della biomassa (Posizionamento)

- ⇒ Assicurare una efficace ripartizione della biomassa fra sedimentazione (accumulo) e vasche di reazione (attività)

Controllo della rimozione dei nutrienti e dei costi operativi

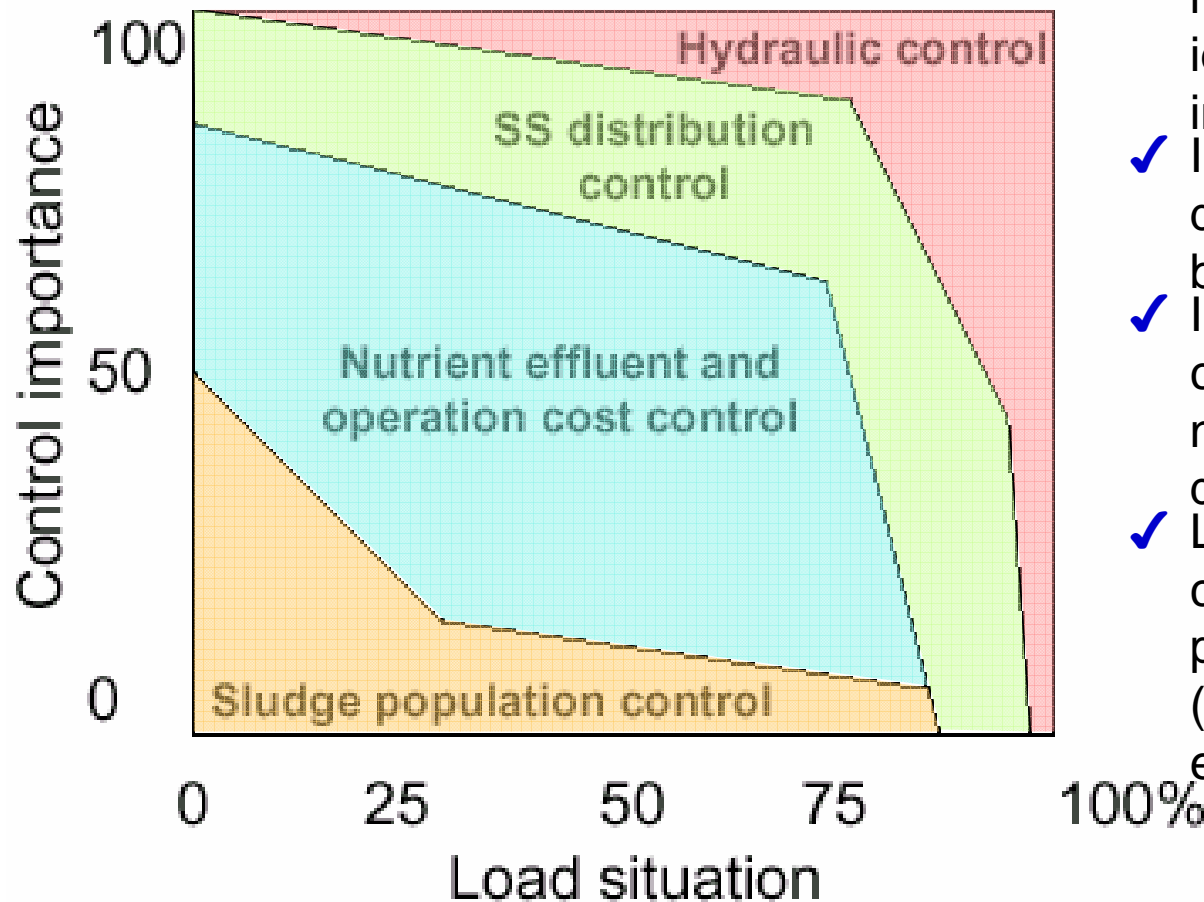
- ⇒ Assicurare le condizioni che producono la migliore qualità dell'effluente in termini di
 - ⇒ rimozione dei nutrienti
 - ⇒ economicità di gestione

Controllo della biomassa (Composizione)

- ⇒ Evitare lo sviluppo di microorganismi dannosi (filamentosi)
- ⇒ Evitare tempi di ritenzione dei solidi (SRT) eccessivi

Importanza relativa degli obiettivi di controllo

Nelle diverse situazioni di carico l'importanza dei vari obiettivi di controllo può essere diversa ✓



- ✓ Quando il carico è massimo il controllo idraulico è il più importante
- ✓ Il secondo obiettivo è la distribuzione della biomassa
- ✓ Il terzo obiettivo è il controllo dei nutrienti nell'effluente e il controllo dei costi operativi
- ✓ L'ultimo obiettivo è il controllo della popolazione dei fanghi (filamentosi, protozoi, etc.)

Relazioni causa-effetto del controllo

Manipulated Variable "Control handle"	Main Influence	Goal-Constraints	Measurements Estimates	Time Scale
Air flow rate	DO (locally, globally); Respiration rates; Filament formation Energy saving	Keep DO profile; Intermitting DO; Influent on DN rate in recycle Increase bio-P removal	DO conc.; NH ₃ OUR; Oxygen transfer rate; CO ₂ production; Nitrification rate	min
Carbon addition	DN rate; P release	Dosage for DN; Dosage for bio-P removal	NO ₃ ; rate of PO ₄ release, flow, OUR	hrs
Nitrate recycle	Denitrification rate; Oxygen carried over to DN	Carry adequate nitrate for DN; Nitrate reduction of the Bio-P processes	Nitrate; DN rate; redox; OUR	hours
Influent flow rate	Dilution; Clarifier load	Dampen hydraulic disturbances Use hydraulic capacity	Flow rate; Hydraulic retention time, MLSS Effluent susp. solids	min-hrs
Return sludge flow rate	Sludge distribution; Clarifier hydraulics; Sludge blanket Anaerobic time % for	Keep settler mass inventory within margins; Hydrolysis; Sludge blanket level; Recycle concentration; Effluent sus-	Use sludge buffer in settler to damp hydraulic or organic disturbances;	hr-day

Obiettivi della regolazione

☞ Stabilizzazione

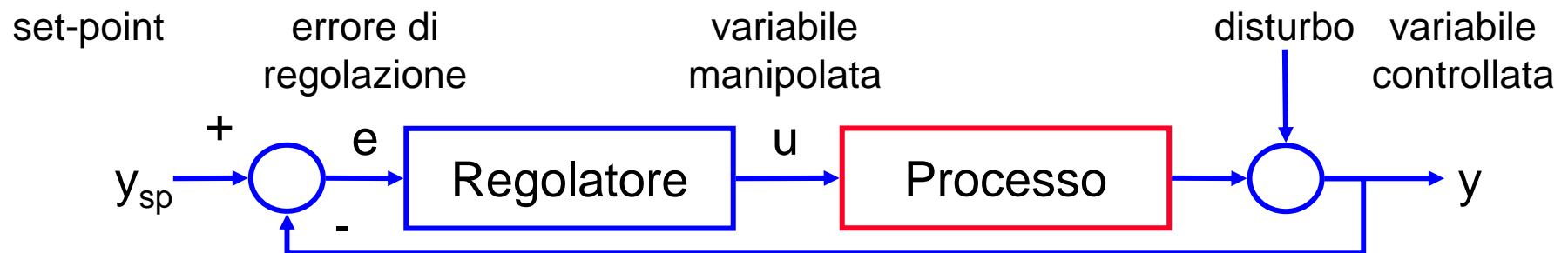
- ⇒ risposta del sistema stabile sotto tutte le possibili condizioni operative

☞ Inseguimento del set-point

- ⇒ Portare la variabile controllata y al valore desiderato y_{sp} agendo sulla variabile manipolata u

☞ Reiezione del disturbo

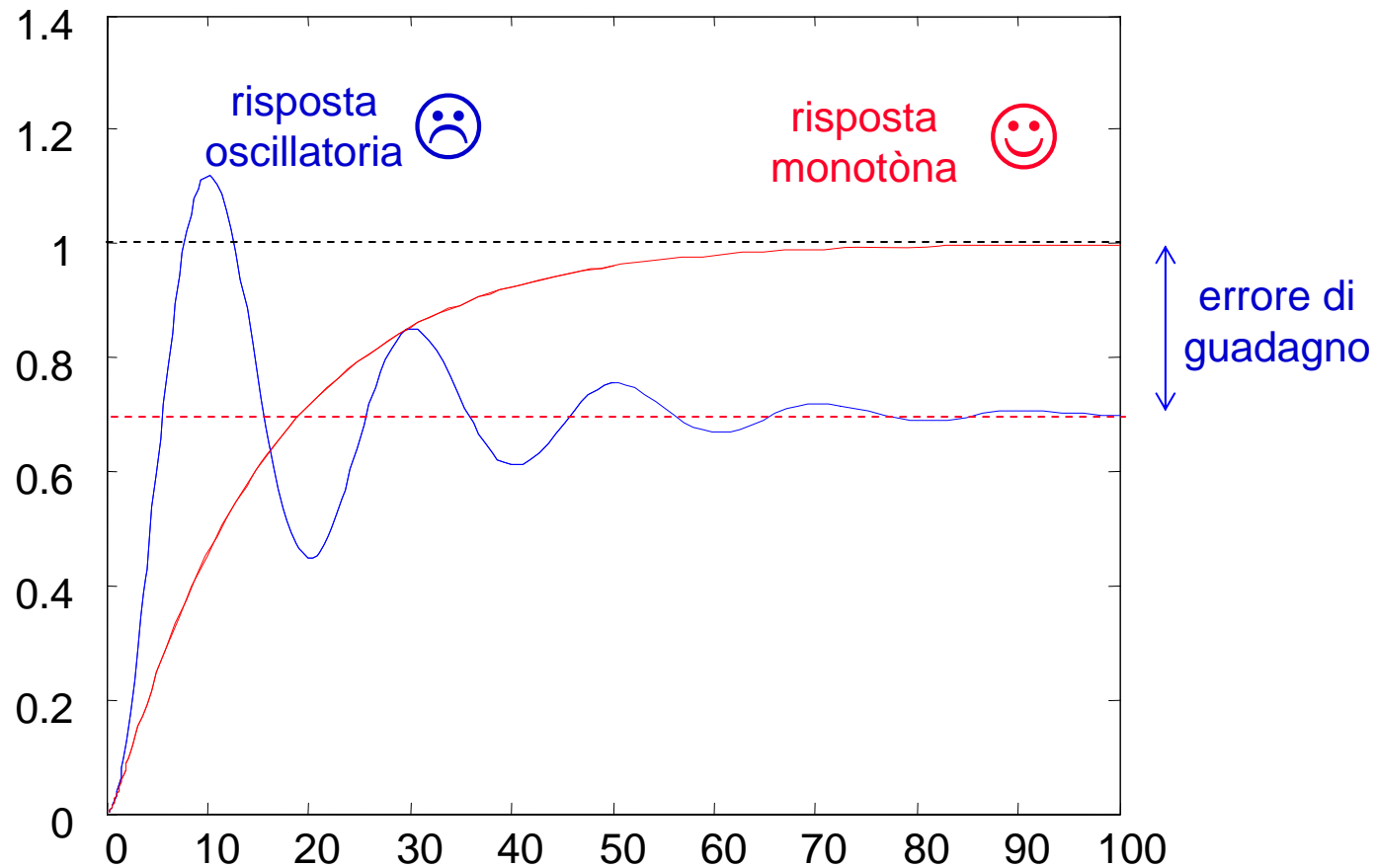
- ⇒ Mantenere il set-point anche se la variabile controllata è soggetta a disturbi esterni



Stabilizzazione

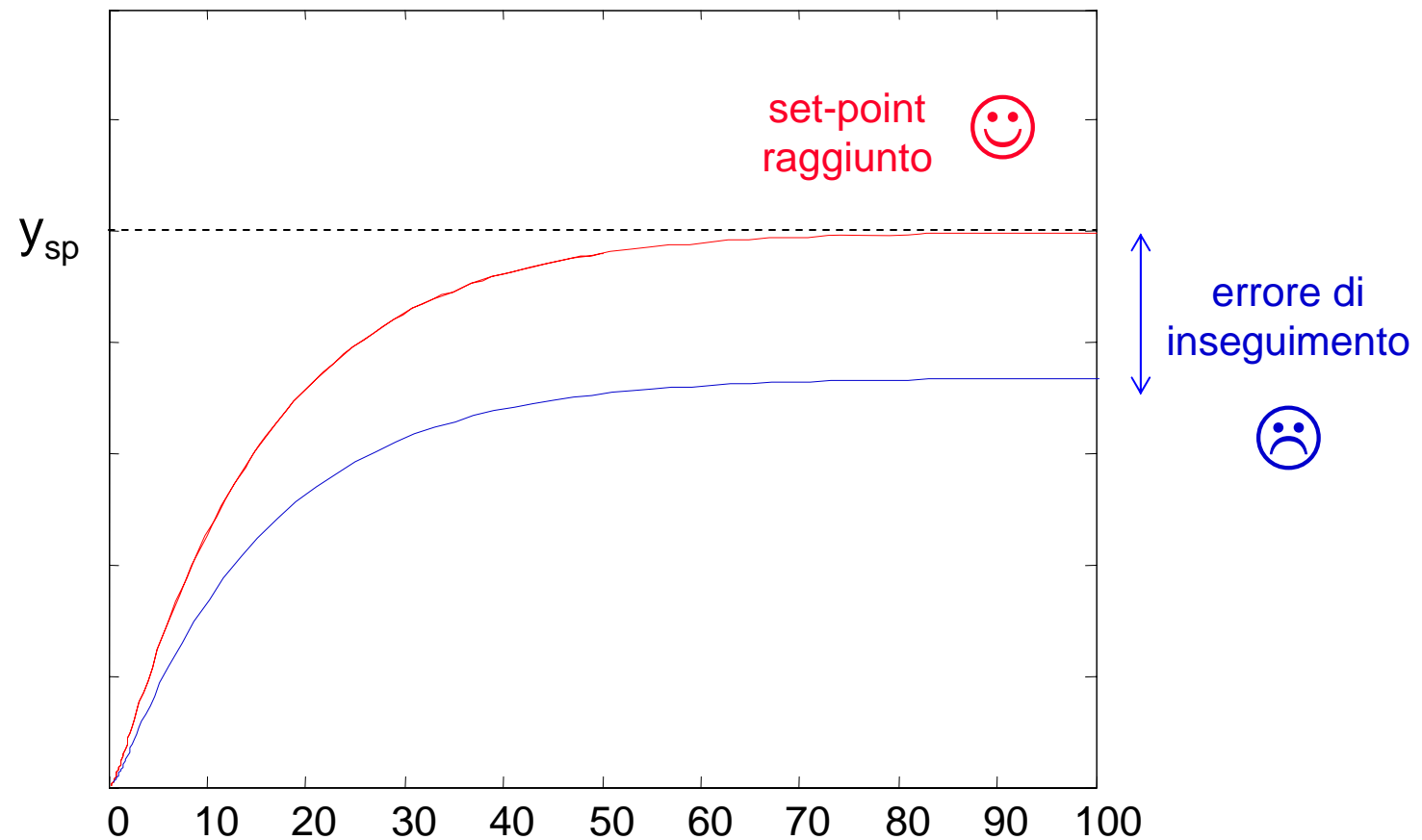
☞ Comportamento “desiderabile” del sistema

- ⇒ Assenza o minimizzazione delle oscillazioni
- ⇒ Guadagno ingresso/uscita = 1



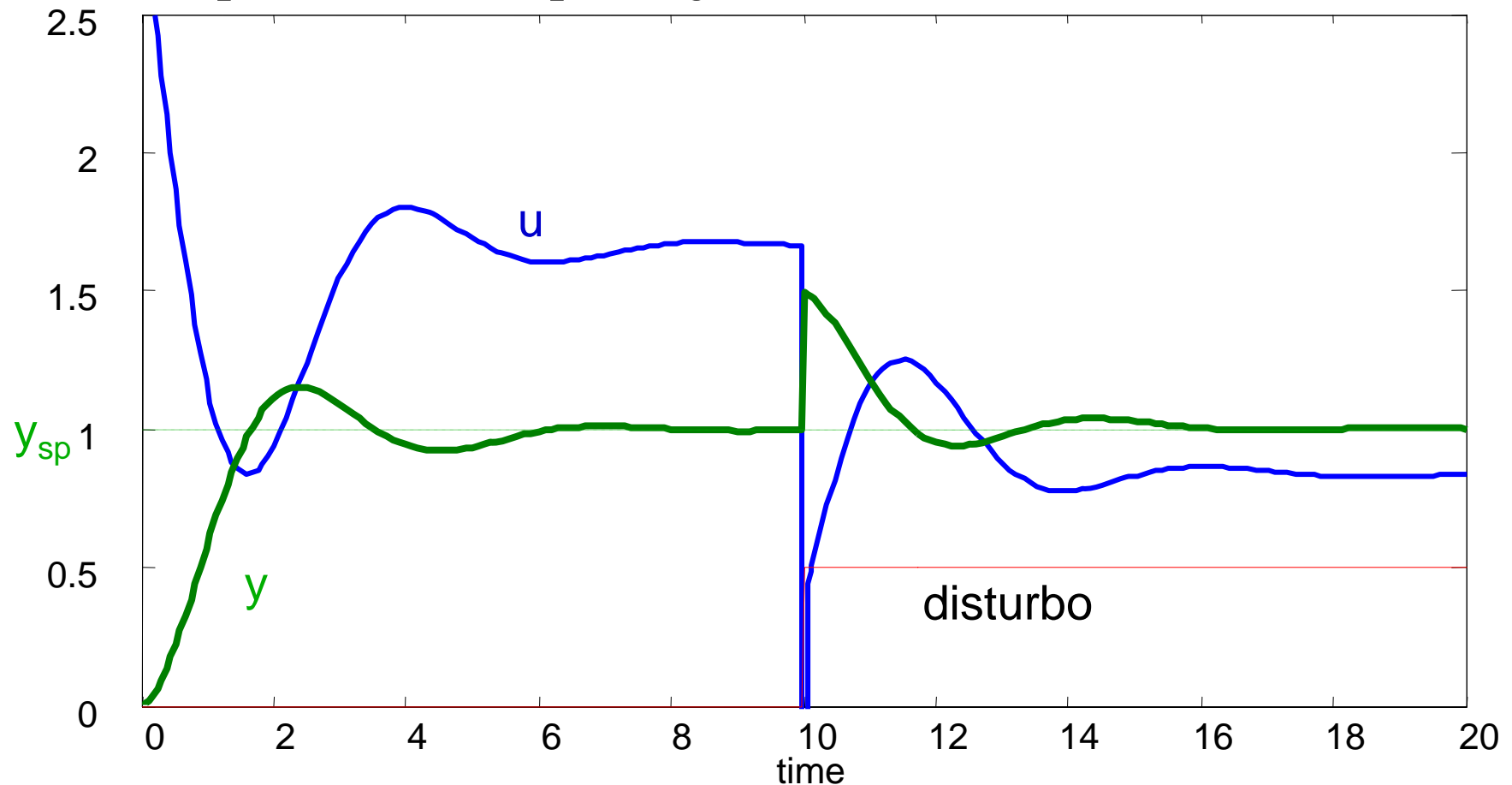
Inseguimento del set-point

- ☞ In sistema controllato deve portarsi al valore del set-point in un tempo “ragionevole” e con poche oscillazioni



Reiezione del disturbo

- ☞ A set-point costante, anche se un disturbo cambia il valore dell'uscita, il regolatore deve essere in grado di riportarla a set-point in un tempo “ragionevole”



Impostazione del problema di controllo

Il modello

- ⇒ E' necessario avere un modello analitico (o più spesso *numerico*) del processo

L'obiettivo di controllo

- ⇒ Mantenere una variabile di processo vicina ad un valore voluto (regolazione a set-point)
- ⇒ Massimizzare una data prestazione e/o minimizzare un costo di esercizio (il tutto soggetto a vincoli)
- ⇒ Va definito un funzionale di prestazione

Il regolatore

- ⇒ Definire la sua struttura
- ⇒ Sintonizzarne i parametri

Valutare le prestazioni (1)

- ☞ Per giudicare la bontà di un sistema di controllo si deve definire un funzionale di prestazione
- ☞ Per regolatori a set-point si dovrà valutare nel tempo la somma degli errori e dell'energia spesa per il controllo

$$ITAEU = \frac{1}{T} \int_0^T (t|e(t)| + \lambda|\delta u(t)|) dt \approx \frac{1}{T} \sum_k (k|e_k| + \lambda|\delta u_k|)$$

- ☞ Il primo termine pesa gli errori in modo crescente nel tempo, perché un errore di regolazione iniziale è più “scusabile” di uno che avviene dopo molto tempo
- ☞ Il secondo termine pesa lo “sforzo” di controllo (quanto costa) ed è direttamente legato al valore dell'ingresso (portata d'aria, portata di fanghi, reagenti chimici, etc.)
- ☞ L'orizzonte di controllo T dipende dal problema

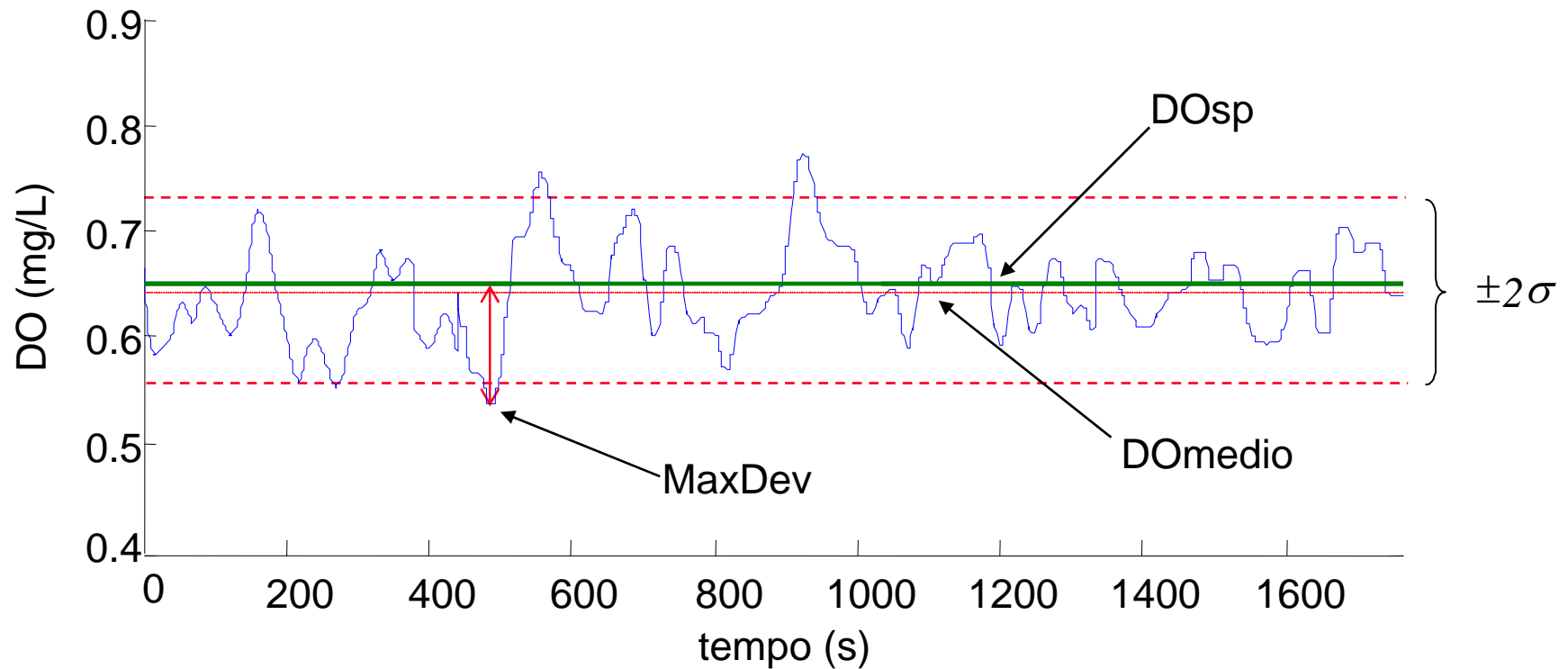
Ulteriori indici di prestazione

$$ISE = \int_{t_o}^{t_o+T} e^2 dt$$

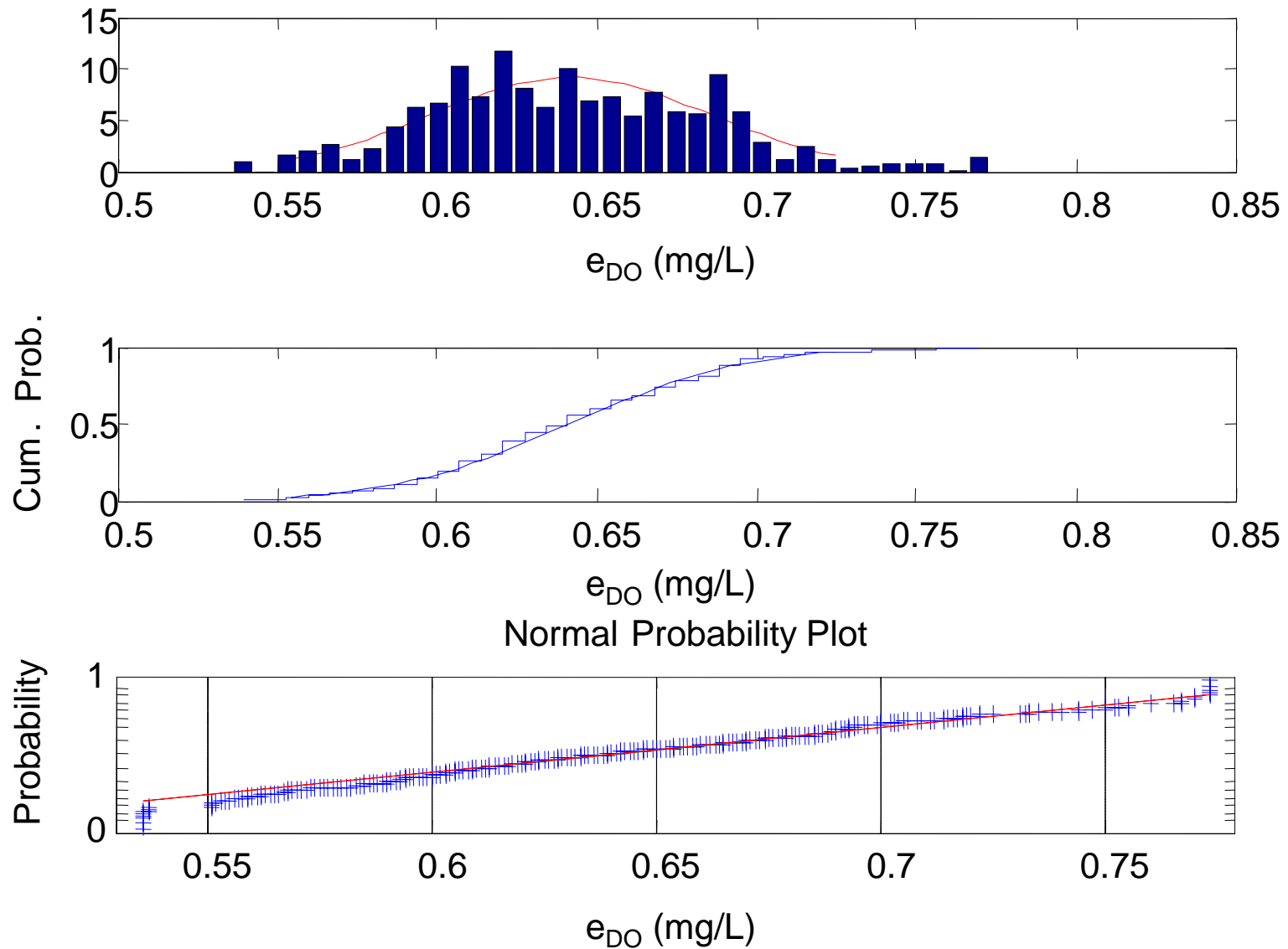
$$MaxDev = \max_T |e|$$

$$\sigma = e^2 - (\bar{e})^2$$

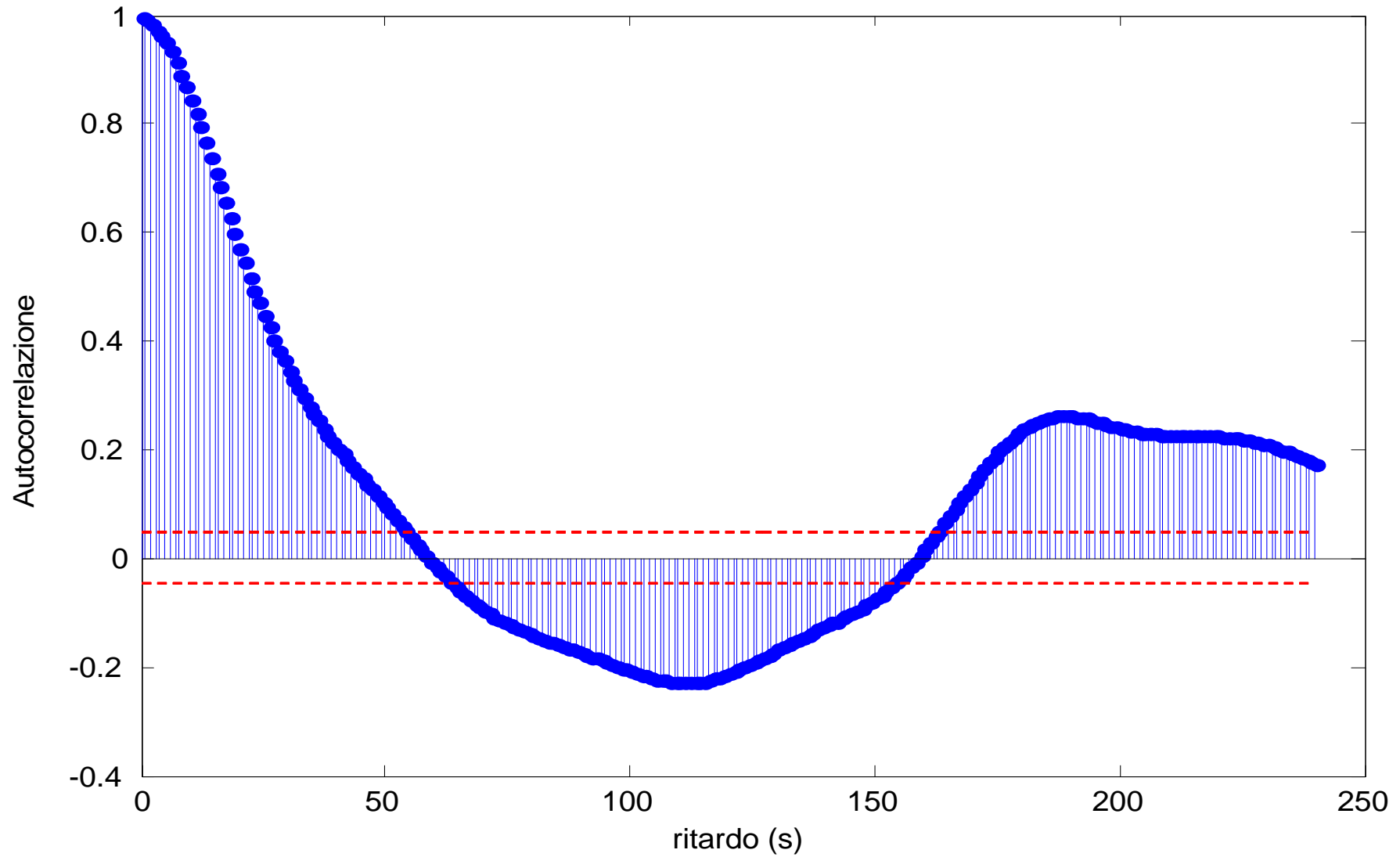
$$E_m(T) = y_{sp} - \bar{y}$$



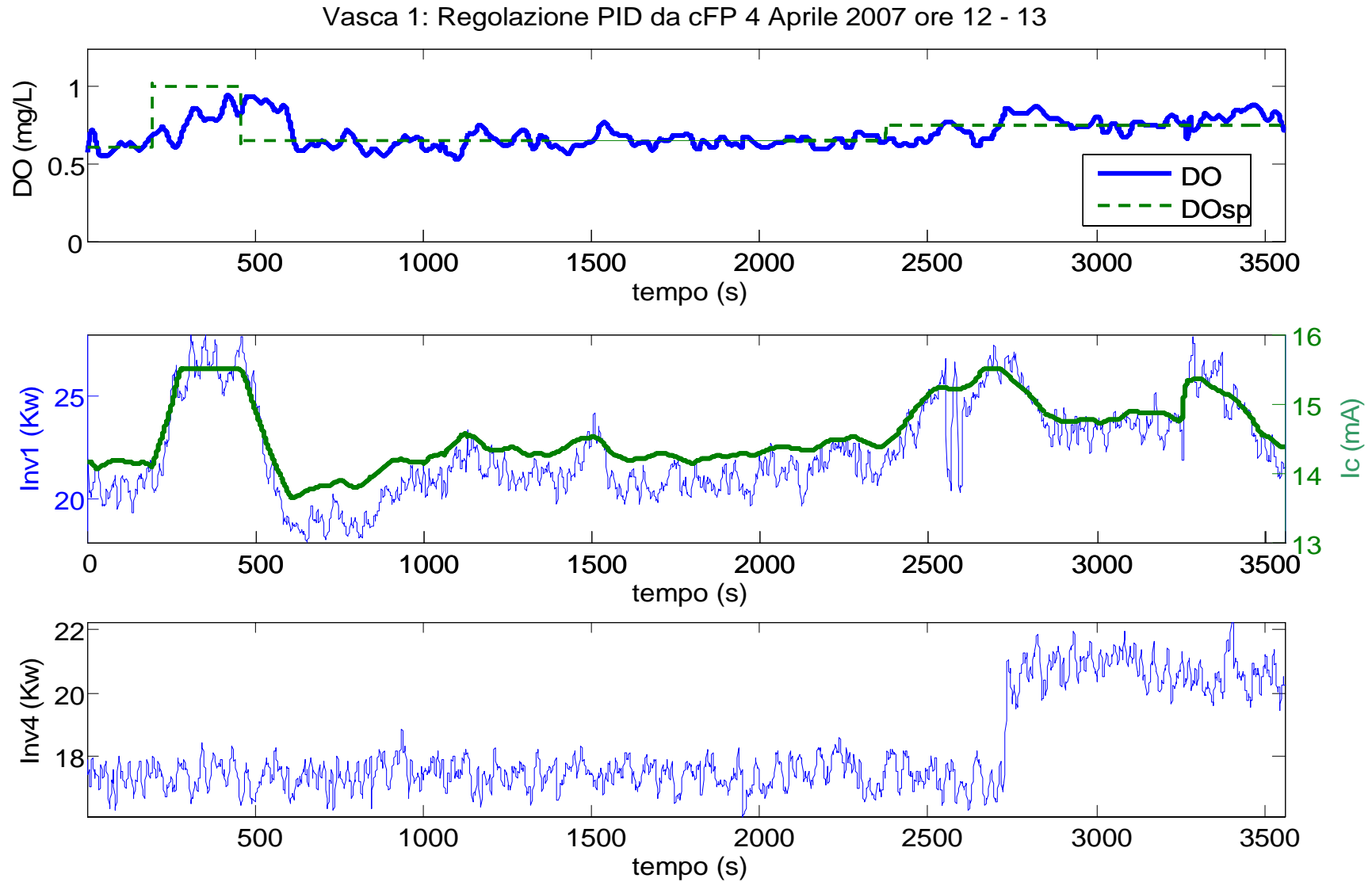
Analisi degli errori



Autocorrelazione degli errori



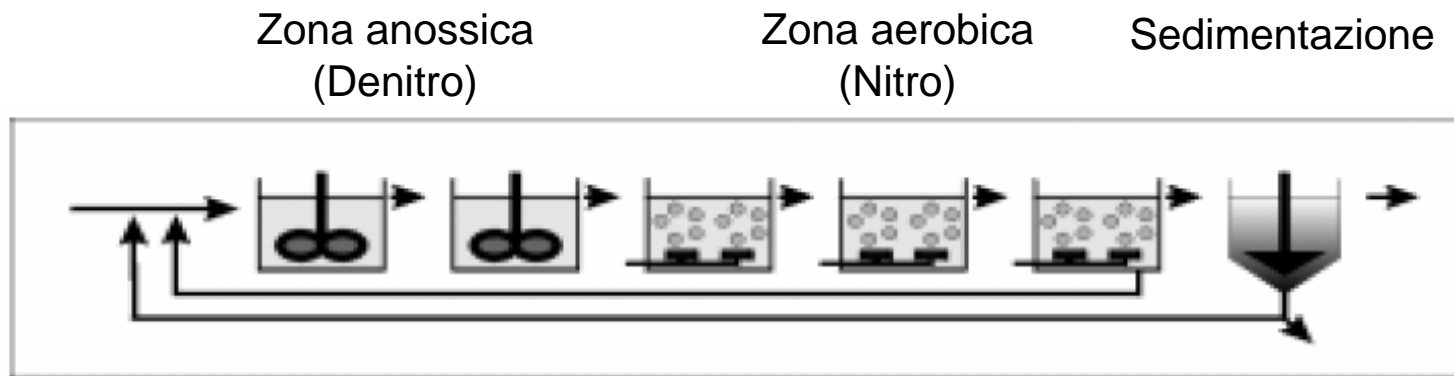
Esempio di regolazione dell'ossigeno disciolto



Gli aiuti per la progettazione: il Benchmark

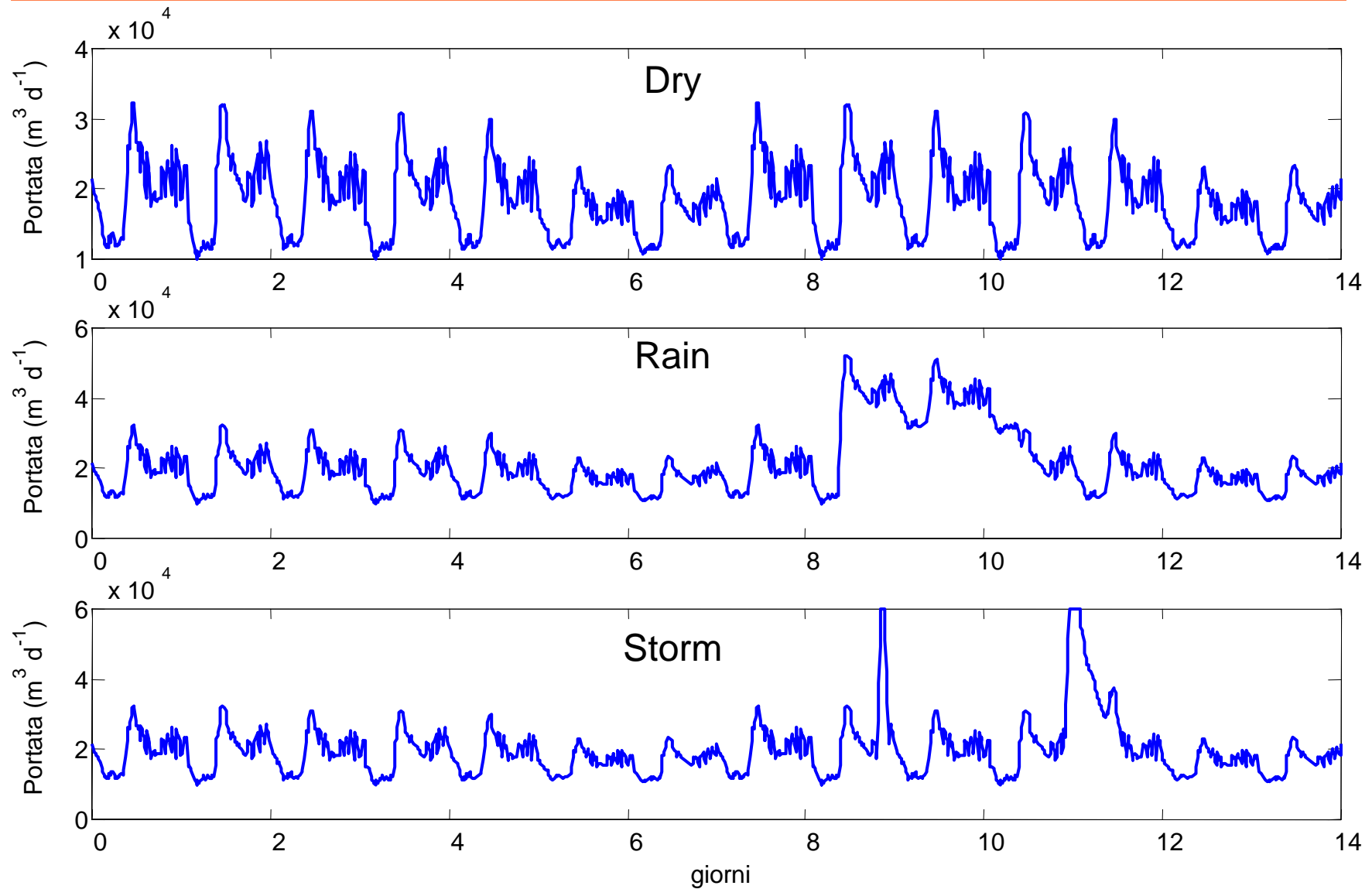
- ☞ Processo unificato per lo studio dei modelli e delle strategie di controllo
- ☞ Modello standardizzato, indipendente dalla piattaforma
- ☞ Processo tipo (Predenitro) a cinque vasche più sedimentatore secondario
 - ⇒ Modello ASM per le vasche biologiche
 - ⇒ Modello di Takacs a 10 strati per il sedimentatore
- ☞ Ingressi tipici standardizzati per 14 giorni
 - ⇒ tempo secco
 - ⇒ tempo piovoso
 - ⇒ evento di tempesta
- ☞ Studio finanziato dalla CE, programma COST 682 e COST 624
- ☞ Il sito del Benchmark è <http://www.ensic.inpl-nancy.fr/COSTWWTP/>
- ☞ Report finale disponibile in rete http://www.ensic.inpl-nancy.fr/COSTWWTP/Pdf/Simulator_manual.pdf

Configurazione del benchmark

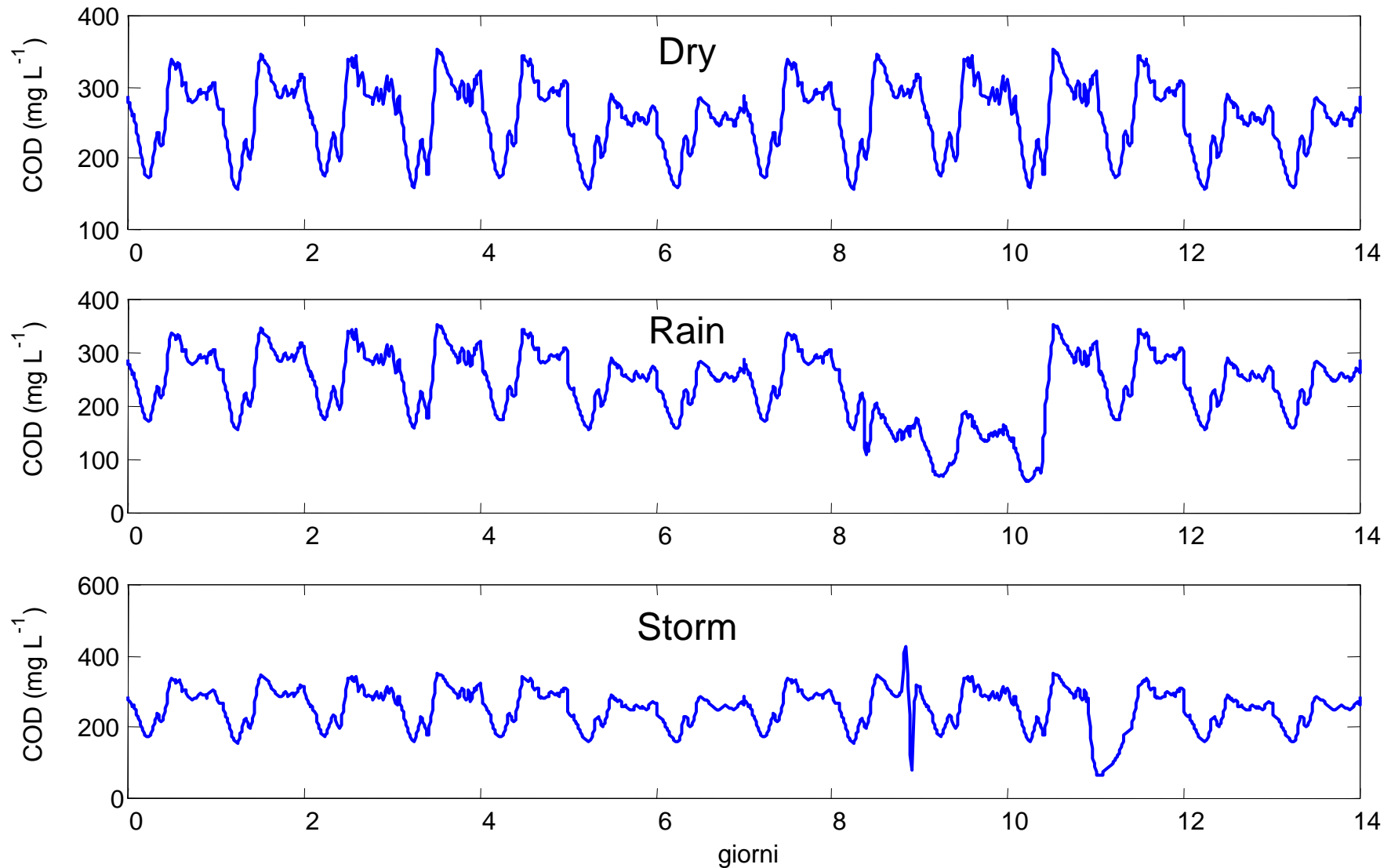


- 5 biological tanks-in-series with a secondary settler
- total biological volume of 5999 m³ (tanks 1 & 2 each 1000 m³ and tanks 3, 4 & 5 each 1333 m³)
- tanks 1 & 2 unaerated, but fully mixed
- aeration of tanks 3, 4 & 5 achieved using a *maximum* $K_L a$ of 10 hr⁻¹
- default $K_L a$ of 10 hr⁻¹ in tanks 3 & 4 and 3.5 hr⁻¹ in tank 5
- DO saturation in tanks 3, 4 & 5 of 8 gO₂ m⁻³
- two (2) internal recycles:
 - nitrate internal recycle from the 5th to the 1st tank at a default flow rate of 55338 m³ d⁻¹
 - RAS recycle from the underflow of the secondary settler to the front end of the plant at a default flow rate of 18446 m³ d⁻¹ (as there is no biological reaction in the settler, the oxygen concentration in the recycle is the same as in the fifth tank reactor)
- WAS is pumped continuously from the secondary settler underflow at a default rate of 385 m³ d⁻¹

Profili di portata usati nel Benchmark



Profili di carico usati nel Benchmark



Valutare le prestazioni: qualità dell'effluente

- ☞ Se il problema di controllo è quello di garantire la qualità dell'effluente, si deve definire un indice di prestazione funzione delle variabili di qualità monitorate, su un orizzonte significativo (es. 2 settimane)
- ☞ Si definisce un funzionale di prestazione in termini di qualità dell'effluente (EQ)

$$EQ = \frac{1}{T \cdot 1000} \int_t^T [2 \cdot TSS_e(t) + COD_e(t) + 2 \cdot BOD_e(t) + 20 \cdot TKN_e(t) + 20 \cdot S_{NOX_e}(t)] \cdot Q_e(t) \cdot dt$$

Ciascun termine rappresenta una caratteristica dell'effluente

$$TSS_e = 0.75(X_I + X_S) + 0.9(X_H + X_{ns} + X_{nb}) + 0.6 X_{STO}$$

$$COD_e = S_S + S_I + X_S + X_I + X_H + X_{ns} + X_{nb} + X_{STO}$$

$$BOD_{5,e} = 0.25(S_S + X_S + (1 - f_p) \cdot (X_H + X_{ns} + X_{nb} + X_{STO}))$$

$$TKN_e = S_{NH4} + (S_S \cdot i_{NSS}) + (S_I \cdot i_{NSI}) + (X_S \cdot i_{NXS}) + i_{NBM} \cdot (X_H + X_{ns} + X_{nb}) + (X_I \cdot i_{NXI})$$

$$S_{NOX,e} = S_{NO2,e} + S_{NO3,e}$$

Valutare le prestazioni: costi di gestione

👉 Alla qualità (EQ) si contrappone il costo di gestione, principalmente costi di

⇒ pompaggio

$$PE = \frac{0.04}{T} \int_{t_o}^{t_o+T} (Q_a + Q_r + Q_w) dt$$

con Q_a = ric. interno; Q_r = ric. dal sed. Q_w = spurgo

⇒ areazione

$$AE = \frac{24}{T} \int_{t_o}^{t_o+T} \left(\sum_{k=1}^N 0.4032 K_L a^2 + 7.8408 K_L a \right) dt$$

con N = numero di vasche aerate

Produzione fanghi

👉 La produzione dei fanghi all'interno del sistema (P_{sludge}) è calcolata sommando la massa di fanghi spurgati (TSS_w) e l'accumulo di solidi nell'impianto (ΔTSS_{system}):

$$P_{sludge} = \frac{TSS_w + \Delta TSS_{system}}{T} \quad [kg/d]$$

$$TSS_w = \int_{t_0}^{t_7 \text{ days}} \left[0.75 \cdot (X_{S,w}(t) + X_{I,w}(t)) + 0.6 \cdot X_{STO,w} + 0.9 \cdot (X_{H,w}(t) + X_{ns,w}(t) + X_{nb,w}(t)) \right] \cdot Q_w(t) \cdot dt$$

$$\Delta TSS_{system} = \Delta TSS_{reactor} + \Delta TSS_{settler}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta TSS_{reactors} = \sum_{i=1}^n \left[0.75 \cdot (X_{S,i} + X_{I,i}) + 0.6 \cdot X_{STO,i} + 0.9 \cdot (X_{H,i} + X_{ns,i} + X_{nb,i}) \right] \cdot V_i \\ \Delta TSS_{settler} = \sum_{j=1}^m \left[0.75 \cdot (X_{S,j} + X_{I,j}) + 0.6 \cdot X_{STO,j} + 0.9 \cdot (X_{H,j} + X_{ns,j} + X_{nb,j}) \right] \cdot z_j \end{array} \right.$$

$Q_w(t)$ = portata spurgata dall'impianto $[m^3/d]$

n = numero di reattori

V = volume del reattore $[m^3]$

m = numero di strati in cui è suddiviso il settler

z = altezza di ciascuno strato $[m]$

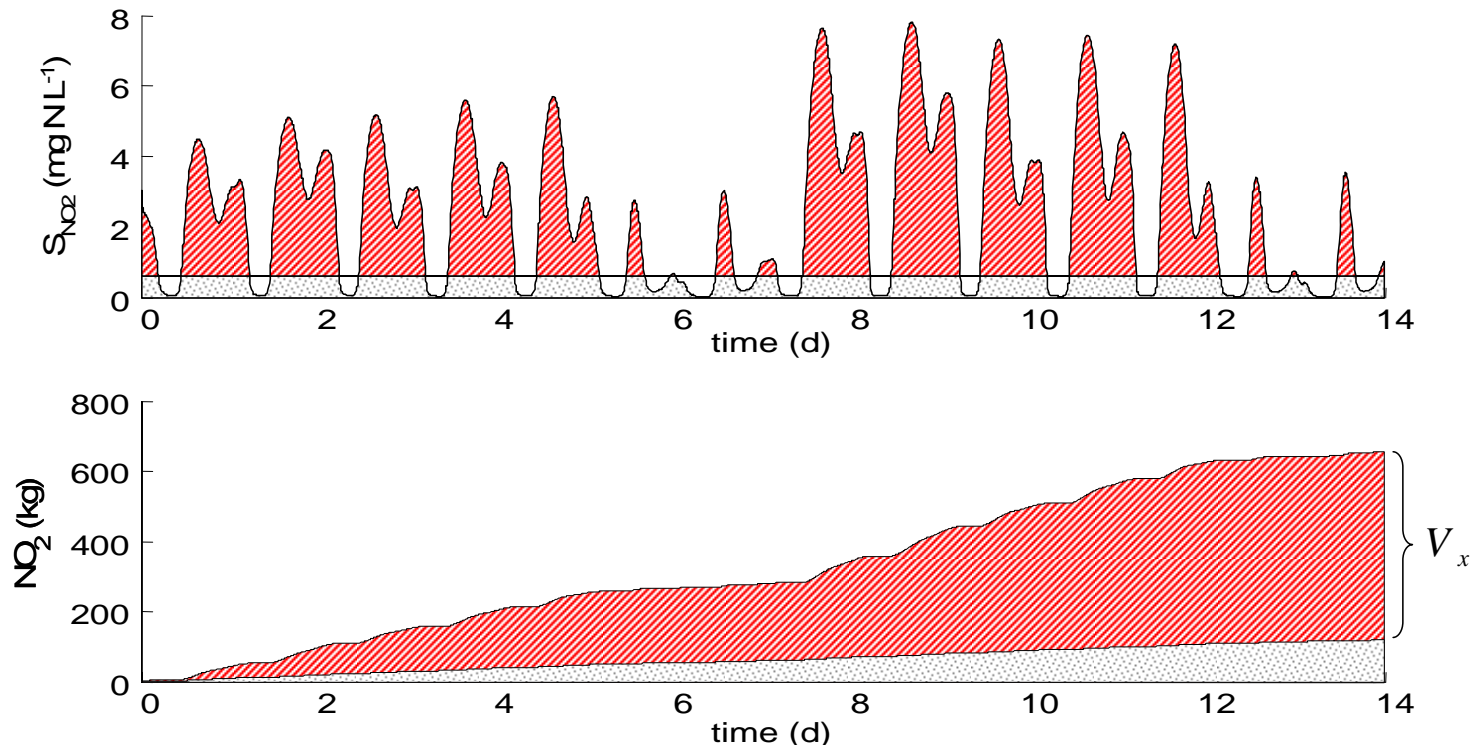
A = sezione di ciascuno strato, ovvero del sedimentatore $[m^2]$

Valutare le prestazioni: violazione dei vincoli

- 👉 Calcolare la frazione di tempo di superamento del valore limite per ciascuna variabile soggetta a limitazioni

$$V_x = \frac{1}{T \cdot 1000} \int_0^T (x(t) - x_{lim}) \cdot (x(t) > x_{lim}) \cdot Q_e(t) \cdot dt$$

- 👉 La concentrazione è moltiplicata per la portata di uscita, così la formula dà la quantità totale di materiale scaricato in eccesso



Limiti allo scarico

<i>Limiti d'emissione</i>	<i>Valore</i>	<i>Unità</i>
Azoto ammoniacale	≤ 15	<i>mg-N/l</i>
Azoto nitroso	≤ 0.6	<i>mg-N/l</i>
Azoto nitrico	≤ 20	<i>mg-N/l</i>
BOD ₅	≤ 25	<i>mg-BOD/l</i>
COD	≤ 125	<i>mg-COD/l</i>

Problemi tipici di controllo del processo

Gestione di una vasca di accumulo

- Per evitare sovraccarichi idraulici e/o organici si accumula l'influenza in eccesso in una vasca laterale, da cui si tratta un poco alla volta

Livello dell'Ossigeno Disciolto

- Si aggiusta la portata di aria in funzione della richiesta di ossigeno (OUR)

Portata dei fanghi di ricircolo e/o di supero

- La biomassa nel sedimentatore è solo un accumulo, ma non è operativa.
- Lo spostamento dal sedimentatore all'aeratore aumenta l'efficacia di trattamento, quello dell'aeratore al sedimentatore la diminuisce
- La portata di smaltimento regola l'età dei solidi (SRT)

Dosaggio del carbonio organico

- Se l'influenza non ha abbastanza carbonio da sostenere la denitrificazione, se ne aggiunge artificialmente

Simulazione di un processo a fanghi attivi

Vasca di ossidazione

- ⇒ Modello ASM con apporto di aria

Vasca anossica

- ⇒ Modello ASM in assenza di aria (anossia)

Sedimentatore

- ⇒ Modello di Takacs a 10 strati con alimentazione al 6° strato
- ⇒ Calcolo dei flussi di massa e delle velocità di sedimentazione in funzione della densità dei fiocchi

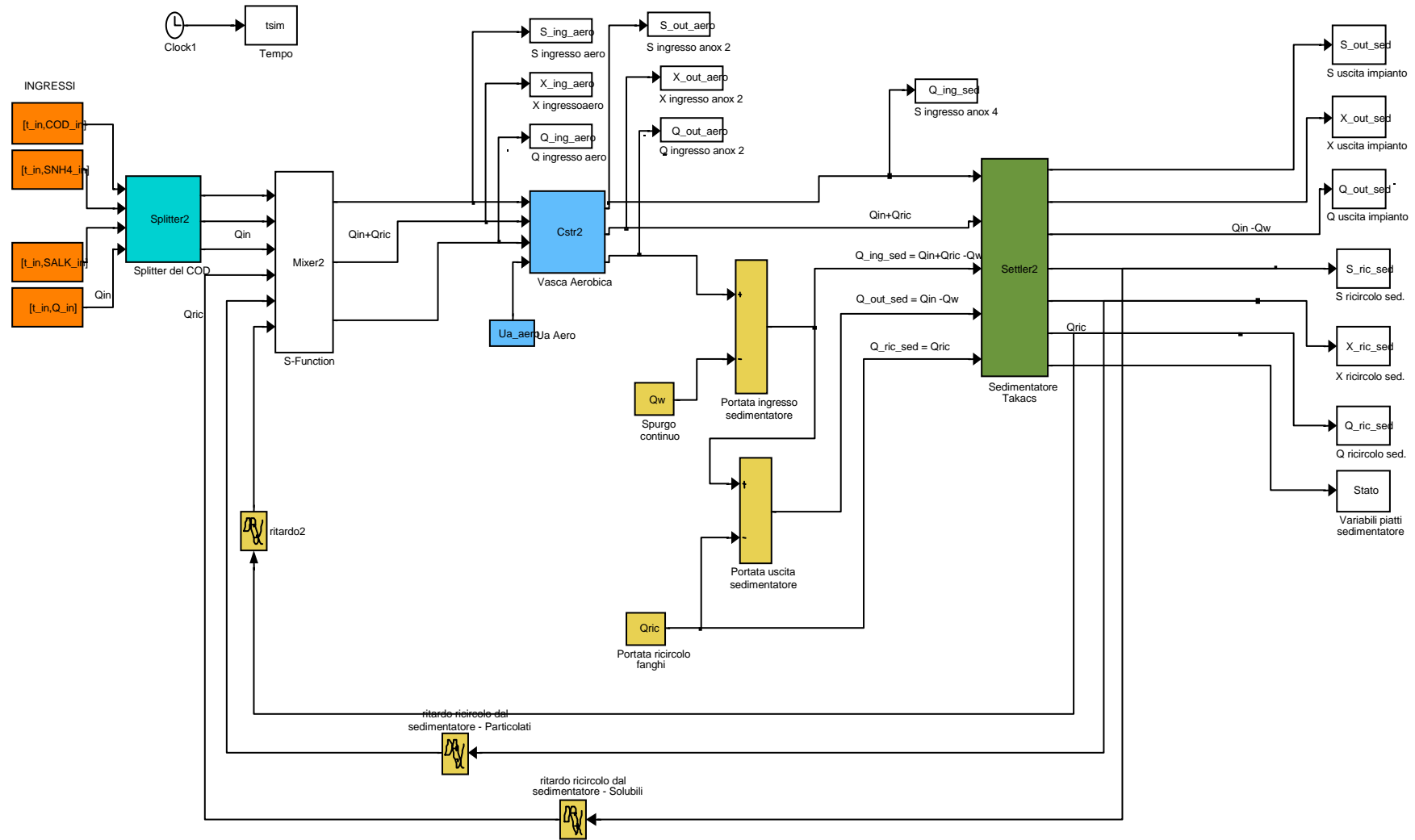
Mixer

- ⇒ Serve a miscelare due correnti, componente per componente, ad es. per la corrente di ricircolo







Splitter

- ⇒ Fornisce al modello ASM tutta la ripartizione del COD che non è possibile avere dalle analisi correnti

Realizzazione Simulink



Bibliografia

-  Carlsson B. and Lindberg C.F. (1997). Some control strategies for the activated sludge process, *Univ. of Uppsala*.
-  Olsson,G.and Newell, B. (1999). *Wastewater Treatment Systems*. IWA Publishing, London.
-  Alex J., Beteau J.F., Hellinga C., Jeppsson U., Marsili-Libelli S., Pons M.N., Spanjers H.and Vanhooren H. (1999). Benchmark for evaluating control strategies in wastewater treatment plants. *Proc. ECC '99*, Karlsruhe.
-  Copp J. (2001) The COST simulation benchmark: Description and simulator manual. *Office for official publications of the European Community*, Luxembourg. 154 pp.
-  Nielsen M. K. (2001). Control of wastewater systems in practice, ICA Report.
-  Marsili-Libelli S., L. Giunti. (2002). Fuzzy predictive control for nitrogen removal in biological wastewater treatment. *Water Sci. Tech.*, 45(4-5): 37 – 44.