

Sviluppo di un soft-sensor per la stima del carico organico nei processi di depurazione biologica

S. Marsili Libelli
Università di Firenze



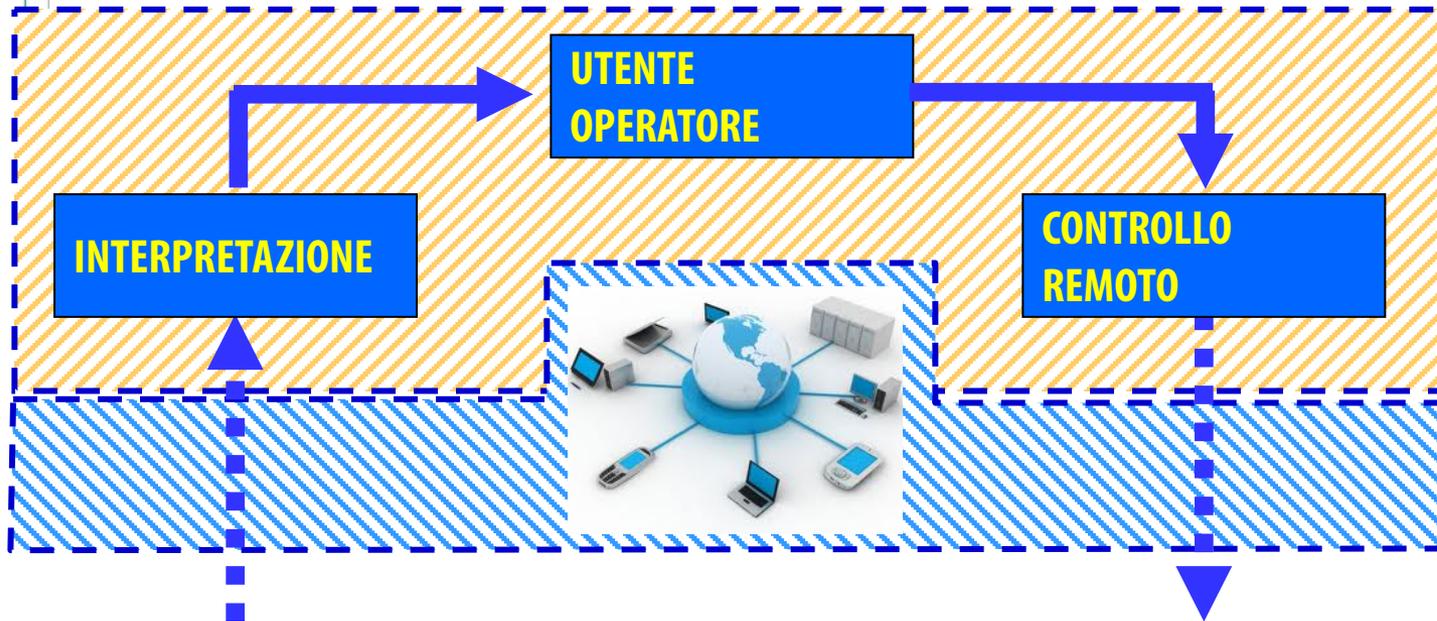
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DINFO
DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

Scopo della ricerca

- ❑ La misura in real-time dell'abbattimento di carbonio (ΔCOD) è uno dei principali indici di valutazione nella conduzione del processo
- ❑ Serve per valutare
 - ❑ Il bilancio di massa ingresso-uscita
 - ❑ L'efficienza di depurazione
- ❑ Attualmente la misura viene effettuata attraverso analisi periodiche di laboratorio
- ❑ Ricerca svolta in collaborazione con
 - ❑ ATI AcmoTec (Ing. Antonio Allocca)
 - ❑ Acque Ingegneria srl (per la disponibilità dei dati)

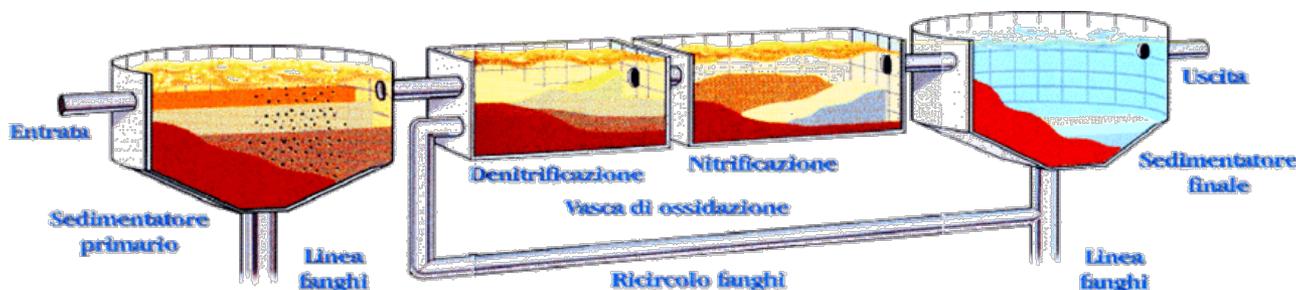
Il Soft-Sensor è utile nel caso di impianto telecontrollato



TELECONTROLLO
E
SUPERVISIONE
(Remoto)

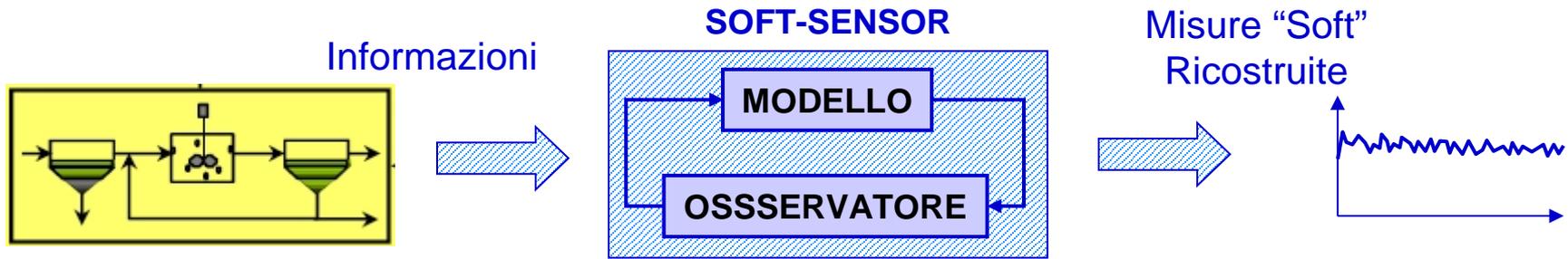
RETE DI
COMUNICAZIONE

CONTROLLO
AUTOMATICO
(Locale)

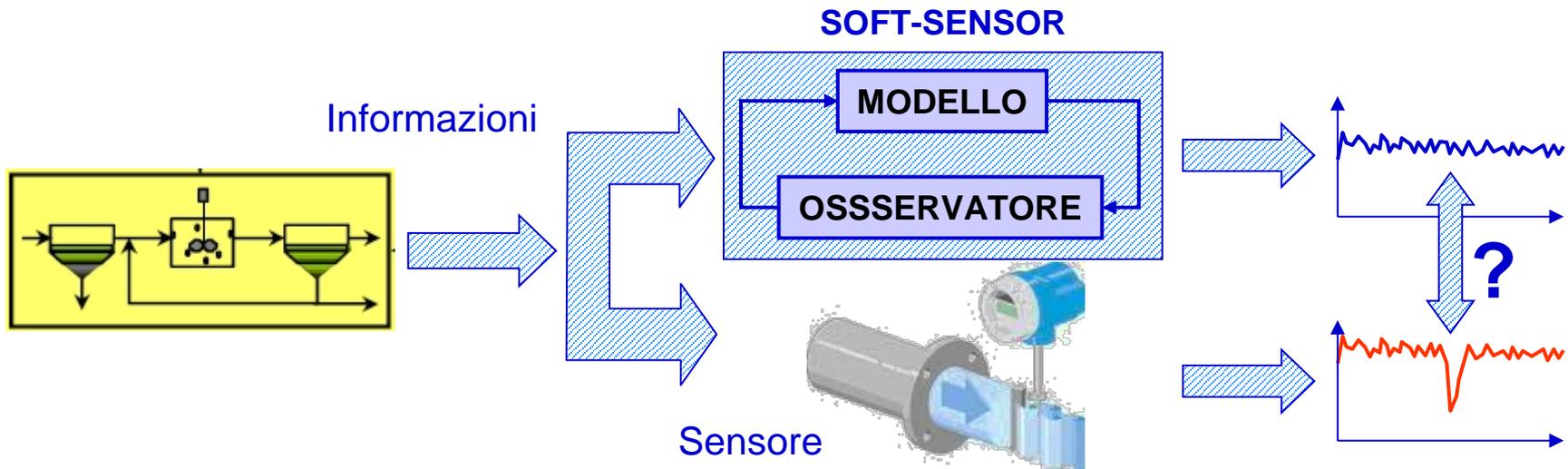


Cosa è un Soft-Sensor

- Sistema software per la ricostruzione di variabili di processo
 - Inferenza di variabili non misurabili



- Cross - validazione di variabili misurate

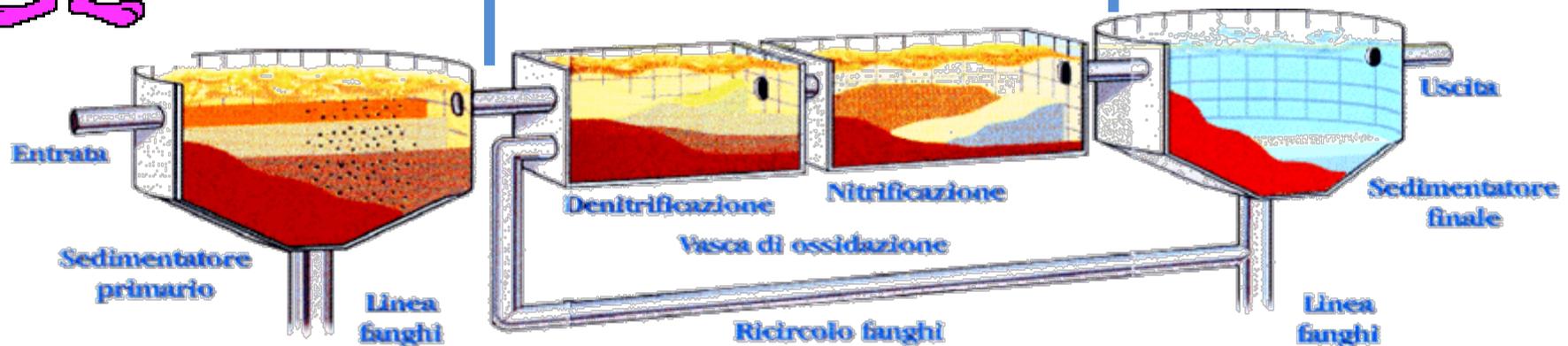
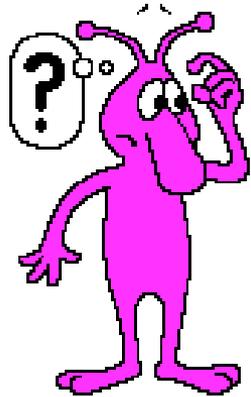


Stima del COD abbattuto

$COD_{in}(t)$

$COD_{out}(t - \mathcal{I}_H)$

COD
abbattuto



$\mathcal{I}_H = \text{Tempo di Ritenzione Idraulica}$

Il Problema

- ❑ La misura del COD (Chemical Oxygen Demand) è essenziale per conoscere
 - ❑ L'efficienza del processo
 - ❑ Il bilancio di massa
- ❑ Viene effettuata *una tantum* in laboratorio
 - ❑ Durata oltre 2 ore
- ❑ Il BOD (Biochemical Oxygen demand) richiede 5 giorni ed è scarsamente riproducibile
- ❑ Esistono sistemi automatici *indiretti*, che sono costosi e non del tutto affidabili
- ❑ Tipica situazione in cui l'impiego di un *soft-sensor* può veramente essere vincente.

La misura del COD



CUVETTA

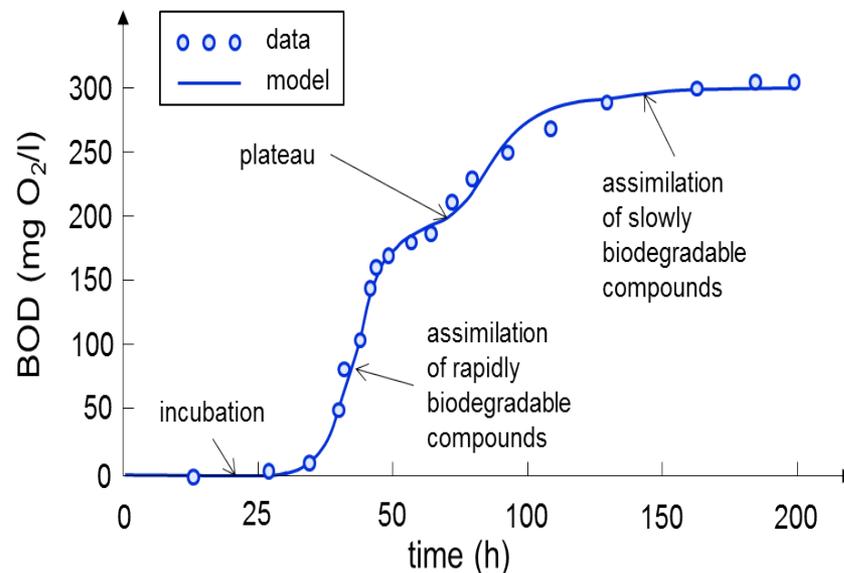
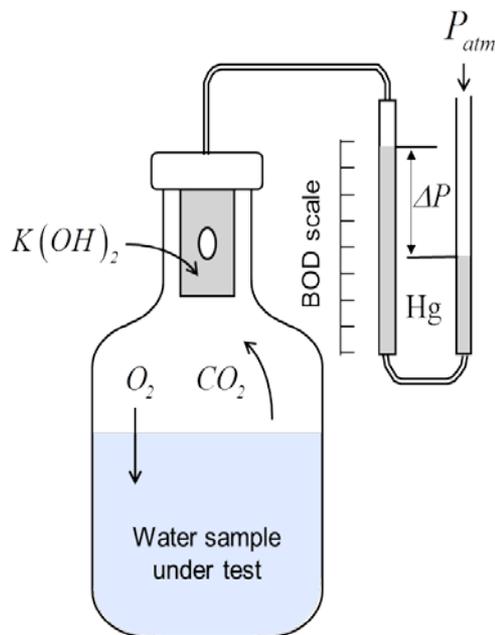
TERMOREATTORE

SPETTROFOTOMETRO

Incubazione in termoreattore e successiva misura spettro-fotometrica.
Durata: oltre 2 h

La misura del BOD

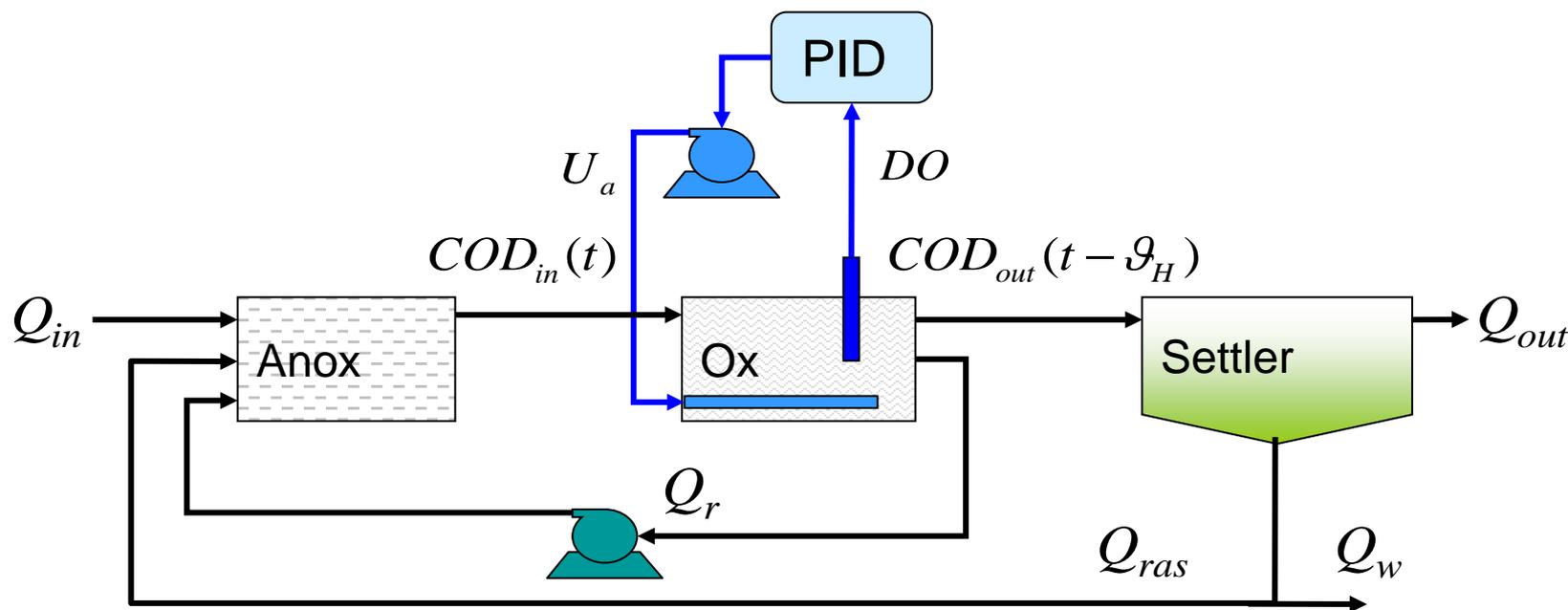
- ❑ Il BOD misura la biodegradabilità del refluo attraverso il consumo di ossigeno di una biomassa simile a quella presente nell'impianto
- ❑ Troppo lento e non realizzabile in real-time.



La Teoria

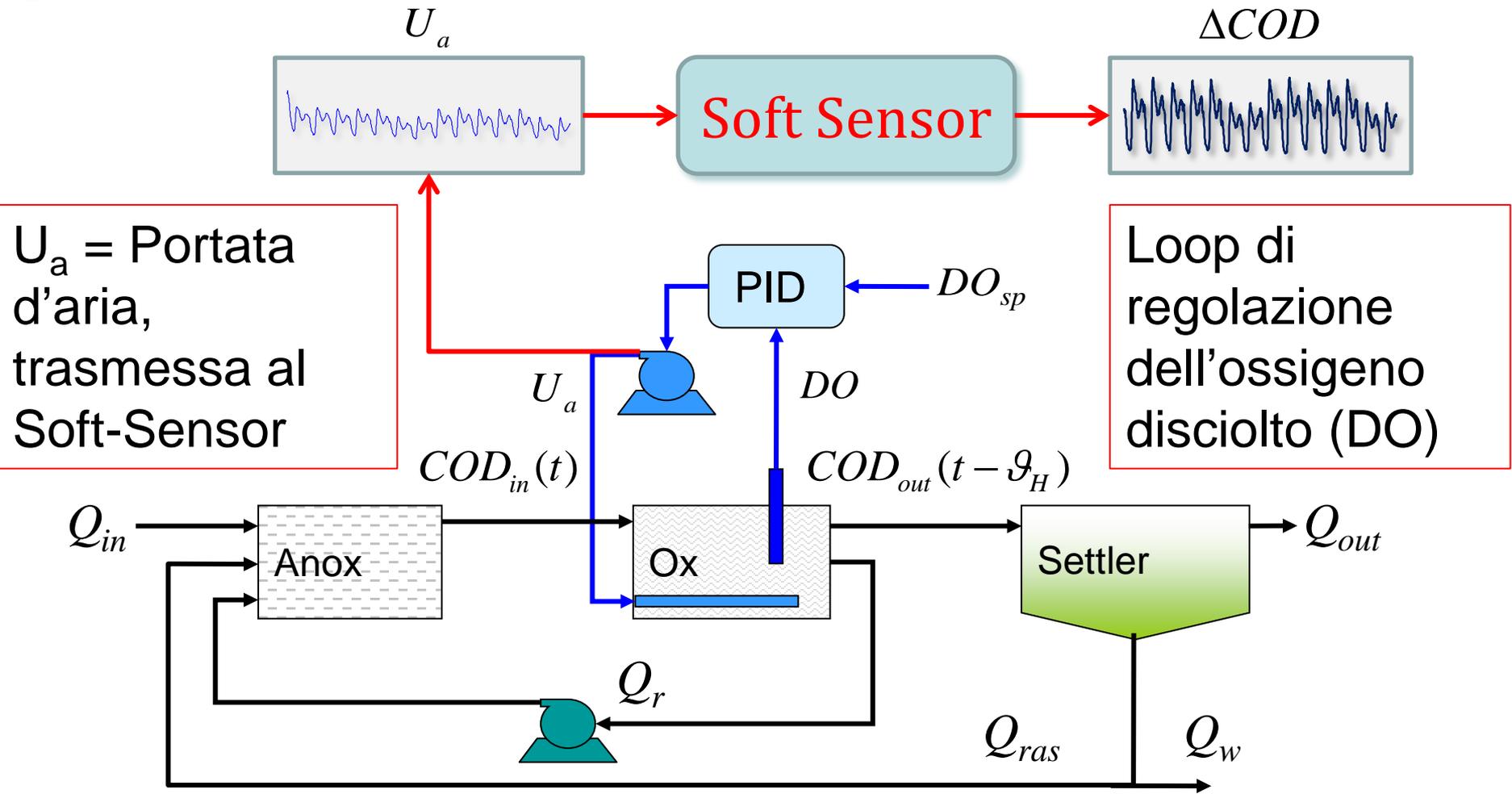
- Se il livello di ossigeno disciolto è mantenuto ad un **livello costante**, esiste una proporzionalità fra COD abbattuto e portata d'aria, tenendo conto del ritardo ϑ_H

$$\Delta COD = COD_{in}(t) - COD_{out}(t - \vartheta_H) = p_1 \times U_a + p_2$$



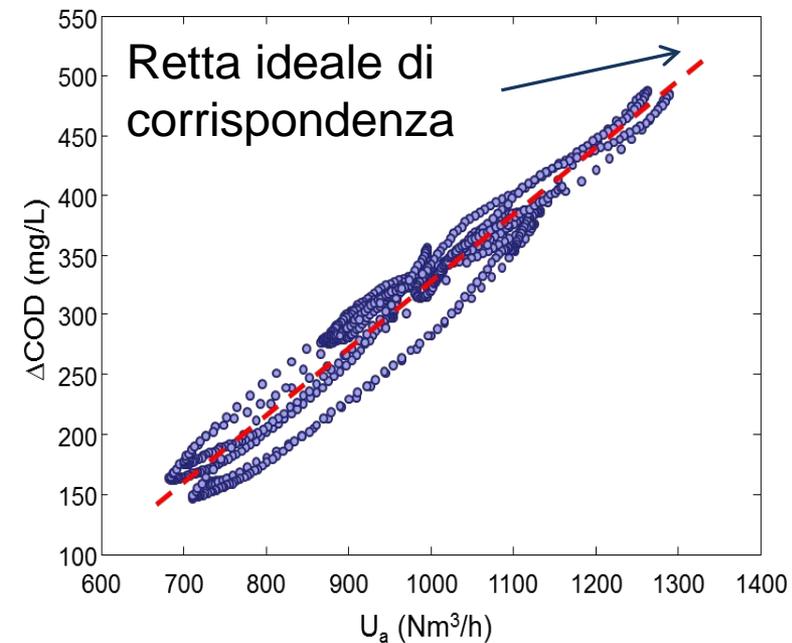
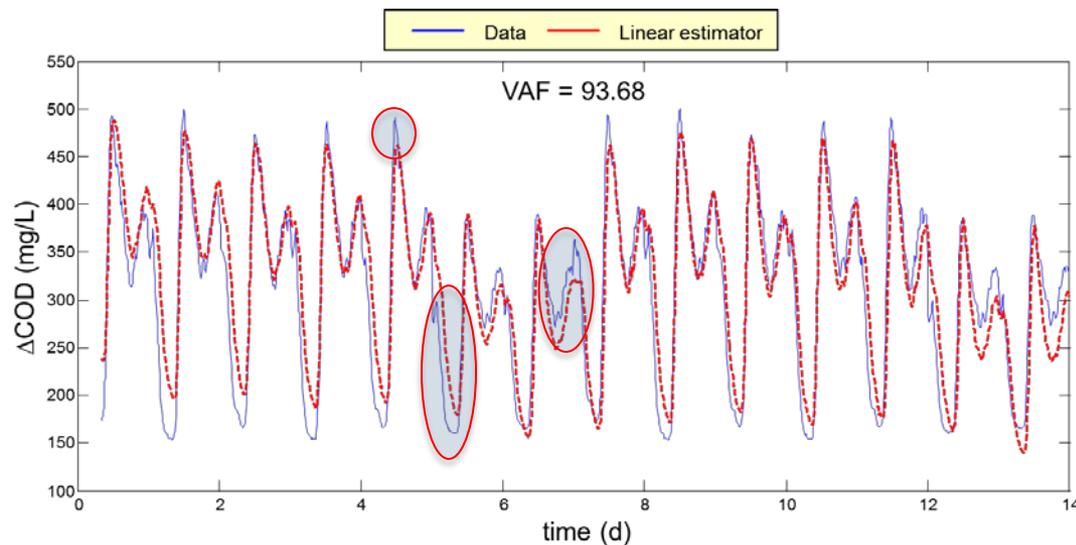
Inserimento del Soft-Sensor

$$\Delta COD = COD_{in}(t) - COD_{out}(t - \mathcal{G}_H) = p_1 \times U_a + p_2$$



Ingegnerizzazione semplice del Soft-Sensor

- ❑ La corrispondenza lineare non è abbastanza performante se testata su dati generati da un modello ASM3
- ❑ L'approssimazione lineare non è sufficiente



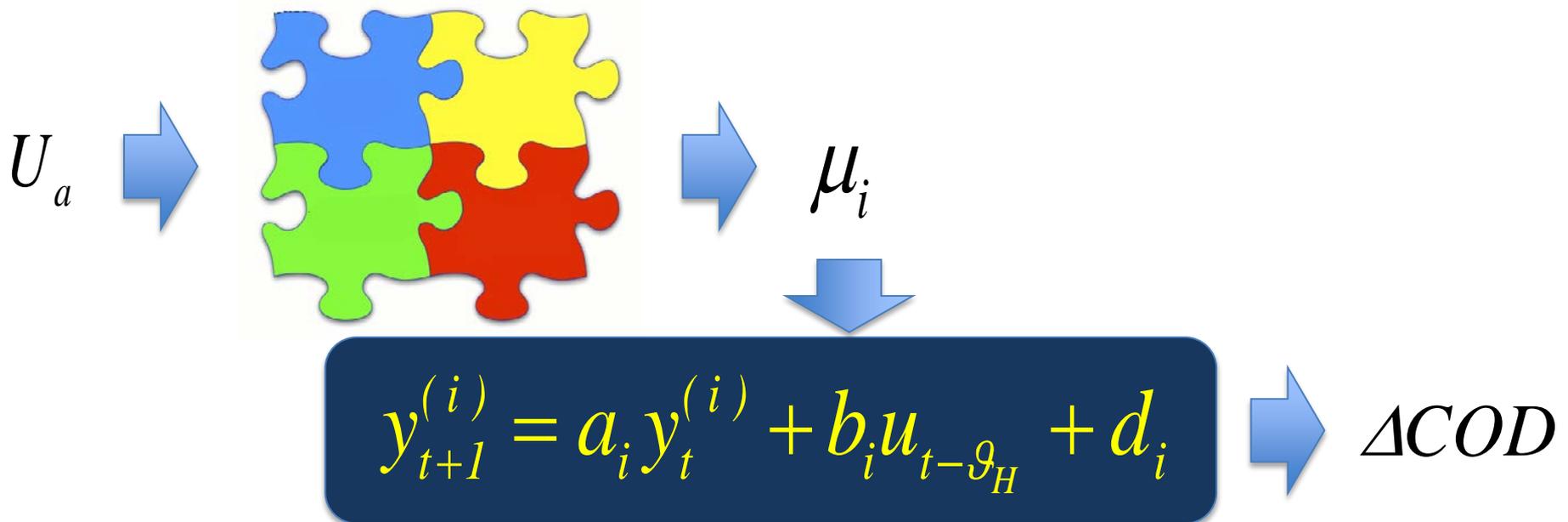
Ingegnerizzazione migliore del Soft-Sensor

- Sostituiamo alla relazione lineare un insieme di relazioni lineari fuzzy, che si adattino ai vari stati di funzionamento

Partizione in clusters

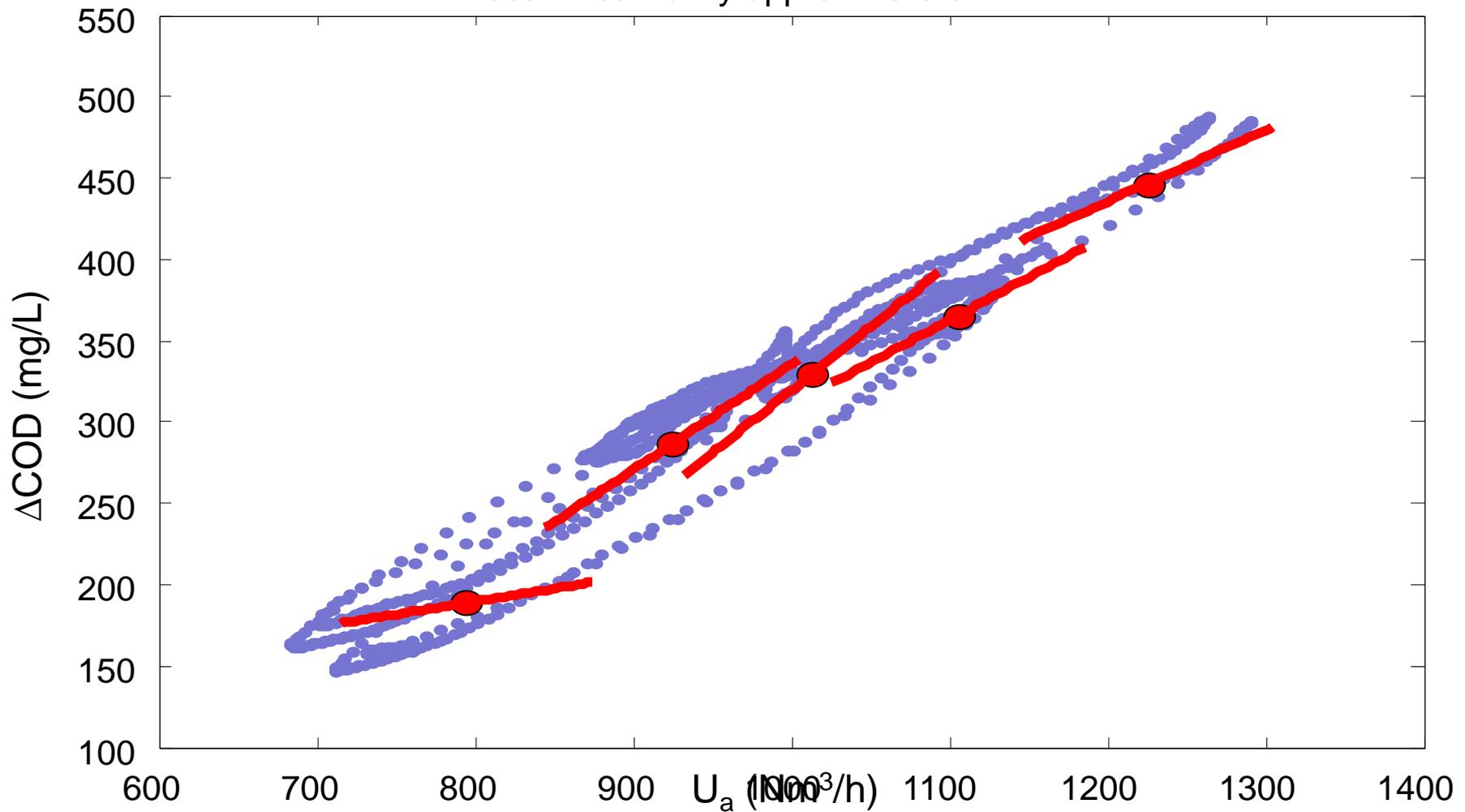
Gradi di appartenenza

Calcolo dei consequenti lineari



Approssimazione fuzzy con rette locali

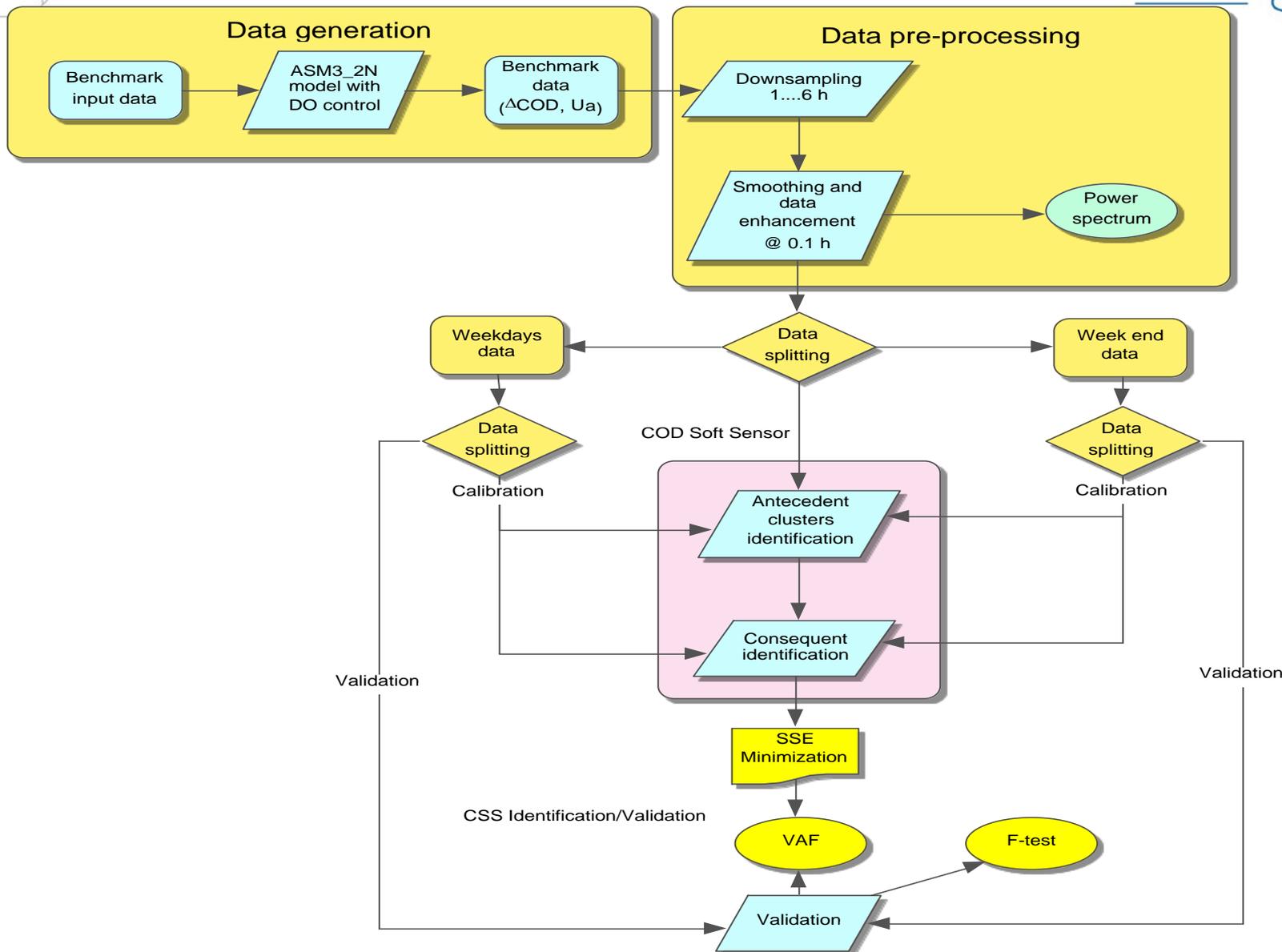
Local linear fuzzy approximators



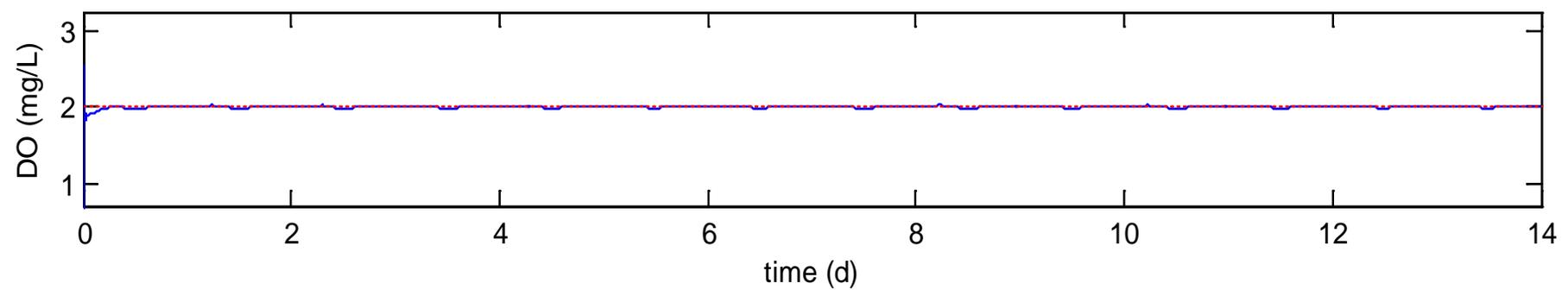
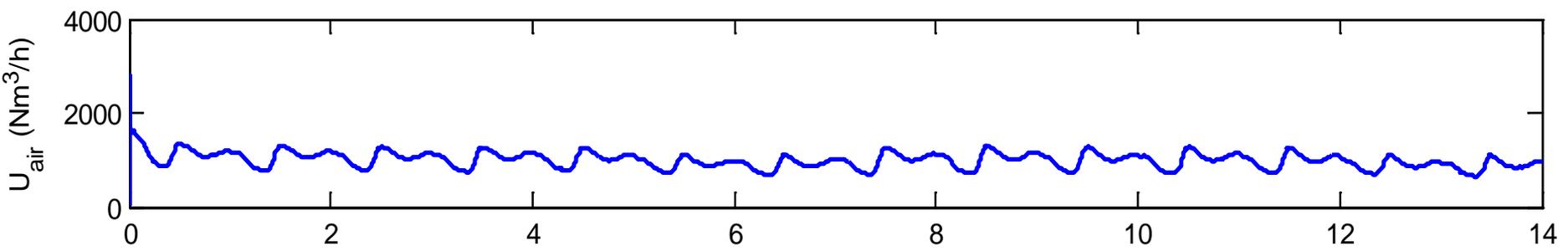
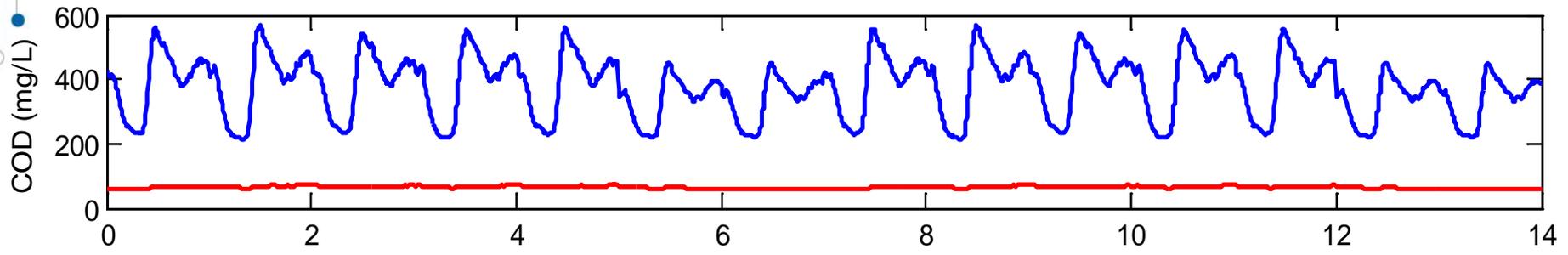
Aspetti di ingegnerizzazione

- ❑ Qualità e quantità dei dati, sia in allenamento che in normale operazione real-time
 - ❑ Data enhancement
- ❑ Clustering dei dati (ΔCOD , U_a)
 - ❑ Quanti clusters?
 - ❑ Quale esponente fuzzy m ?
- ❑ Stima delle rette approssimanti (a , b , d) e del tempo di ritenzione idraulico ϑ_H
- ❑ Validazione “a posteriori”
 - ❑ Sum of Squared Errors (SSE)
 - ❑ Variance Accounted For (VAF)
 - ❑ F-test regression line

Fasi dell'ingegnerizzazione

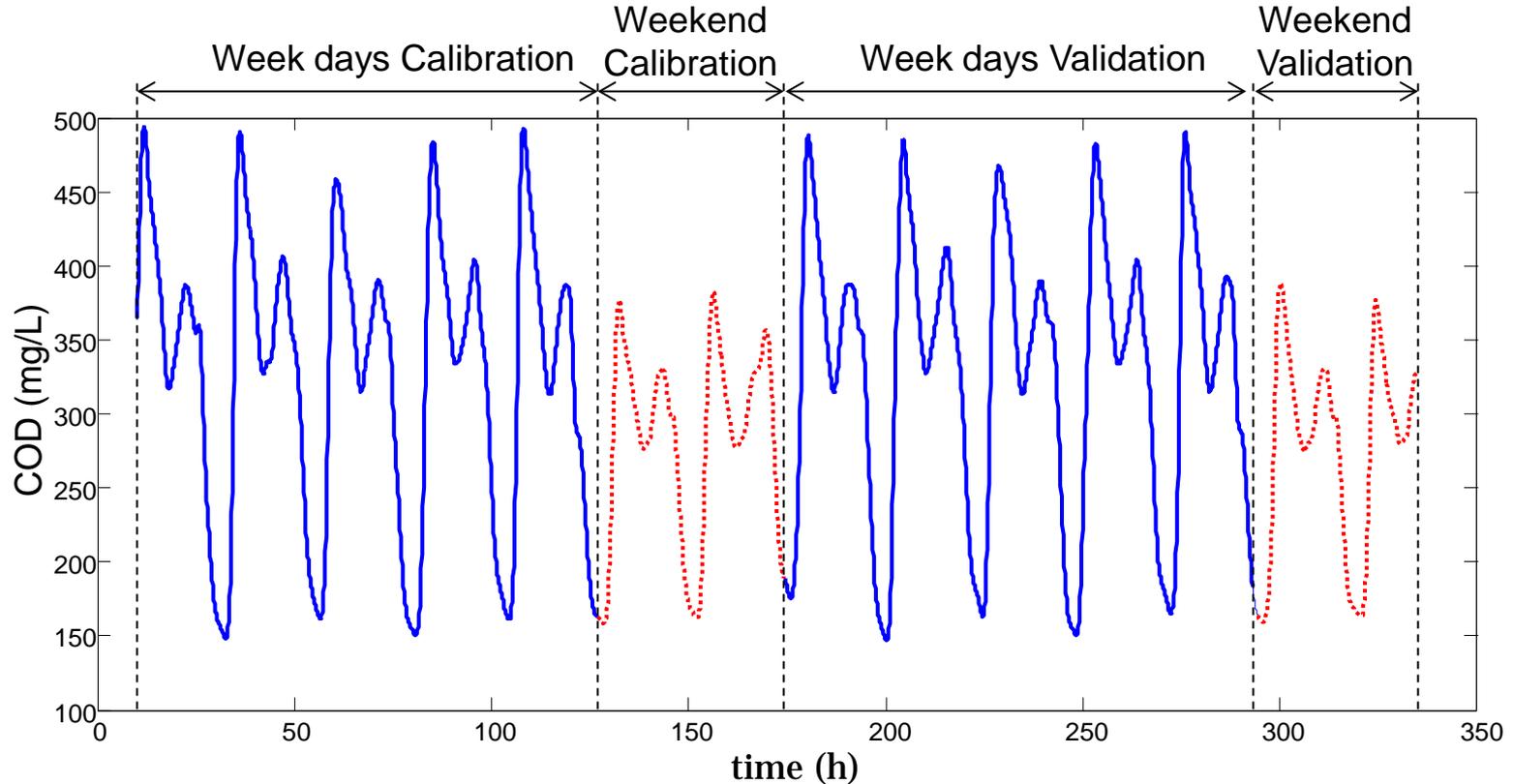


Dati di allenamento



Divisione dei dati per periodi

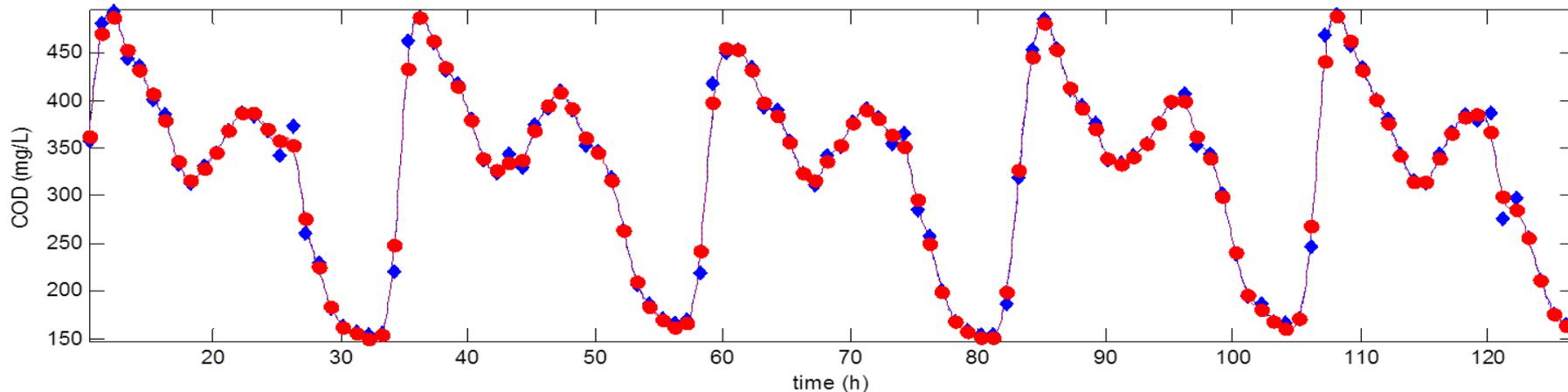
- Dato che le caratteristiche del refluo cambiano in modo significativo nel fine settimana, si allenano due stimatori distinti



Calibrazione/Validazione per i giorni lavorativi

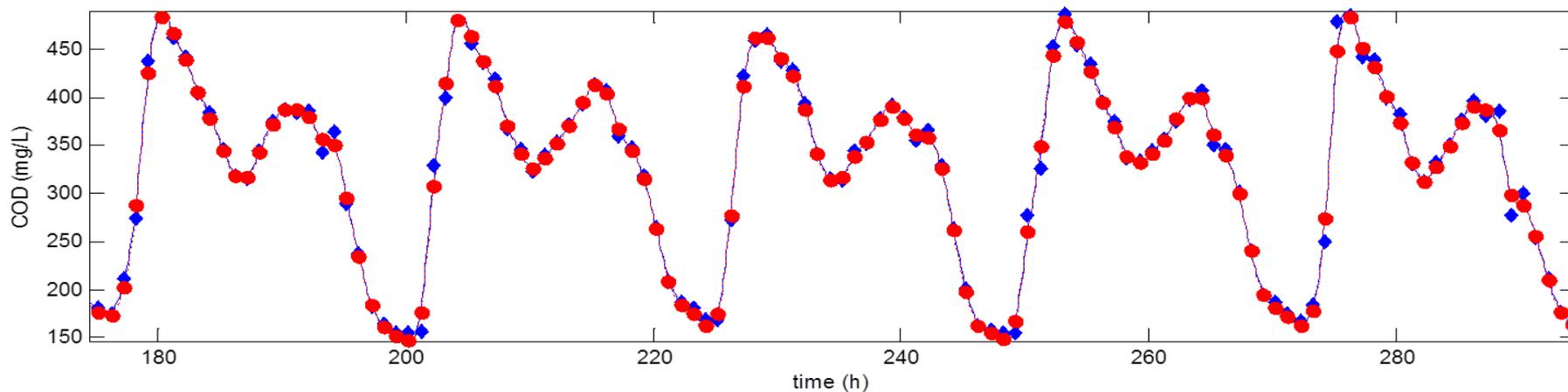
— filtered — estimated ◆ data ● reconstructed data

Calibration results for 1 h sampling, $c = 3$ $m = 2.2$: VAF = 99.30



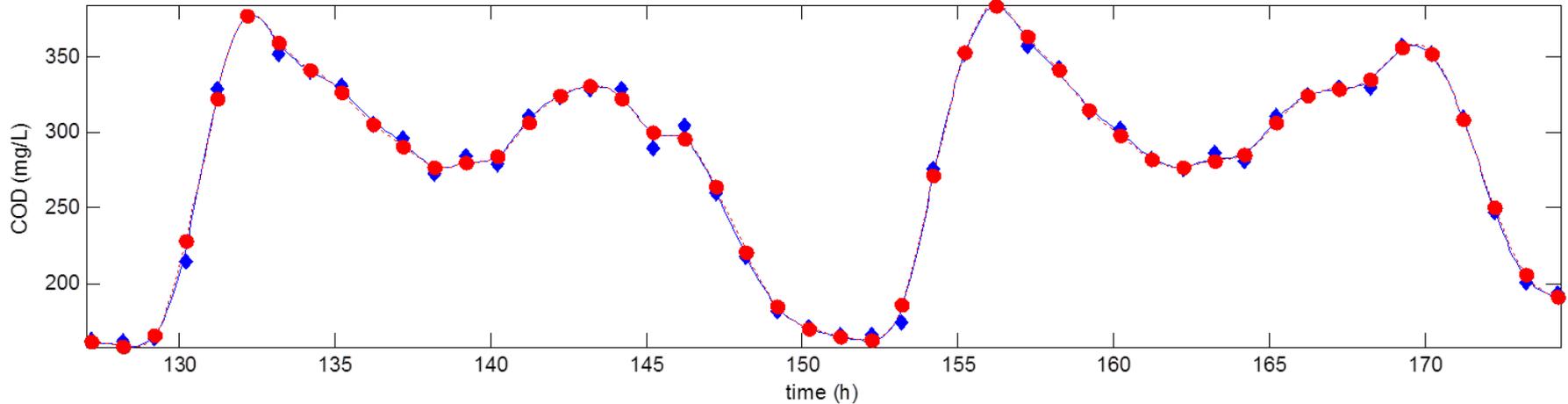
— filtered — estimated ◆ data ● reconstructed data

Validation results for 1 h sampling, $c = 3$ $m = 2.2$: VAF = 99.32

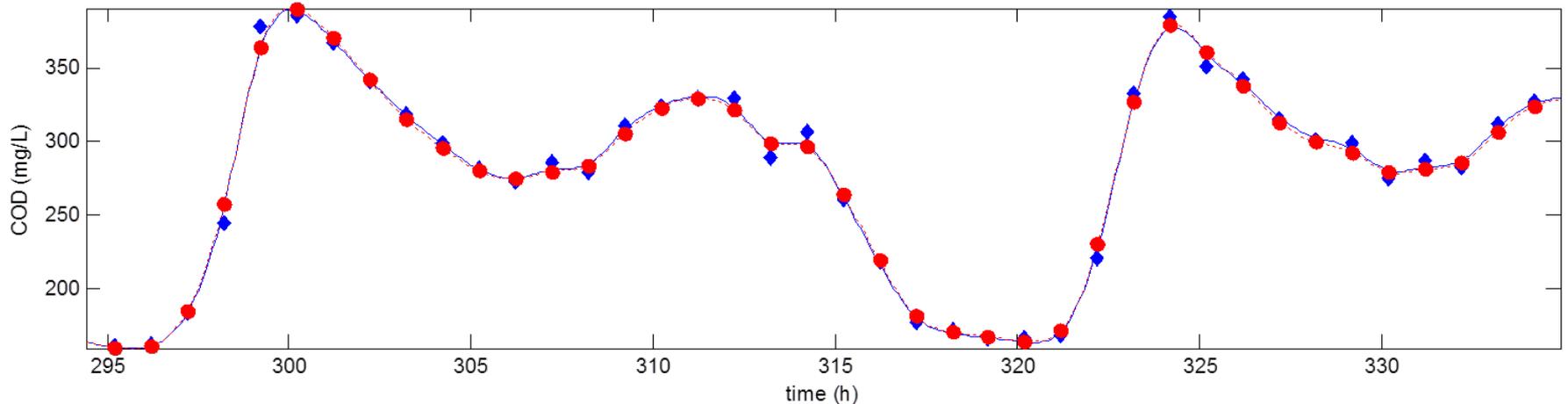


Calibrazione/Validazione per il weekend

— filtered - - - - - estimated ◆ data ● reconstructed data
Calibration results for 1 h sampling, $c = 3$ $m = 2$: VAF = 99.45

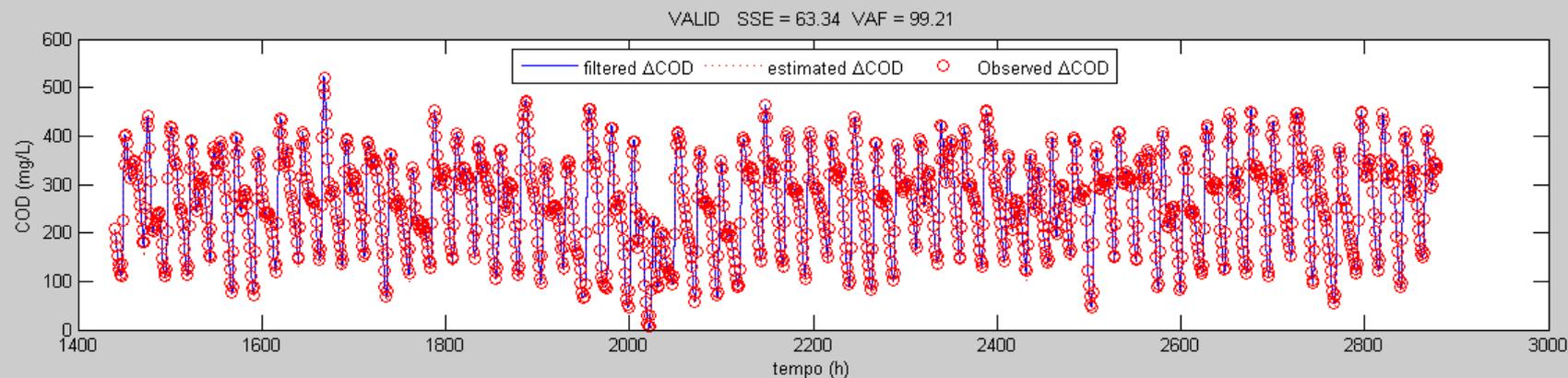
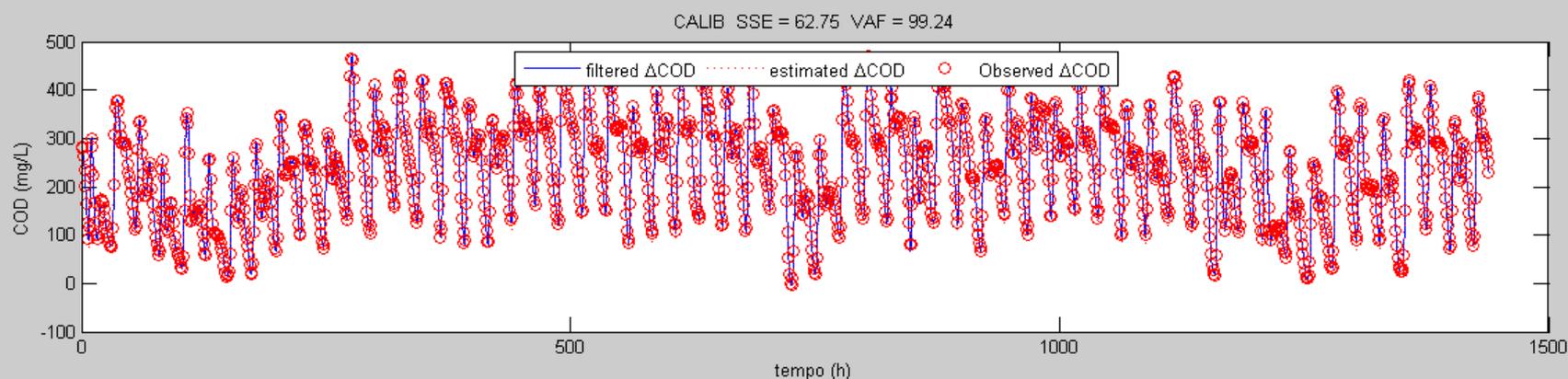


— filtered - - - - - estimated ◆ data ● reconstructed data
Validation results for 1 h sampling, $c = 3$ $m = 2$: VAF = 99.29



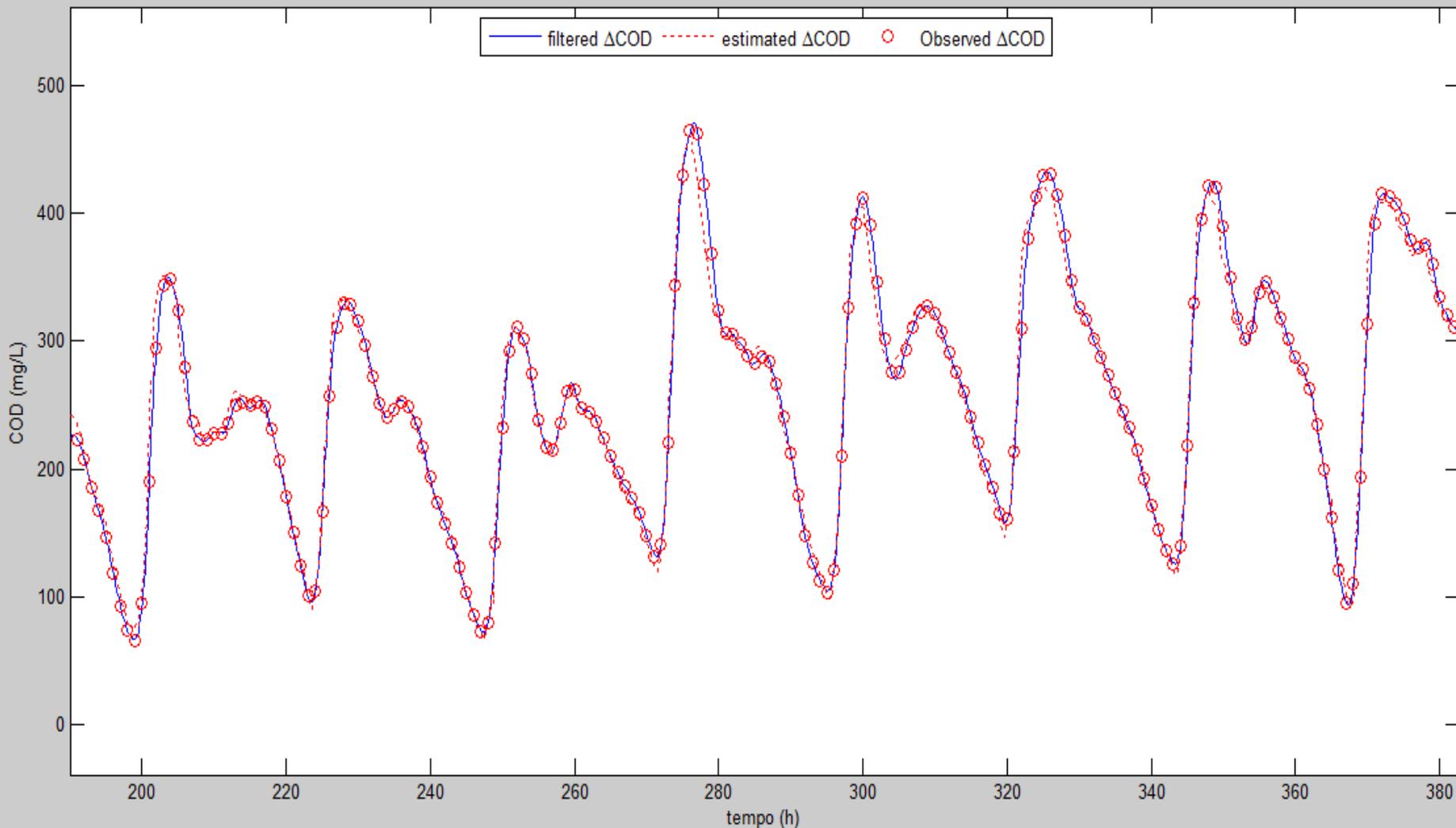
Verifica sul medio periodo (2 mesi)

Una volta calibrato e validato il Soft-Sensor è stato testato in simulazione sul lungo periodo utilizzando il file Benchmark di oltre un anno di dati



Zoom sul medio periodo (2 mesi)

CALIB SSE = 62.75 VAF = 99.24

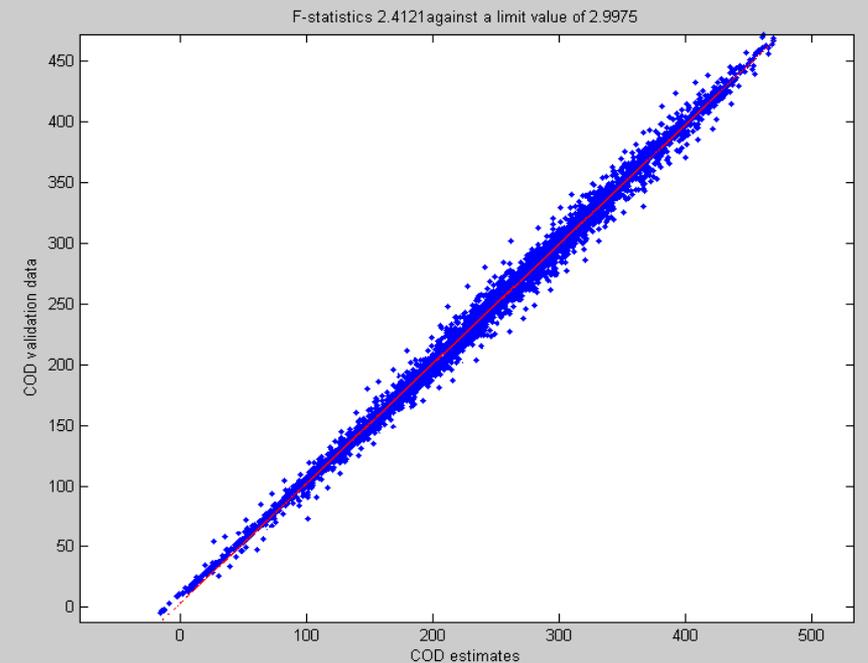
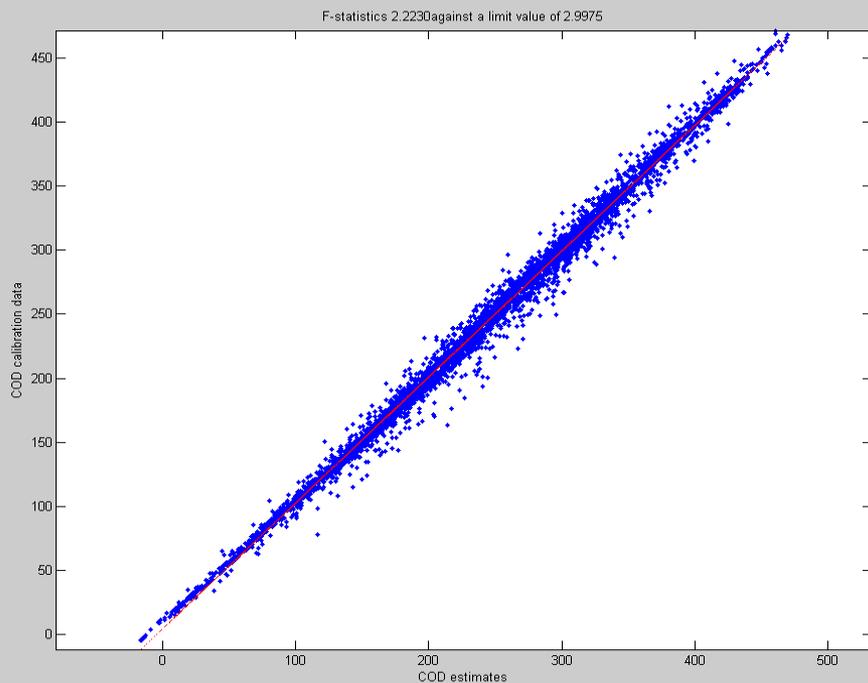


F-Test del modello sul medio periodo

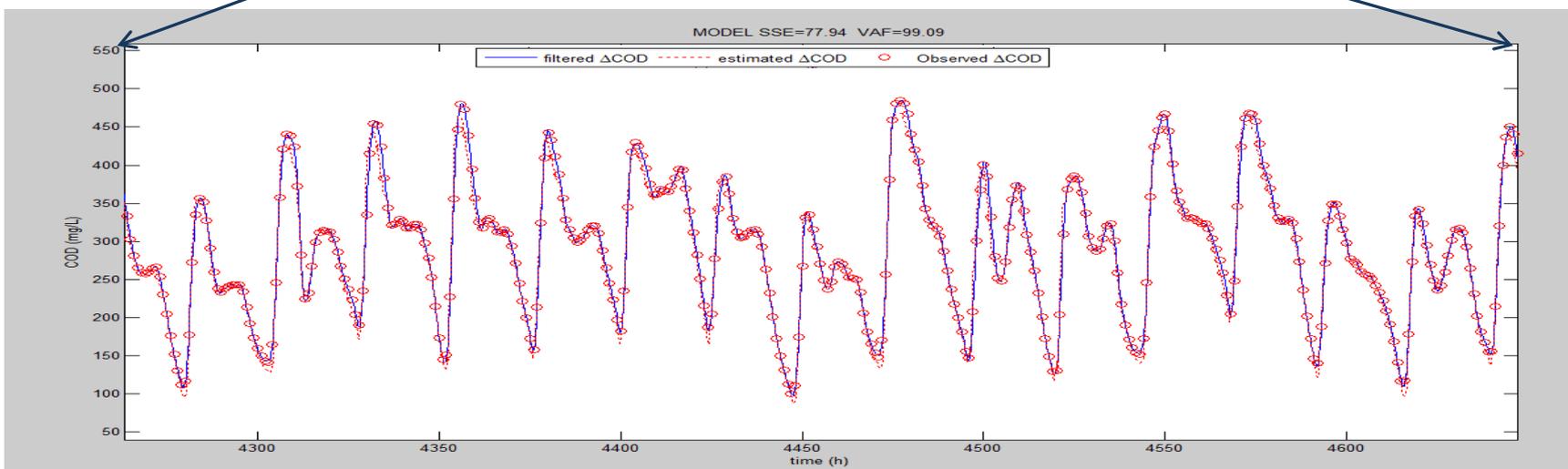
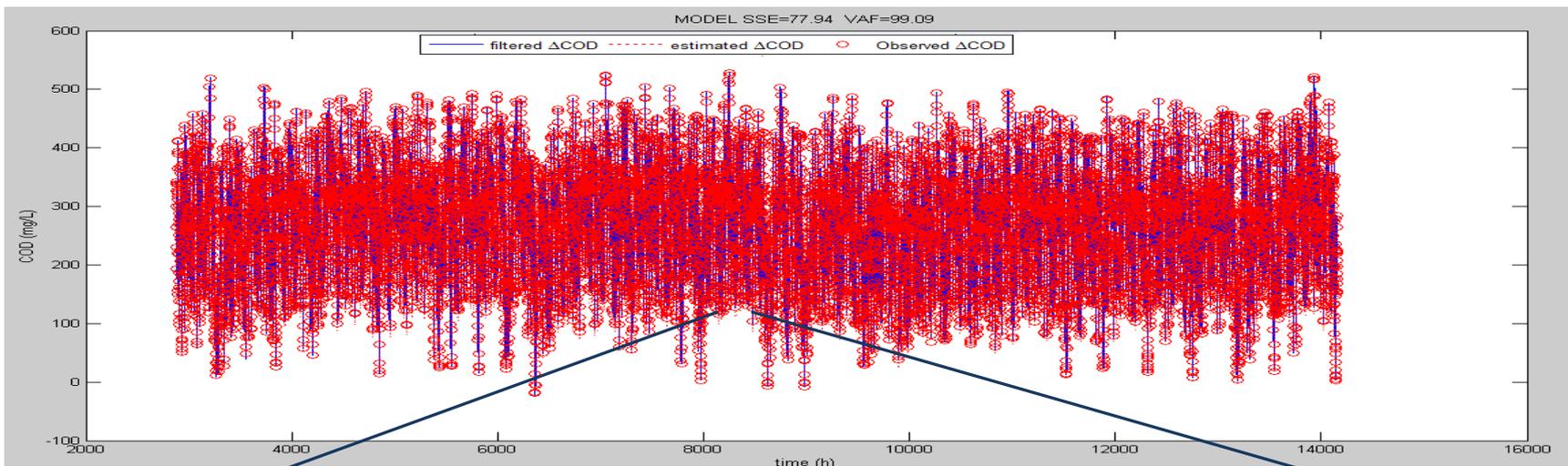
□ La statistica F fornisce risultati compatibili in entrambi i casi

Calibrazione: $F = 2.223 < 2.9975$

Validazione: $F = 2.242 < 2.9975$

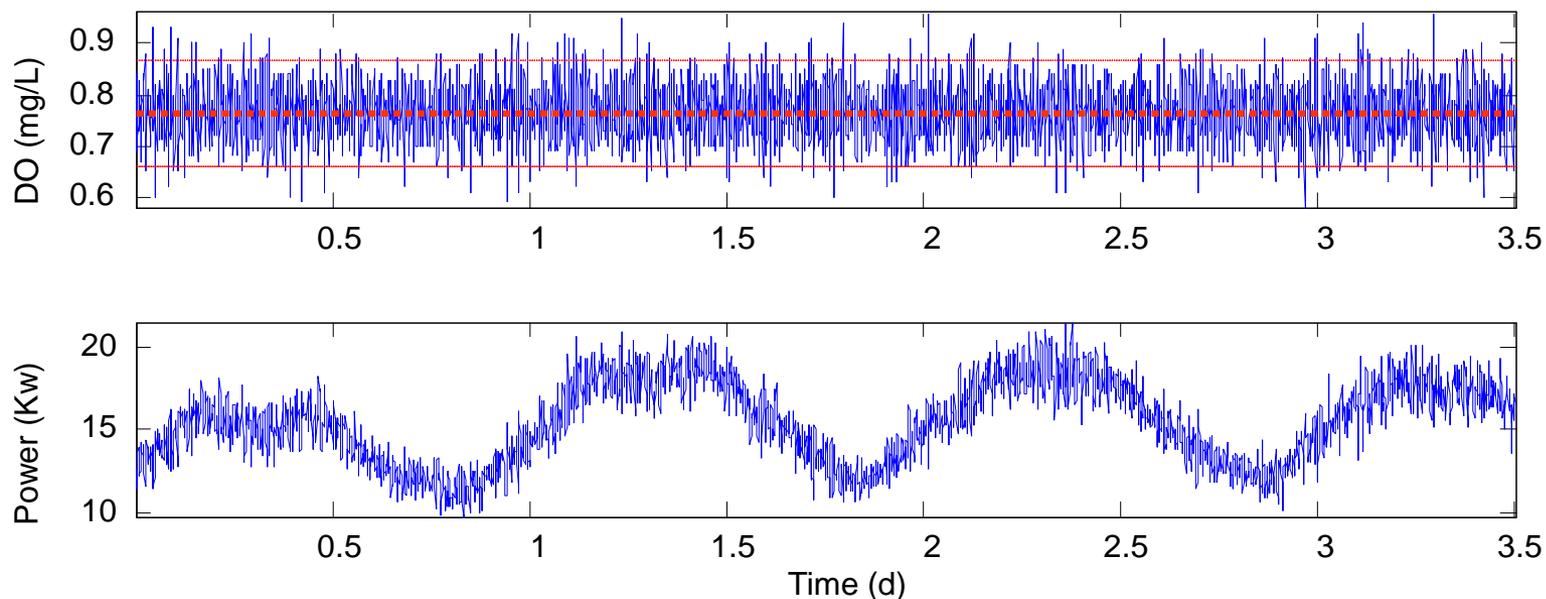


Verifica sul lungo periodo (470 giorni)



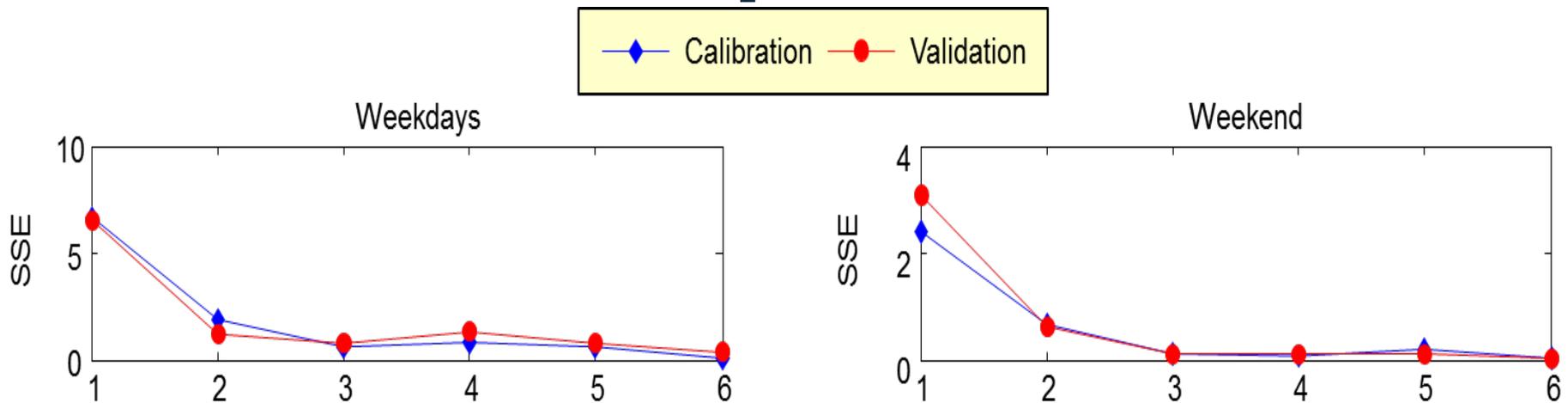
Test su dati reali

- ❑ Per un breve periodo il sistema è stato testato su un impianto che tratta reflui misti (civili/discariche) di media potenzialità (86000 AE)
- ❑ In regime di DO controllato il segnale di comando degli aeratori rivela l'andamento del COD abbattuto



Cosa serve per la sua realizzazione

- ❑ Loop di controllo per mantenere costante il livello dell'ossigeno disciolto
- ❑ Segnale proporzionale alla portata d'aria (ad es. potenza alle soffianti)
- ❑ Una serie di misure di COD in entrata ed in uscita abbastanza frequenti



Conclusioni

- ❑ Il Soft-Sensor proposto può fornire una stima affidabile del COD abbattuto;
- ❑ E' sufficiente che:
 - ❑ L'Ossigeno Disciolto venga mantenuto costante;
 - ❑ Sia accessibile un segnale proporzionale alla portata d'aria;
- ❑ Il Soft-Sensor è implementabile come modulo software;
- ❑ La sperimentazione sul lungo periodo conferma la robustezza del sistema;
- ❑ Si stanno migliorando le sue caratteristiche
 - ❑ Portabilità su impianti diversi;
 - ❑ Scorpo dell'ossigeno consumato nella nitrificazione.

Sviluppo di un soft-sensor per la stima del carico organico nei processi di depurazione biologica

S. Marsili Libelli
Università di Firenze