

# UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio  
Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica e Ambientale

## **Modelli matematici applicati a casi di studio di impianti di depurazione in scala pilota e in scala reale per la simulazione e la validazione dei sistemi di supporto alle decisioni**

**Relatore:**

***Ch.mo Prof. Ing. M. Fabbricino***

**Correlatori:**

***Ing. L. Luccarini***

***Ing. D. Pulcini***

**Candidato:**

***Di Cosmo Roberto***

**Matr. 324/262**

**Anno Accademico 2011/2012**

# **OBIETTIVI**

- Implementazione e calibrazione di un modello matematico di un impianto pilota e dell'impianto reale di Trebbo di Reno (BO) attraverso l'utilizzo dell'ambiente di calcolo West 2011 by DHI
- Simulazione per:
  - Analisi continua dei processi
  - Studio effetti sull'impianto di modifiche nelle condizioni operative
  - Implementazione e valutazione di diverse strategie di controllo



## **OTTIMIZZAZIONE EFFICIENZA DEPURATIVA**

**monitoraggio continuo dei processi**

**prevenzione dei malfunzionamenti**

**definizione dello stato di funzionamento ottimale**

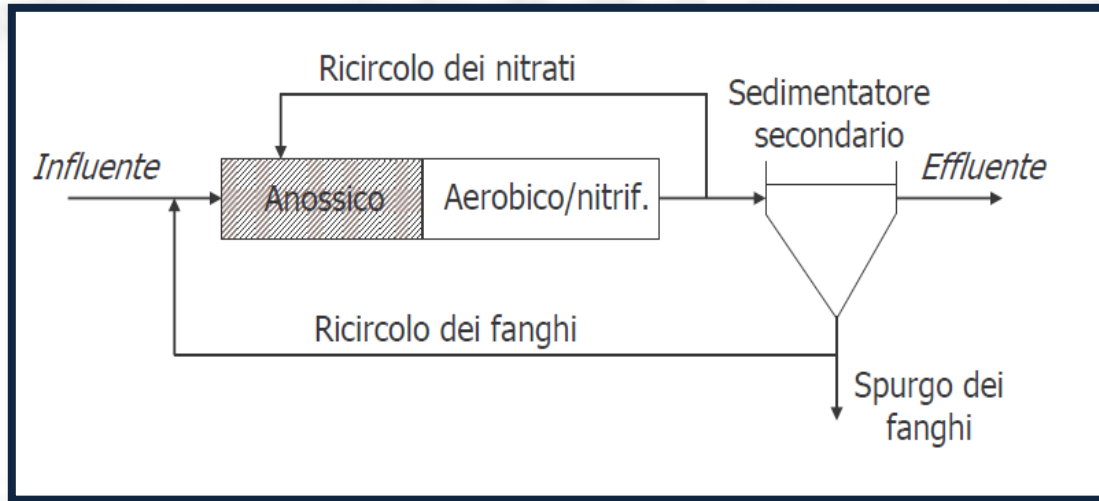
## **MINIMIZZAZIONE DEI COSTI**

**diminuzione consumi energetici**

**diminuzione costi gestionali**

# MODELLO PER IMPIANTO A FANGHI ATTIVI A FLUSSO CONTINUO

## SCHEMA PRE-DENITRO/NITRO *Ludzack-Ettinger*



- ✓ Vasca anossica (**ANOX**) per la denitrificazione
- ✓ Vasca aerobica (**OX-NIT**) per la rimozione della sostanza carboniosa e la nitrificazione.
- ✓ Sedimentatore
- ✓ Ricircolo dei fanghi dal sedimentatore
- ✓ Ricircolo interno della miscela areata

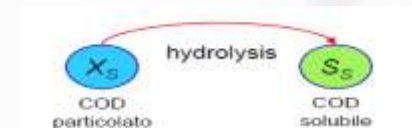
Il controllo di un sistema dinamico complesso è basato su modelli matematici che descrivono quantitativamente l'evoluzione dello stato del sistema stesso e ne predicono l'evoluzione a fronte di determinati stimoli in ingresso.

## MODELLI DINAMICI

### (ASM1 –ACTIVATED SLUDGE MODEL N°1)

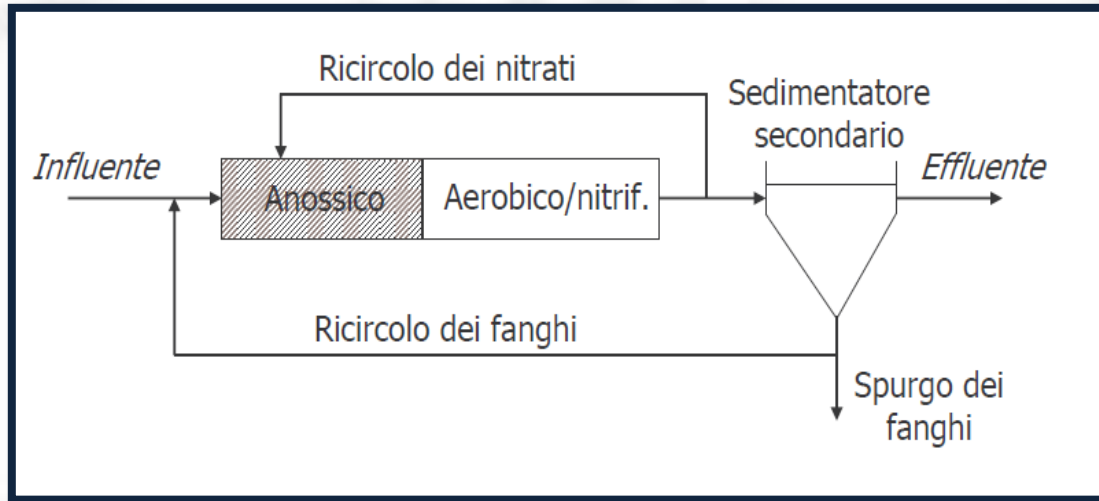
- Cinetiche di Monod bi-substrato
- Suddivisione del COD: *Rapidamente biodegradabile* - *Lentamente biodegradabile*
- Ciclo batterico basato sulla *Death-Regeneration*

$$\rho_1 = \mu_H \left( \frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left( \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) X_{BH}$$



# MODELLO PER IMPIANTO A FANGHI ATTIVI A FLUSSO CONTINUO

## SCHEMA PRE-DENITRO/NITRO *Ludzack-Ettinger*



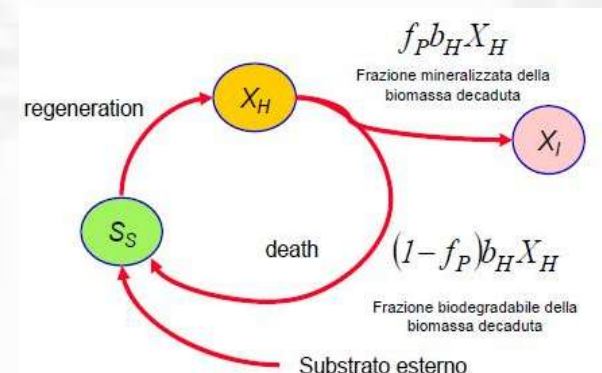
- ✓ Vasca anossica (**ANOX**) per la denitrificazione
- ✓ Vasca aerobica (**OX-NIT**) per la rimozione della sostanza carboniosa e la nitrificazione.
- ✓ Sedimentatore
- ✓ Ricircolo dei fanghi dal sedimentatore
- ✓ Ricircolo interno della miscela areata

Il controllo di un sistema dinamico complesso è basato su modelli matematici che descrivono quantitativamente l'evoluzione dello stato del sistema stesso e ne predicono l'evoluzione a fronte di determinati stimoli in ingresso.

## MODELLI DINAMICI

### (ASM1 –ACTIVATED SLUDGE MODEL N°1)

- Cinetiche di Monod bi-substrato
- Suddivisione del COD: *Rapidamente biodegradabile* - *Lentamente biodegradabile*
- Ciclo batterico basato sulla *Death-Regeneration*



## I PROCESSI NEL MODELLO

1. *Crescita aerobica eterotrofi*  $S_s + S_{NH} + S_o \rightarrow X_{BH}$
2. *Crescita anossica eterotrofi*  $S_s + S_{NO} + S_{NH} \rightarrow X_{BH}$
3. *Crescita autotrofi*  $S_{NH} + S_o \rightarrow X_{BA} + S_{NO}$
4. *Decadimento eterotrofi*  $X_{BH} \rightarrow X_P + X_s + X_{ND}$
5. *Decadimento autotrofi*  $X_{BA} \rightarrow X_P + X_s + X_{ND}$
6. *Ammonificazione*  $S_{ND} \rightarrow S_{NH}$
7. *Idrolisi del C. org.*  $X_s \rightarrow S_s$
8. *Idrolisi di N. org.*  $X_{ND} \rightarrow S_{ND}$



## I PROCESSI NEL MODELLO

1. *Crescita aerobica eterotrofi*

$$\rho_1 = \hat{\mu}_H \left( \frac{S_o}{K_{OH} + S_o} \right) \left( \frac{S_s}{K_s + S_s} \right) X_{BH}$$

2. *Crescita anossica eterotrofi*

$$\rho_2 = \hat{\mu}_H \eta_{HD} \left( \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_o} \right) \left( \frac{S_s}{K_s + S_s} \right) \left( \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) X_{BH}$$

3. *Crescita autotrofi*

$$\rho_3 = \hat{\mu}_A \left( \frac{S_o}{K_{OH} + S_o} \right) \left( \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) X_{BA}$$

4. *Decadimento eterotrofi*

$$\rho_4 = b_H X_{BH}$$

5. *Decadimento autotrofi*

$$\rho_5 = b_A X_{BA}$$

6. *Ammonificazione*

$$\rho_6 = k_a S_{ND} X_{BH}$$

7. *Idrolisi del C. org.*

$$\rho_7 = k_h \frac{X_s/X_{BH}}{K_X + (X_s/X_{BH})} \left\{ \frac{S_o}{K_{OH} + S_o} + \eta_h \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_o} \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right\} X_{BH}$$

8. *Idrolisi di N. org.*

$$\rho_8 = k_h \frac{X_{ND}/X_s}{K_X + (X_{ND}/X_s)} \left\{ \frac{S_o}{K_{OH} + S_o} + \eta_h \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_o} \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right\} X_{BH}$$

## **VARIABILI DI STATO**

### VARIABILI DI STATO DEL MODELLO ASM1

|                                                           |                       |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------|
| <b>COD solubile (<i>rapidamente biodegradabile</i>)</b>   | $S_S$                 |
| <b>COD particolato (<i>lentamente biodegradabile</i>)</b> | $X_S$                 |
| <b>COD della biomassa eterotrofa</b>                      | $X_{BH}$              |
| <b>COD della biomassa autotrofa</b>                       | $X_{BA}$              |
| <b>COD non biodegradabile solubile</b>                    | $S_I$                 |
| <b>COD non biodegradabile particolato</b>                 | $X_I \text{ \& } X_P$ |
| <b>Azoto ammoniacale</b>                                  | $S_{NH}$              |
| <b>Azoto ossidato (<i>nitroso/nitrico</i>)</b>            | $S_{NO}$              |
| <b>Azoto organico solubile</b>                            | $S_{ND}$              |
| <b>Azoto organico particolato</b>                         | $X_{ND}$              |
| <b>Ossigeno disciolto</b>                                 | $S_O$                 |
| <b>Alcalinità</b>                                         | $S_{ALK}$             |

# Parametri del modello ASM 1

| <i>Parametri stechiometrici</i>                                                         | <i>Simbolo</i> | <i>Unità</i>                       | <i>20°C</i> | <i>10°C</i> | <i>Letteratura</i> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------------------------------|-------------|-------------|--------------------|
| <i>Coeff. crescita specifica eterotrofi</i>                                             | $Y_H$          | gCODform./gCODox.                  | 0.67        | 0.67        | 0.38-0.75          |
| <i>Coeff. crescita specifica autotrofi</i>                                              | $Y_A$          | gCODform./gN <sub>ox</sub> .       | 0.24        | 0.24        | 0.07-0.28          |
| <i>Frazione di biomassa che produce particolato inerte</i>                              | $f_p$          | -                                  | 0.08        | 0.08        | -                  |
| <i>Mass N/mass COD in biomassa</i>                                                      | $i_{XB}$       | gN/gCOD in biomassa                | 0.086       | 0.086       | -                  |
| <i>Mass N/mass COD in prodotti inerti</i>                                               | $i_{XP}$       | gN/gCOD in endogenous mass         | 0.06        | 0.06        | -                  |
| <i>Parametri cinetici</i>                                                               | <i>Simbolo</i> | <i>Unità</i>                       | <i>20°C</i> | <i>10°C</i> | <i>Letteratura</i> |
| <i>Velocità massima di crescita specifica eterotrofi</i>                                | $\mu_H$        | giorno <sup>-1</sup>               | 6.0         | 3.0         | 0.6-13.2           |
| <i>Coeff. di decadimento eterotrofi</i>                                                 | $b_H$          | giorno <sup>-1</sup>               | 0.62        | 0.20        | 0.05-1.6           |
| <i>Coeff. di semisaturazione eterotrofi</i>                                             | $K_S$          | gCOD/m <sup>3</sup>                | 20          | 20          | 5-225              |
| <i>Coeff. di semisaturazione all'ossigeno per eterotrofi</i>                            | $K_{OH}$       | gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>    | 0.20        | 0.20        | 0.01-0.20          |
| <i>Coeff. Di semisaturazione al nitrato</i>                                             | $K_{NO}$       | gNO <sub>3</sub> -N/m <sup>3</sup> | 0.50        | 0.50        | 0.1-0.5            |
| <i>Velocità massima di crescita specifica autotrofi</i>                                 | $\mu_A$        | giorno <sup>-1</sup>               | 0.80        | 0.30        | 0.2-1.0            |
| <i>Coeff. di decadimento autotrofi</i>                                                  | $b_A$          | giorno <sup>-1</sup>               | 0.20        | 0.10        | 0.05-0.2           |
| <i>Coeff. di semisaturazione all'ossigeno per autotrofi</i>                             | $K_{OA}$       | gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>    | 0.4         | 0.4         | 0.4-2.0            |
| <i>Coeff. di semisaturazione all'ammoniaca per autotrofi</i>                            | $K_{NH}$       | gNH <sub>3</sub> -N/m <sup>3</sup> | 1.0         | 1.0         | -                  |
| <i>Fattore di correzione per la crescita anossica per eterotrofi</i>                    | $\eta_g$       | -                                  | 0.8         | 0.8         | 0.6-1.0            |
| <i>Tasso di ammonificazione</i>                                                         | $ka$           | m <sup>3</sup> /gCODgiorno         | 0.08        | 0.04        | -                  |
| <i>Velocità massima specifica di idrolisi</i>                                           | $kh$           | gSBCOD/gcellCODgiorno              | 3.0         | 1.0         | -                  |
| <i>Coeff. di semisaturazione per l'idrolisi del substrato lentamente biodegradabile</i> | $K_X$          | gSBCOD/gcellCOD                    | 0.03        | 0.01        | -                  |
| <i>Fattore di correzione per l'idrolisi anossica</i>                                    | $\eta_h$       | -                                  | 0.4         | 0.4         | -                  |



# Equazioni del modello e forma matriciale

Rateo di reazione  $r_i = \sum_j v_{ji} \cdot \rho_j$

Eq. di continuità  $0 = \sum_i v_{ji} \cdot i_{ci}$

| $j \downarrow i \rightarrow$ | $S_s$            | $X_s$   | $X_{BH}$ | $X_{BA}$ | $X_P$ | $S_o$                     | $S_{NO}$         | $S_{NH}$                  | $S_{ND}$ | $X_{ND}$              |          |
|------------------------------|------------------|---------|----------|----------|-------|---------------------------|------------------|---------------------------|----------|-----------------------|----------|
| Crescita aerobica eterotrofa | $-\frac{1}{Y_H}$ |         | 1        |          |       | $-\frac{1-Y_H}{Y_H}$      |                  | $-i_{XB}$                 |          |                       | $\rho_1$ |
| Crescita anossica eterotrofa | $-\frac{1}{Y_H}$ |         | 1        |          |       | $-\frac{1-Y_H}{2.86 Y_H}$ |                  | $-i_{XB}$                 |          |                       | $\rho_2$ |
| Crescita aerobica autotrofa  |                  |         |          |          |       | $-\frac{4.57-Y_A}{Y_A}$   | $-\frac{1}{Y_A}$ | $-i_{XB} - \frac{1}{Y_A}$ |          |                       | $\rho_3$ |
| Decadim. eterotrofo          |                  | $1-f_P$ | -1       |          | $f_P$ |                           |                  |                           |          | $i_{XB} - f_P i_{XP}$ | $\rho_4$ |
| Decadim. autotrofo           |                  | $1-f_P$ |          | -1       | $f_P$ |                           |                  |                           |          | $i_{XB} - f_P i_{XP}$ | $\rho_5$ |
| Ammonif.                     |                  |         |          |          |       |                           |                  | 1                         | -1       |                       | $\rho_6$ |
| Idrolisi Carb. org.          | 1                | -1      |          |          |       |                           |                  |                           |          |                       | $\rho_7$ |
| Idrolisi Azoto org.          |                  |         |          |          |       |                           |                  |                           | 1        | -1                    | $\rho_8$ |

**Ingresso – Uscita +/- Reazione = +/- Accumulo**

$$\frac{dS_s}{dt} = -\frac{\mu_H}{Y_H} \left( \frac{S_s}{K_S + S_s} \right) \left\{ \left( \frac{S_o}{K_{OH} + S_o} \right) + \eta_g \left( \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_o} \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right\} X_{BH} + k_h \frac{X_s/X_{BH}}{K_X + (X_s/X_{BH})} \left\{ \left( \frac{S_o}{K_{OH} + S_o} \right) + \eta_h \left( \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_o} \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right\} X_{BH}$$

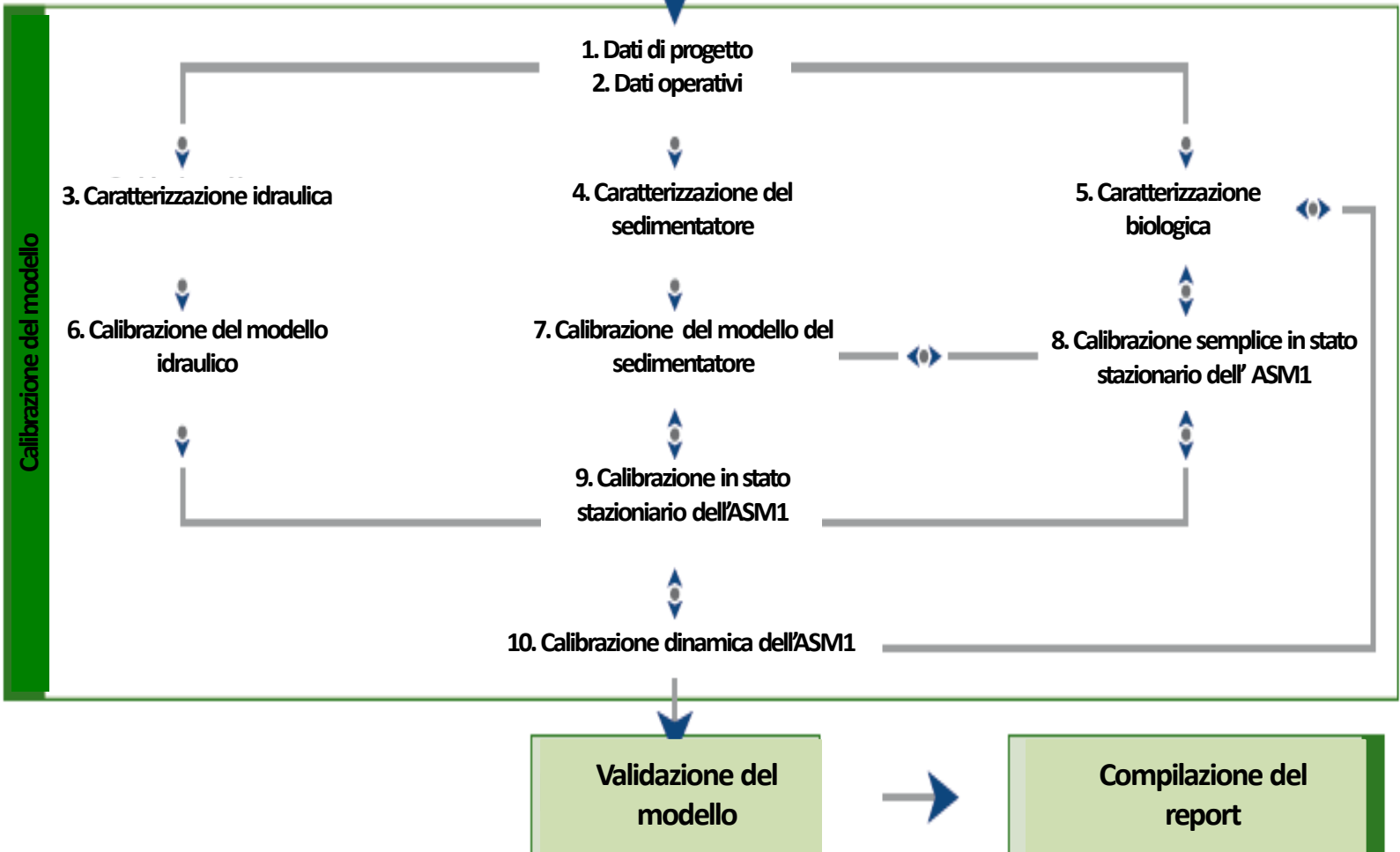
# **SCHEMA GENERALE PER L'IMPLEMENTAZIONE DELL'ASM1**

Definizione  
dell'obiettivo

Decisione sulle informazioni  
necessarie e sul livello di  
calibrazione

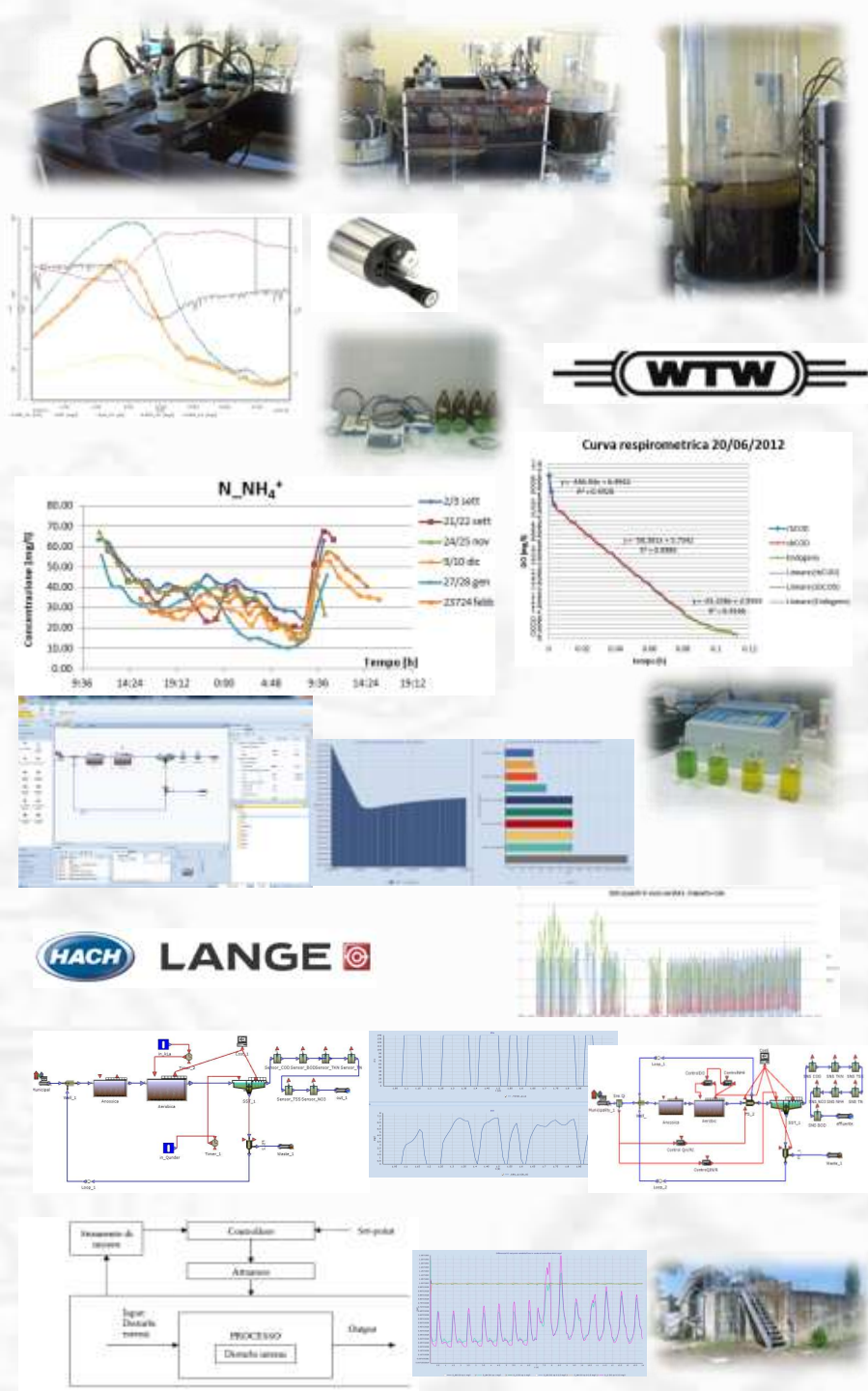
Implementazione  
del modello

Fasi tipiche in un progetto di  
modellazione

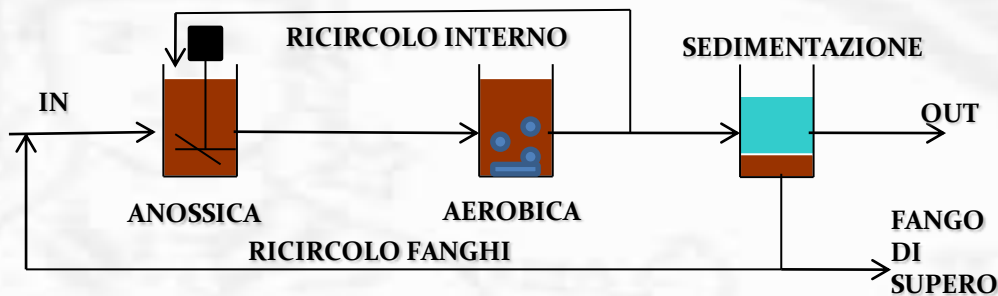


# FASI DEL LAVORO

- Avviamento e monitoraggio dell'impianto pilota
- Analisi dei trend evolutivi di pH, ORP, DO, N-NH<sub>4</sub> N-NO<sub>3</sub> e TSS nelle vasche
- Ricerca sul modello ASM 1 attraverso il controllo delle misure respirometriche già effettuate per le caratterizzazioni del refluo in ingresso del periodo 2010/2011, con le quali il modello è stato calibrato e validato.
- Implementazione, calibrazione e validazione del modello del pilota con WEST 2011<sup>®</sup>
- Monitoraggio segnali di DO, N-NH<sub>4</sub> e N-NO<sub>3</sub> in vasca di ossidazione dell'impianto reale
- Implementazione, calibrazione e validazione del modello del reale
- Simulazioni per valutazione di strategie di controllo



# IMPIANTO PILOTA



Sistema di  
pompaggio  
watson &  
Marlow



DT80



IQ SENSOR  
NET 184  
e2020 XT USB



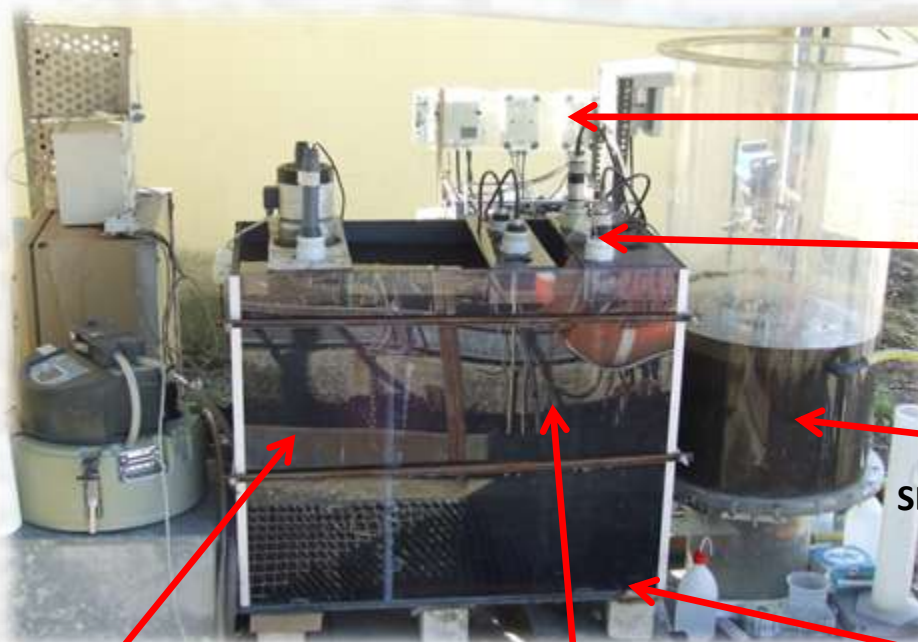
Sonde WTW



SEDIMENTATORE



SOFFIANTE



**VASCA DENITRIFICAZIONE**  
 $pH, ORP, N_{-}NH_4^+, N_{-}NO_3^-$

**VASCA NITRIFICAZIONE**  
 $pH, ORP, DO, SST, N_{-}NH_4^+, N_{-}NO_3^-$

| Caratteristiche | Vol. [l] |
|-----------------|----------|
| Vasca anossica  | 94,5     |
| Vasca aerobica  | 175,5    |
| Sedimen.        | 83       |

| Dati                                | Val.  | [ ] |
|-------------------------------------|-------|-----|
| Portata influente                   | 460   | l/d |
| Portata ricircolo fanghi            | 430   | l/d |
| Portata ricircolo interno           | 760   | l/d |
| Portata spurgo                      | 2-3   | l/d |
| Tempo di ritenzione idraulica (HRT) | 16    | h   |
| Età del fango ( $\theta$ )          | 20-30 | d   |



# IMPIANTO REALE



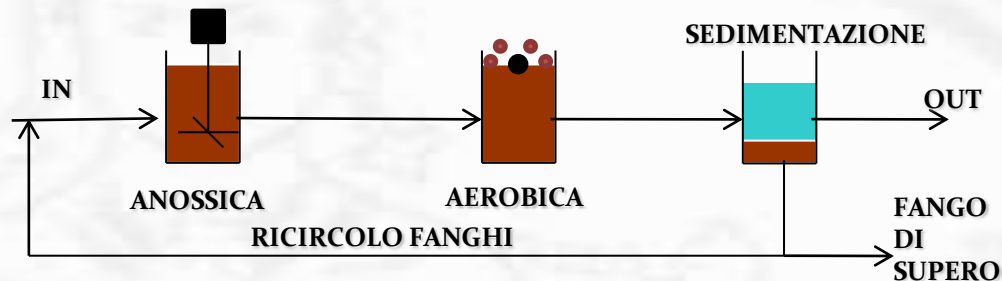
DSC 1000



Griglia a tamburo rotante



VASCA DI ARRIVO E POMPE



VASCA  
NITRIFICAZIONE  
 $DO, N\_NH_4^+, N\_NO_3^-$

VASCA  
DENITRIFICAZIONE

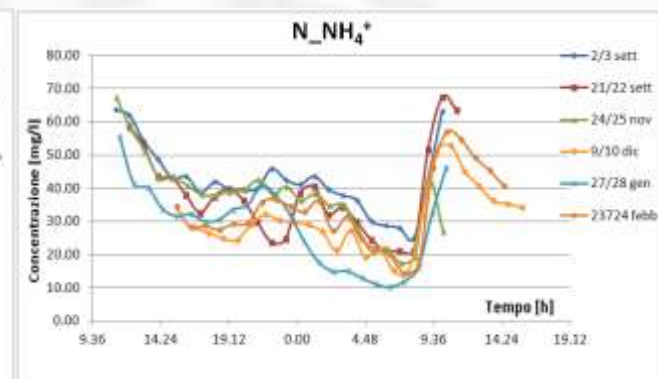
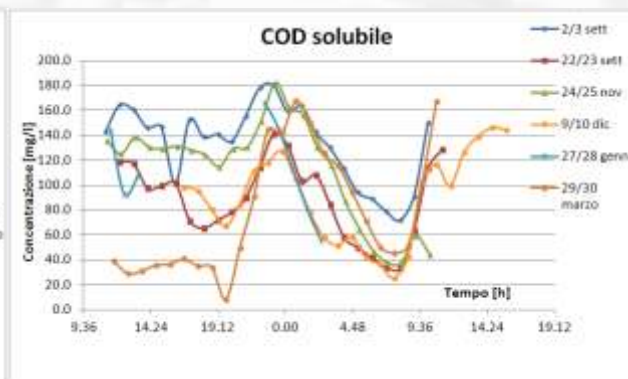
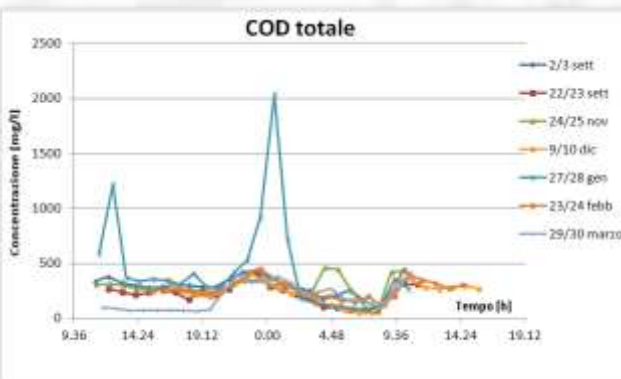


| Caratteristiche           | Valore | Unità             |
|---------------------------|--------|-------------------|
| Volume Vasca Anossica     | 108    | l                 |
| Volume Vasca Aerobica     | 734    | l                 |
| Area Sedimentatore        | 133    | cm <sup>2</sup>   |
| Altezza Sedimentatore     | 360    | cm                |
| Portata Influyente media  | 450    | m <sup>3</sup> /d |
| Portata Ricircolo Fanghi  | 450    | m <sup>3</sup> /d |
| Portata Ricircolo Interno | -      | m <sup>3</sup> /d |
| Portata Spurgo            | 5      | m <sup>3</sup> /d |
| Kla                       | 140    | d <sup>-1</sup>   |
| Temperatura               | 20     | °C                |

SEDIMENTATORE

# **CARATTERIZZAZIONE DEL REFLUO IN INGRESSO**

*Caratterizzazioni Settembre 2010 – Marzo 2011* COD totale e solubile, (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) (metodo Nessler), (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), (N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), (TKN) (metodo Kjeldahl)



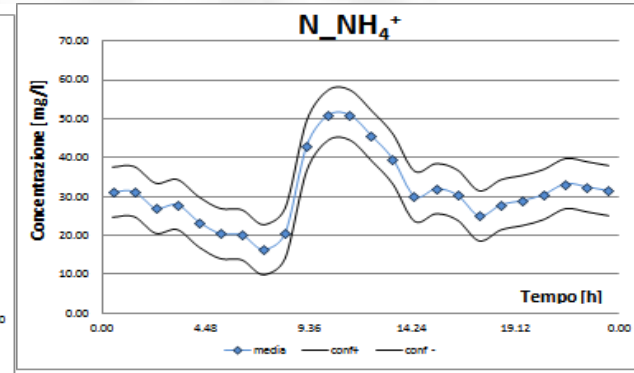
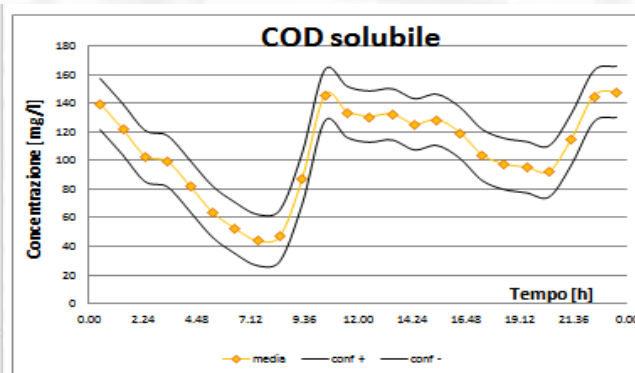
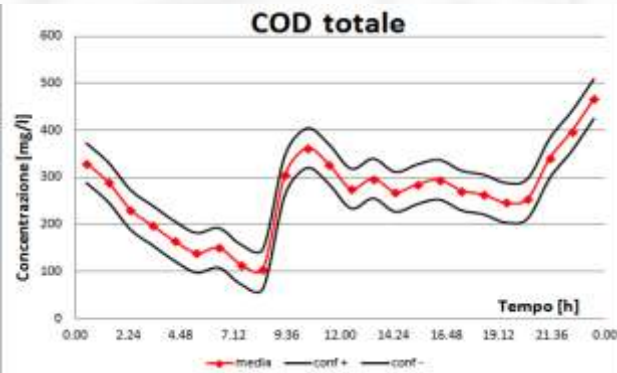
| DATA       | ORA   | TKN<br>[mg/l] | N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup><br>[mg/l] | COD <sub>TOT</sub><br>[mg/l] | COD <sub>S</sub><br>[mg/l] |
|------------|-------|---------------|------------------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 15/04/2010 | 12.30 | 61.25         | 43.02                                    | 487                          | 173.0                      |
| 21/07/2010 | 9.40  | 60.00         | 37.02                                    | 294                          | 63.7                       |
| 30/07/2010 | 11.00 |               | 42.91                                    |                              | 191.0                      |
| 26/08/2010 | 16.05 |               | 40.49                                    | 310                          | 191.0                      |
| 30/08/2010 | 15.24 | 37.33         | 31.82                                    | 361                          | 185.0                      |
| 01/09/2010 | 10.10 | 60.67         | 55.76                                    | 417                          | 196.0                      |
| 02/09/2010 | 11.00 | 56.00         | 51.53                                    | 409                          | 182.0                      |
| 13/09/2010 | 11.47 | 74.66         | 67.69                                    | 394                          | 202.0                      |
| 15/09/2010 | 14.43 | 51.33         | 46.29                                    | 256                          | 116.6                      |
| 21/09/2010 | 12.00 | 63.00         | 58.40                                    | 279                          | 134.0                      |
| 22/09/2010 | 11.55 | 60.66         | 56.10                                    | 296                          | 121.8                      |
| ....       |       |               |                                          |                              | 130.4                      |

Analisi spot influente  
Settembre 2010 - Marzo 2011



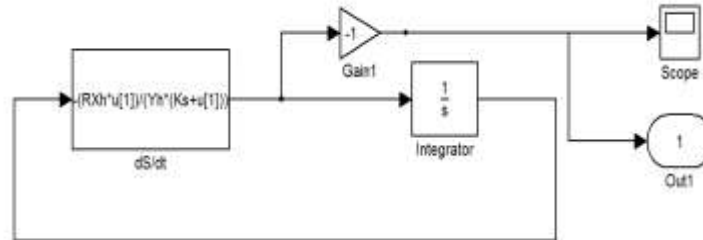
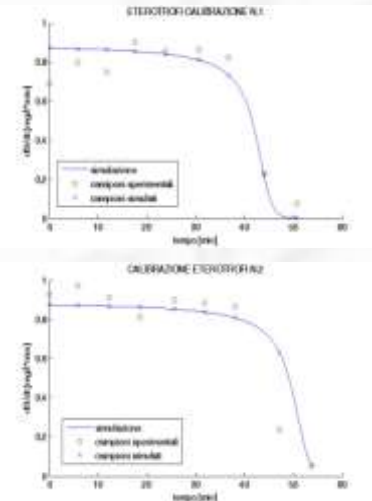
# CARATTERIZZAZIONE DEL REFLUO IN INGRESSO

Caratterizzazioni Settembre 2010 – Marzo 2011 COD totale e solubile, (N-NH<sub>4</sub>) (metodo Nessler), (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), (N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), (TKN) (metodo Kjeldahl)



## PROVE RESPIROMETRICHE – INDICI DI FRAZIONAMENTO -PARAMETRI CINETICI DI DEFAULT

Marzo 2011



L' **OUR (Oxygen Uptake Rate)** è la misura della quantità di ossigeno utilizzata nell'unità di tempo e rappresenta una grandezza direttamente correlabile al consumo di substrato da parte della biomassa

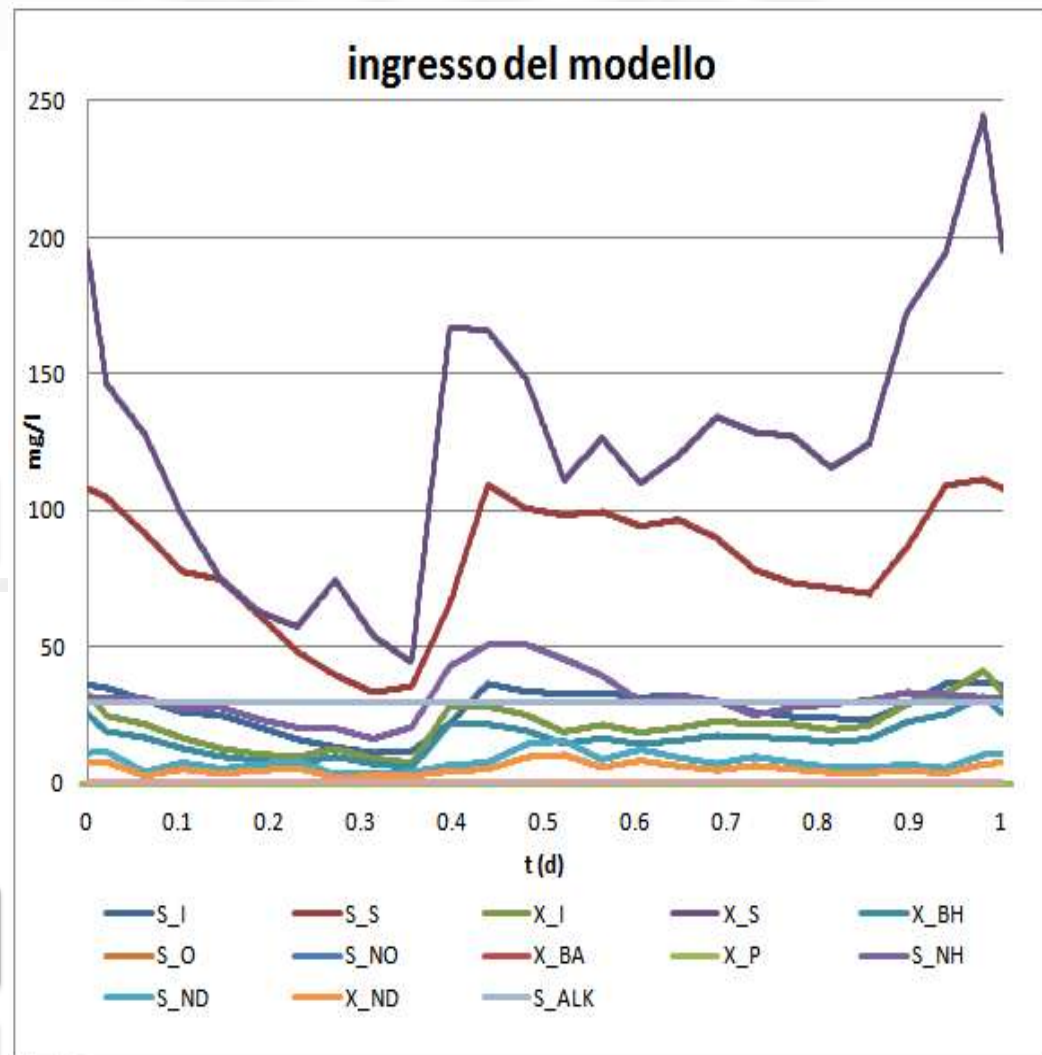
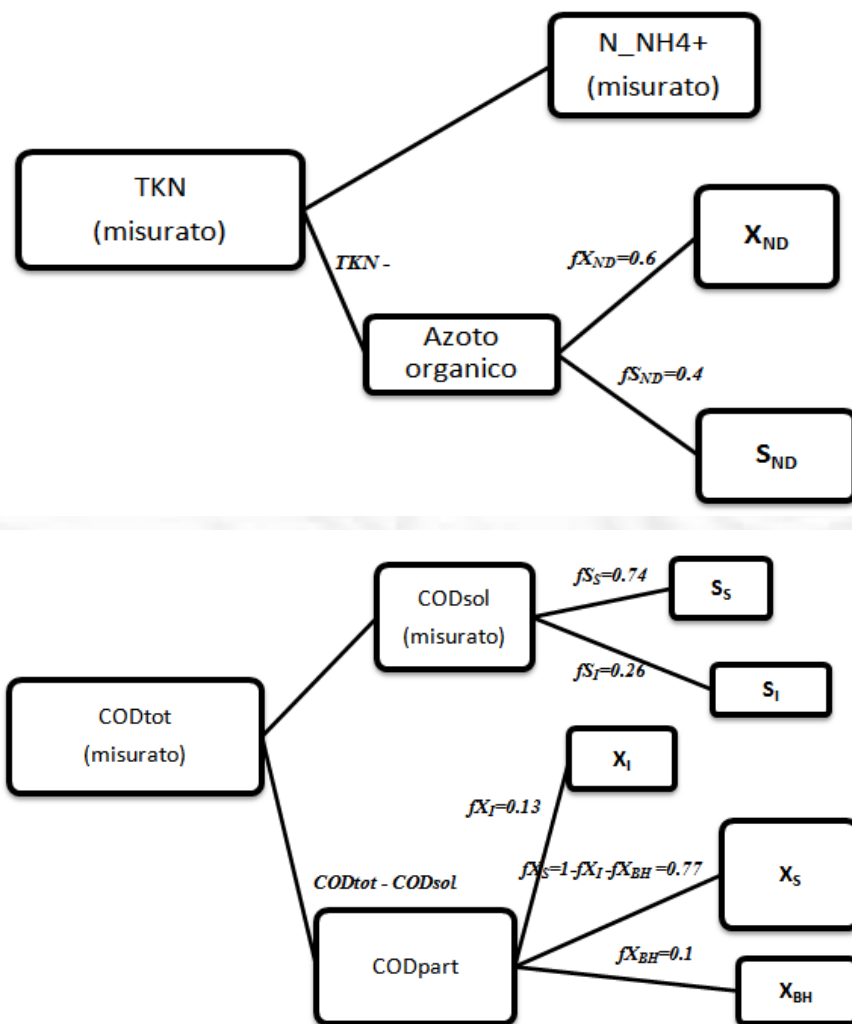
$$OUR(t) \cdot \frac{1}{(1 - Y_H)} = -\frac{\mu_H}{Y_H} \cdot \frac{S(t)}{K_S + S(t)} \cdot X_H(t) = P(t) \cdot \frac{S(t)}{K_S + S(t)}$$

$$OUR(t) \cdot \frac{1}{(4.57 - Y_A)} = -\frac{\mu_A}{Y_A} \cdot \frac{S_{NH}(t)}{K_{NH} + S_{NH}(t)} \cdot X_A(t)$$

$$\ln OUR(t) = \ln OUR(t_0) - b_H(t - t_0) \rightarrow b'_H = \frac{b_H}{1 - Y_H \cdot (1 - f_p)}$$

| Parametro                  | Valore prova 1<br>(20°C) | Valore prova 2<br>(20°C) | Valore di<br>letteratura<br>in WEST (20°C) |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------------|
| $\mu_H$ [d <sup>-1</sup> ] | 4.44                     | 6.03                     | 6                                          |
| $k_s$ [mgCOD/l]            | 0.95                     | 0.99                     | 20                                         |
| $b'_H$ [d <sup>-1</sup> ]  | 0.63                     | -                        | 0.62                                       |
| $\mu_A$ [d <sup>-1</sup> ] | 0.74                     | 0.80                     | 0.8                                        |
| $k_{NH}$ [mgN/l]           | 0.21                     | 0.41                     | 1                                          |

# CARATTERIZZAZIONE DEL REFLUO IN INGRESSO



Version 3.3  
 NAmgInComment  
 This file contains 1 week data for a typical municipal wastewater, for dry weather.  
 It is derived from the Influent File for dmd (http://www.benchmarkwp.org/), from day 119 to day 126.  
 NAmgInComment  
 NAmgInHeader  
 t S\_I S\_S X\_I X\_S X\_BH S\_O S\_NO X\_BA X\_P S\_NH S\_ND X\_ND S\_ALK S\_NH  
 d mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L  
 NAmgInHeader  
 0 31.00121 108.00373 12.9888 195.1932 25.378 0.001 0.001 0.001 0.001 11.23 11.013 7.142 30 0.476413575 7.11512 30 0.470170039  
 0.00094444 11.96313 107.8858 12.71271 195.750719 25.16347 0.001 0.001 0.001 0.001 11.1973 11.05247 7.142 30 0.476413575 7.11512 30 0.470170039  
 0.00138889 11.929 107.787 12.41621 192.120161 24.91093 0.001 0.001 0.001 0.001 11.1973 11.05247 7.142 30 0.476413575 7.11512 30 0.470170039  
 0.00208111 11.89288 107.67863 12.15962 190.48368 24.7384 0.001 0.001 0.001 0.001 11.1973 11.05247 7.142 30 0.476413575 7.11512 30 0.470170039  
 0.00277778 11.85675 107.57021 11.88364 188.847189 24.52581 0.001 0.001 0.001 0.001 11.1973 11.05247 7.142 30 0.476413575 7.11512 30 0.470170039  
 0.00347222 11.82063 107.46188 11.60733 187.210441 24.31313 0.001 0.001 0.001 0.001 11.1973 11.05247 7.142 30 0.476413575 7.11512 30 0.470170039  
 0.00416667 11.7845 107.3531 11.33104 185.57418 24.1006 0.001 0.001 0.001 0.001 11.1973 11.05247 7.142 30 0.476413575 7.11512 30 0.470170039  
 0.00486111 11.74838 107.24513 11.05473 183.937679 23.88827 0.001 0.001 0.001 0.001 11.1973 11.05247 7.142 30 0.476413575 7.11512 30 0.470170039  
 0.00555556 11.71225 107.13671 10.77843 182.301121 23.67573 0.001 0.001 0.001 0.001 11.1973 11.05247 7.142 30 0.476413575 7.11512 30 0.470170039

INDICI DI FRAZIONAMENTO

# MONITORAGGIO

## Prove single OUR

$$rbCOD = \frac{M_o}{1 - Y_{HET}} \frac{V_{SL} + V_{WW}}{V_{WW}}$$

$M_o$  è la massa di ossigeno consumata per litro,

$V_{SL}$  e  $V_{WW}$  il volume di fango attivo e il volume di refluo inoculato.

## Analisi BOD<sub>5</sub>

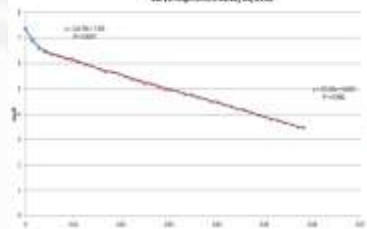
$$BOD = \frac{M(O_2)}{R T_m} \cdot \left( \frac{V_{TOT} - V_I}{V_I} + \frac{T_m}{T_0} \right) \cdot \Delta p(O_2)$$

OxiTop is6

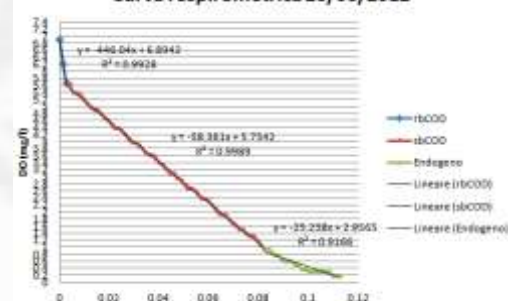
con inibizione dei batteri nitrificanti mediante ATU

## Analisi spettrofotometriche N-NH<sub>4</sub>

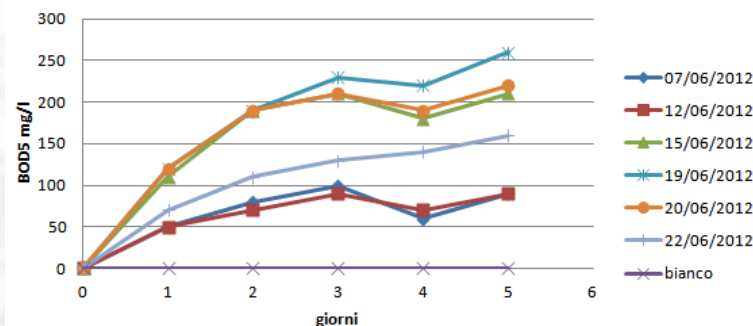
Curve respirometriche 12/06/2012



Curva respirometrica 20/06/2012

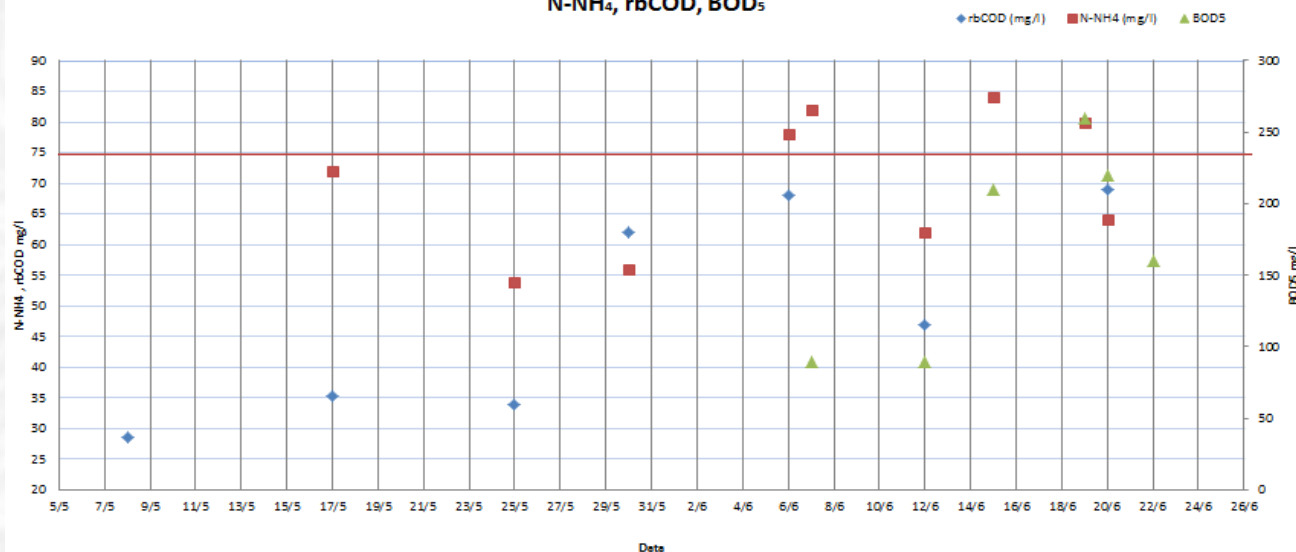


## BOD<sub>5</sub> influente Trebbo di Reno



## DR/2000

### N-NH<sub>4</sub>, rbCOD, BOD<sub>5</sub>

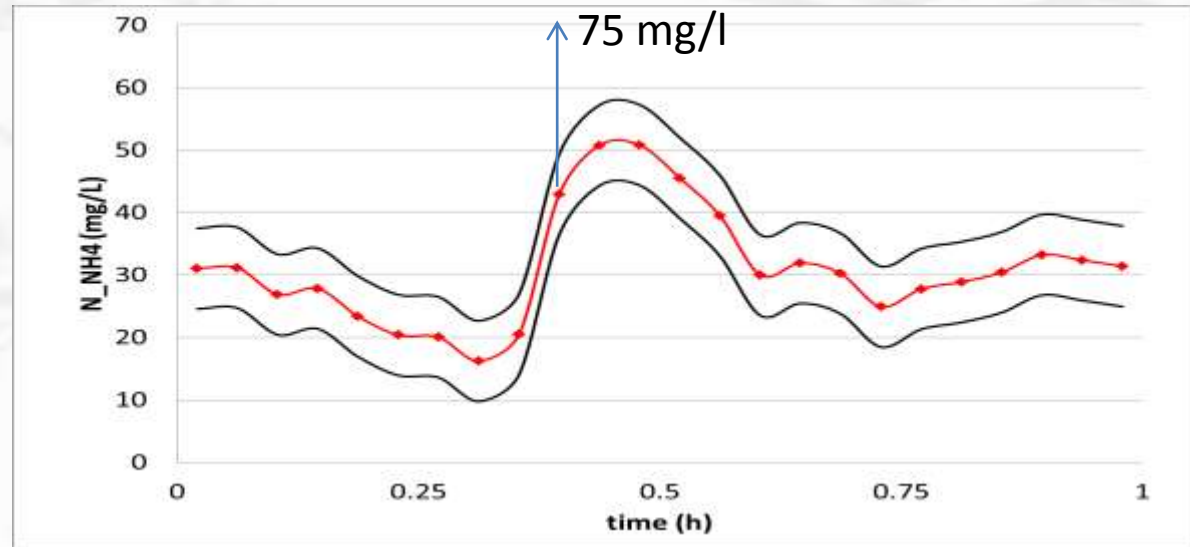


# MONITORAGGIO

Coefficiente di frazionamento  $f_{ss}$  pari a 0,74

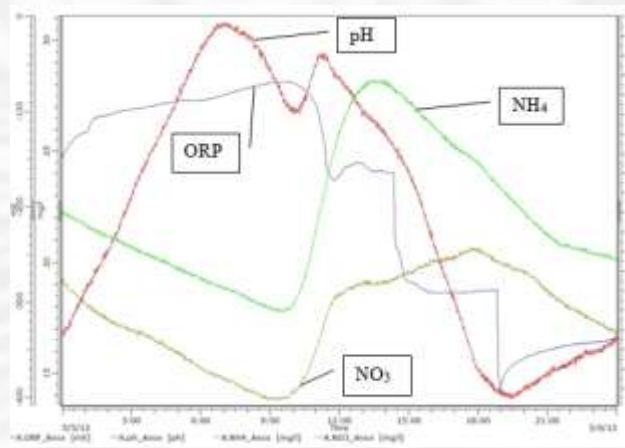
COD pressochè invariato

Incremento di Azoto ammoniacale

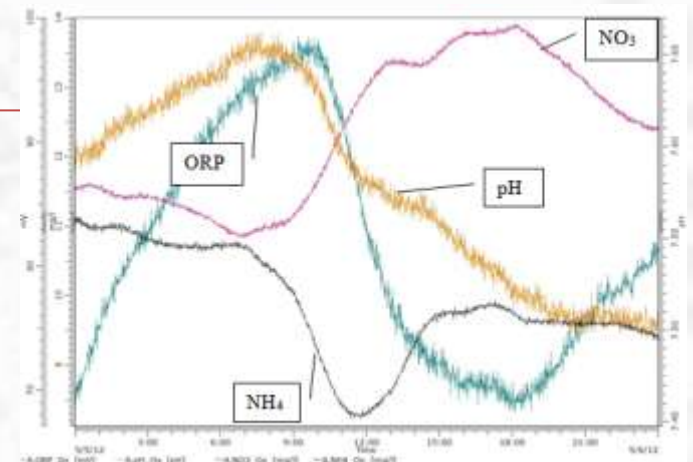


*Segnali diretti*

**Anossica**



**Aerobica**

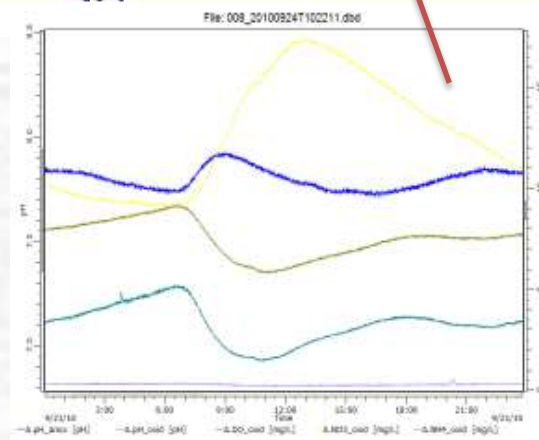
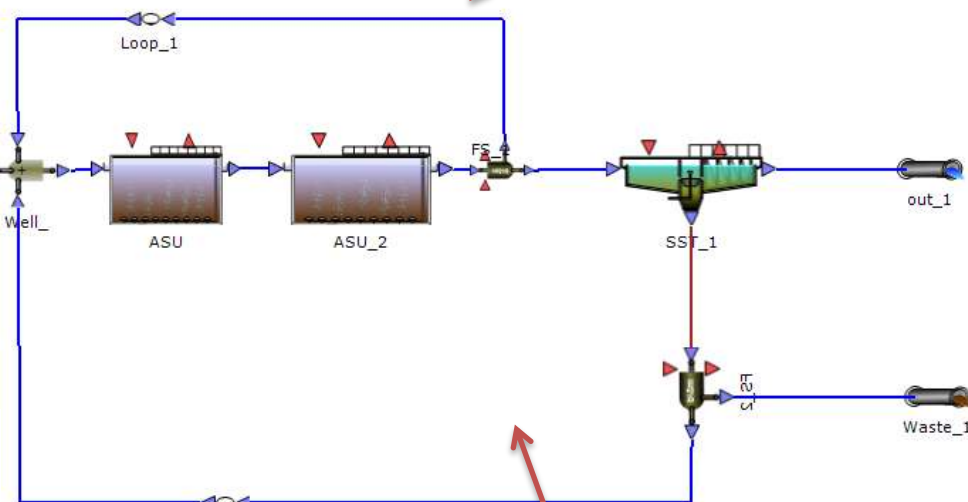
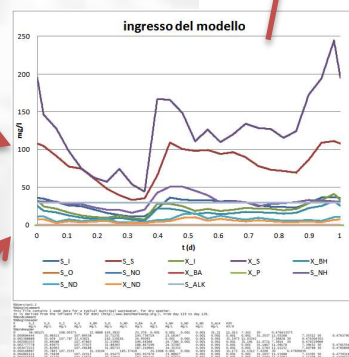
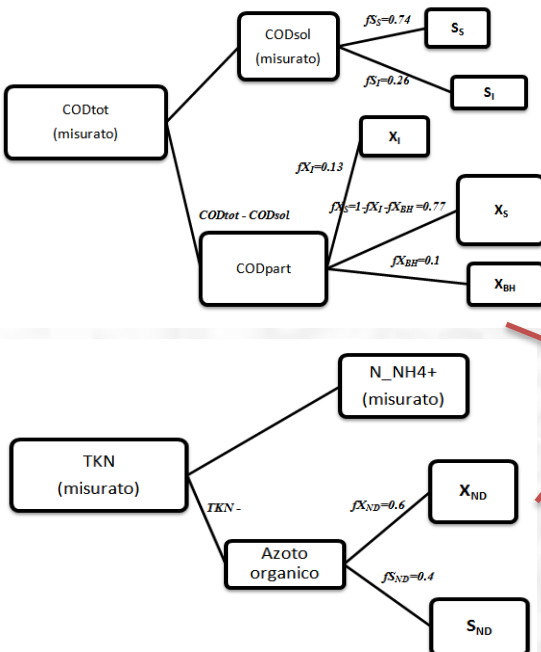
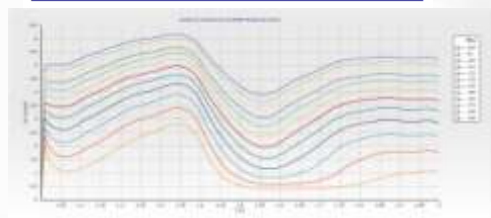




# IL MODELLO IMPLEMENTATO IN WEST 2011<sup>®</sup>

| Pilota                    | Valore | Unità           |
|---------------------------|--------|-----------------|
| Volume Vasca Anossica     | 94,5   | l               |
| Volume Vasca Aerobica     | 175,5  | l               |
| Area Sedimentatore        | 1963   | cm <sup>2</sup> |
| Altezza Sedimentatore     | 54     | cm              |
| Portata Influyente        | 460    | l/d             |
| Portata Ricircolo Fanghi  | 430    | l/d             |
| Portata Ricircolo Interno | 760    | l/d             |
| Portata Spurgo            | 3      | l/d             |
| Kla                       | 140    | d <sup>-1</sup> |
| Temperatura               | 20     | °C              |

| Parametro                  | Valore prova 1<br>(20°C) | Valore prova 2<br>(20°C) | Valore di letteratura<br>in WEST (20°C) |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|
| $\mu_H$ [d <sup>-1</sup> ] | 4.44                     | 6.03                     | 6                                       |
| $k_S$ [mgCOD/l]            | 0.95                     | 0.99                     | 20                                      |
| $b'_H$ [d <sup>-1</sup> ]  | 0.63                     | -                        | 0.62                                    |
| $\mu_A$ [d <sup>-1</sup> ] | 0.74                     | 0.80                     | 0.8                                     |
| $k_{NH}$ [mgN/l]           | 0.21                     | 0.41                     | 1                                       |





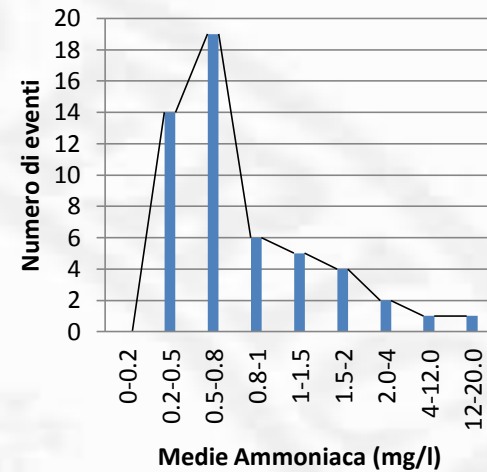
# Analisi di sensitività globale

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t, p); \quad x(t_0) = x_0; \quad y = g(x(t))$$

Campionamento LHS

Valutazione SRC dei parametri  
in 50 simulazioni MC

$R^2 < 0,7$  per N-NH<sub>4</sub> = elevata non linearità  
del modello

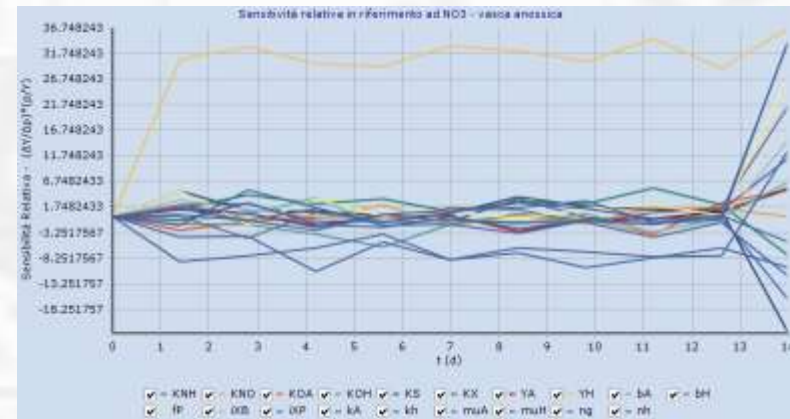
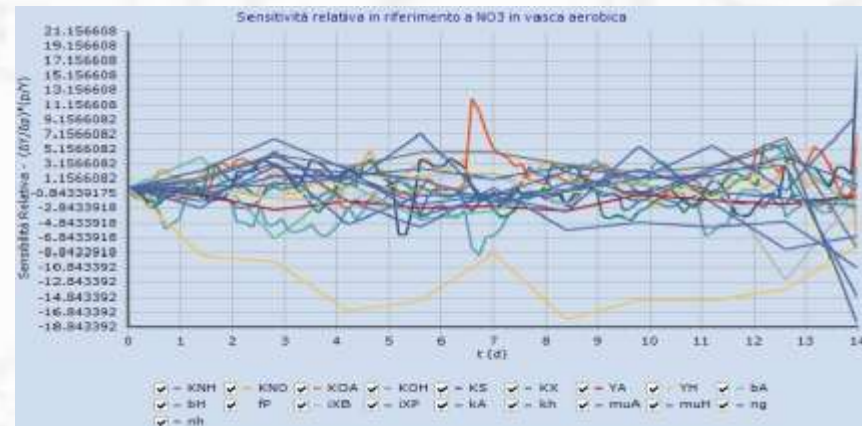


# Analisi di sensitività parametrica locale

Anossica

Aerobica

$$RSF = \frac{\Delta Y}{\Delta p} \times \frac{p}{Y}$$

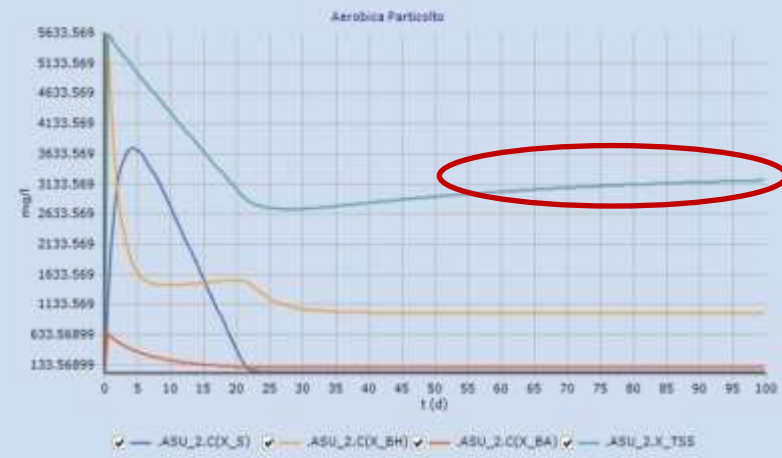
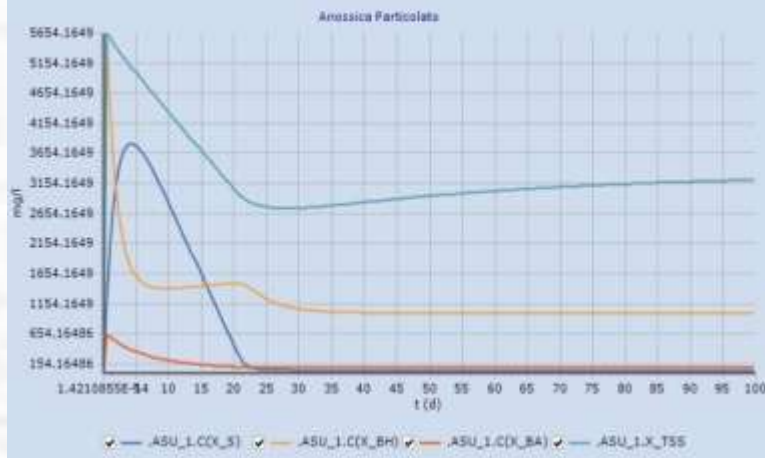
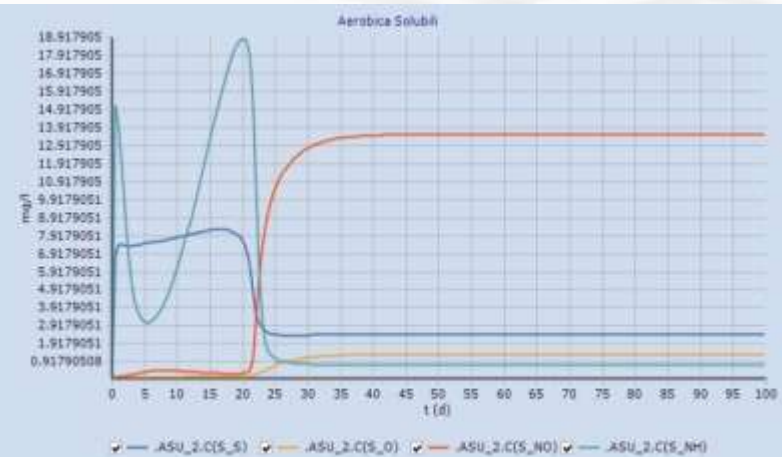
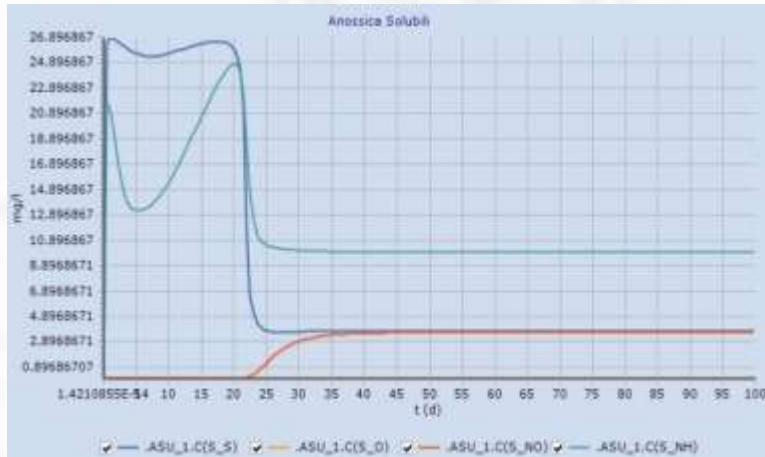


- K<sub>OH</sub>** Coeff. di semisaturazione all'ossigeno per eterotrofi
- η<sub>g</sub>** Fattore di correzione per la crescita anossica per eterotrofi
- i<sub>XP</sub>, i<sub>XB</sub>** Massa N/massa COD in prodotti inerti
- K<sub>a</sub>, K<sub>h</sub>** Tasso di ammonificazione

- K<sub>X</sub>** Coeff. di semisaturazione per l'idrolisi del substrato lentamente biodegradabile
- K<sub>NO</sub>** Coeff. Di semisaturazione al nitrato
- K<sub>h</sub>** Velocità massima specifica di idrolisi
- η<sub>h</sub>** Fattore di correzione per l'idrolisi anossica

# **CALIBRAZIONE IN STATO STAZIONARIO**

Regolare i parametri che condizionano il comportamento del modello a lungo termine, principalmente sulle concentrazioni dei solidi e delle popolazioni batteriche nelle vasche



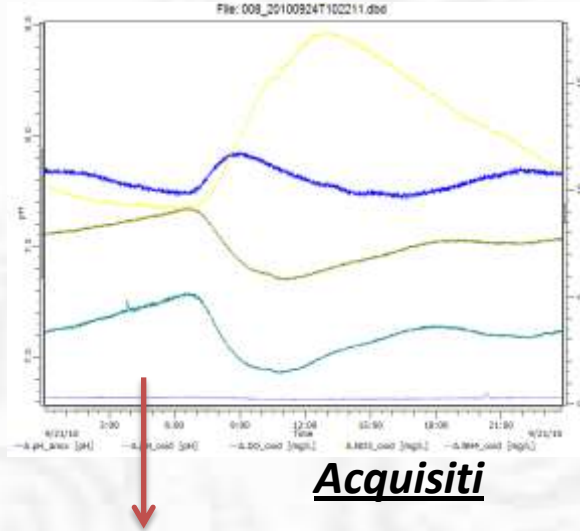
**BUONI RISULTATI CON I  
PARAMETRI INIZIALI**

# CALIBRAZIONE DINAMICA IN REGIME DI PORTATA STAZIONARIO

## VASCA AEROBICA Calibrazione sui valori di N-NO<sub>3</sub>

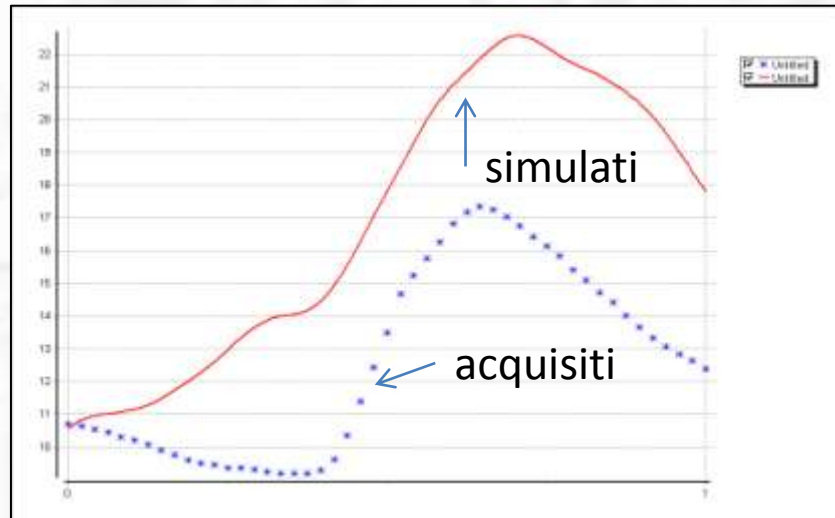
La calibrazione è stata eseguita sulla misura di concentrazione del nitrato in vasca aerobica e modificando i seguenti parametri nell'ordine riportato:

1.  $K_{OH}$
2.  $\eta_g$
3.  $i_{XP}$ ,  $i_{XB}$ ,  
 $K_a$ ,  $K_h$

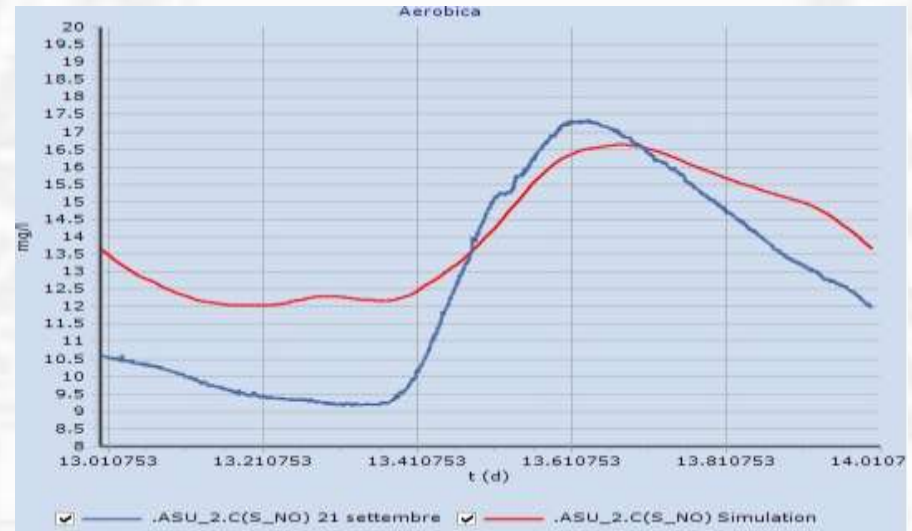


| Parametro | Valore iniziale | Valore calibrato | Intervallo di confidenza (95%) |
|-----------|-----------------|------------------|--------------------------------|
| $k_{OH}$  | 0.2             | 0.410            | +/- 5.82E-005                  |
| $\eta_g$  | 0.8             | 0.806            | +/- 1.087E-002                 |

| Parametro | Valori iniziali | Valore calibrato | Intervallo di confidenza (95%) |
|-----------|-----------------|------------------|--------------------------------|
| $i_{XB}$  | 0.086           | 0.108            | +/- 2.314E-005                 |
| $i_{XP}$  | 0.06            | 0.0001           | +/- 4.387E-008                 |
| $k_a$     | 0.08            | 0.04             | +/- 4.67E-006                  |
| $k_h$     | 3               | 2                | +/- 4.25E-004                  |



Pre- calibrazione



Post- calibrazione     DO

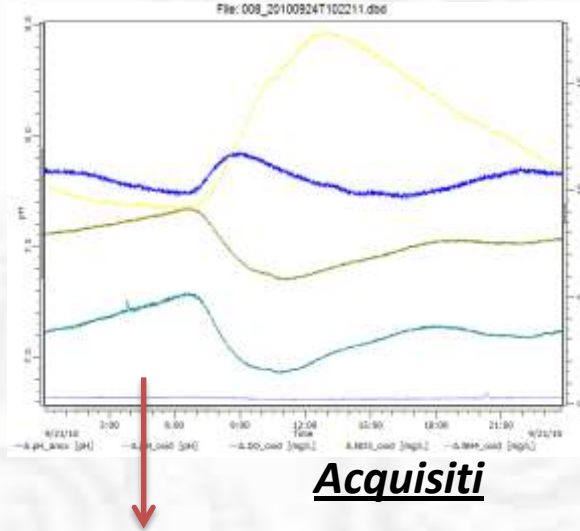


# CALIBRAZIONE DINAMICA IN REGIME DI PORTATA STAZIONARIO

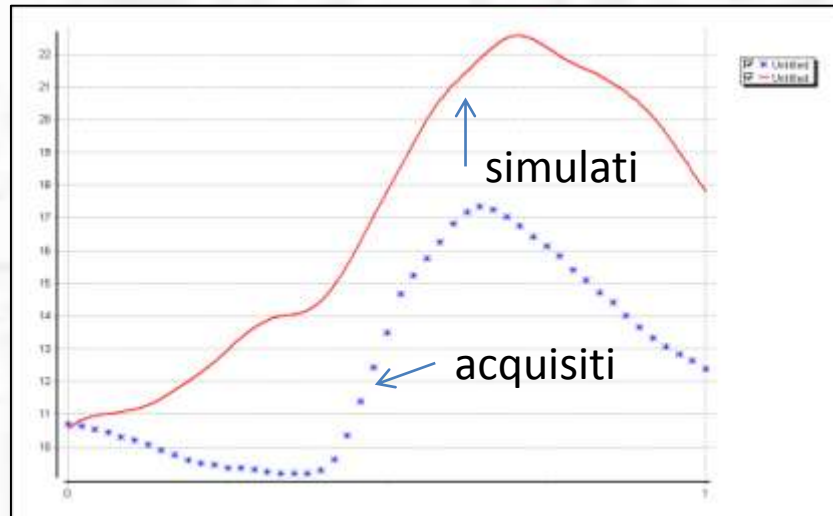
## VASCA AEROBICA Calibrazione sui valori di N-NO<sub>3</sub>

La calibrazione è stata eseguita sulla misura di concentrazione del nitrato in vasca aerobica e modificando i seguenti parametri nell'ordine riportato:

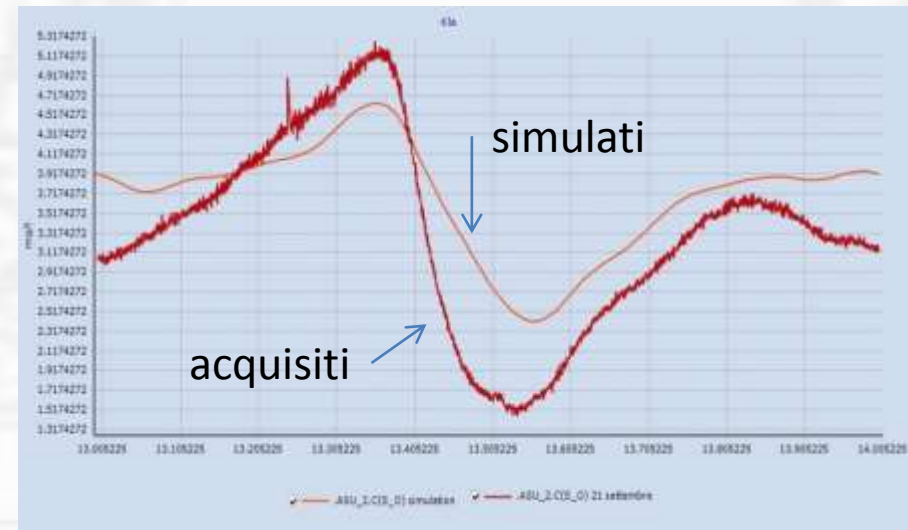
1.  $K_{OH}$
2.  $\eta g$
3.  $iXP$ ,  $iXB$ ,  
 $Ka$ ,  $Kh$



| Parametro | Valore iniziale | Valore calibrato | Intervallo di confidenza (95%) |
|-----------|-----------------|------------------|--------------------------------|
| $k_{OH}$  | 0.2             | 0.410            | +/- 5.82E-005                  |
| $\eta g$  | 0.8             | 0.806            | +/- 1.087E-002                 |
| Parametro | Valori iniziali | Valore calibrato | Intervallo di confidenza (95%) |
| $iXB$     | 0.086           | 0.108            | +/- 2.314E-005                 |
| $iXP$     | 0.06            | 0.0001           | +/- 4.387E-008                 |
| $ka$      | 0.08            | 0.04             | +/- 4.67E-006                  |
| $kh$      | 3               | 2                | +/- 4.25E-004                  |



Pre- calibrazione



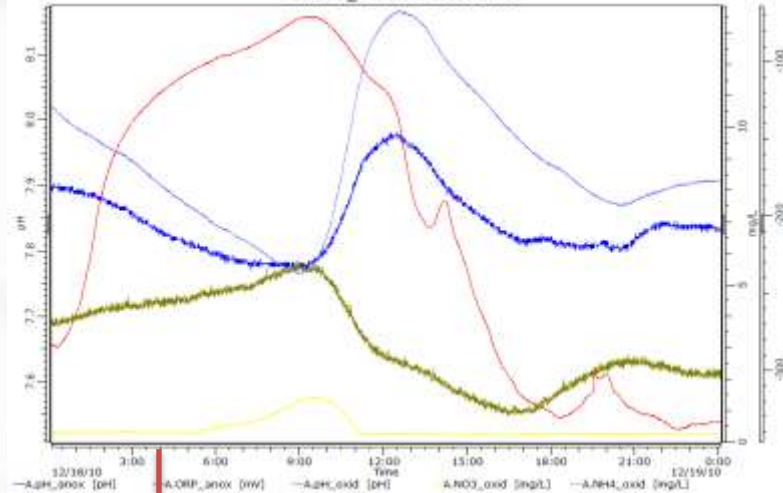
Post- calibrazione    DO



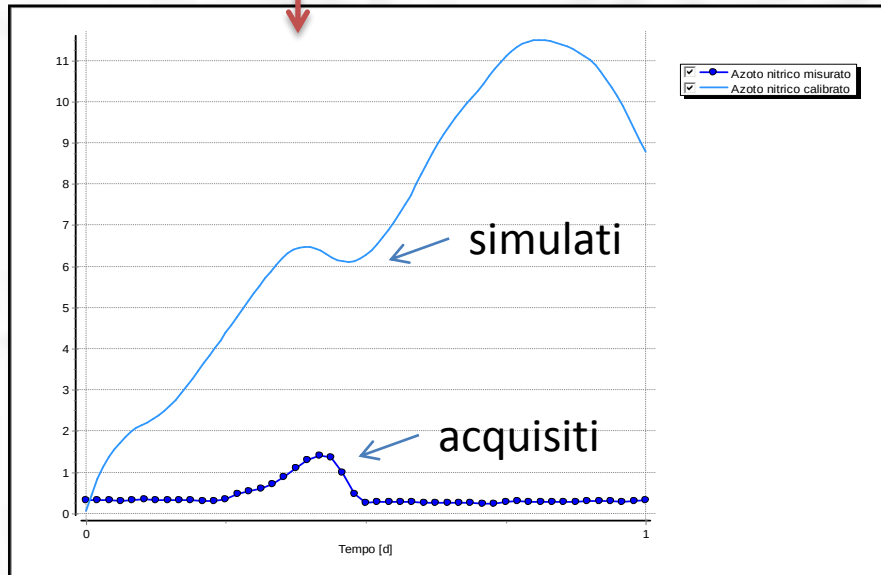
# CALIBRAZIONE DINAMICA IN REGIME DI PORTATA STAZIONARIO

## VASCA ANOSSICA Calibrazione sui valori di N-NO<sub>3</sub>

File: 013\_20101222T150952.dbd

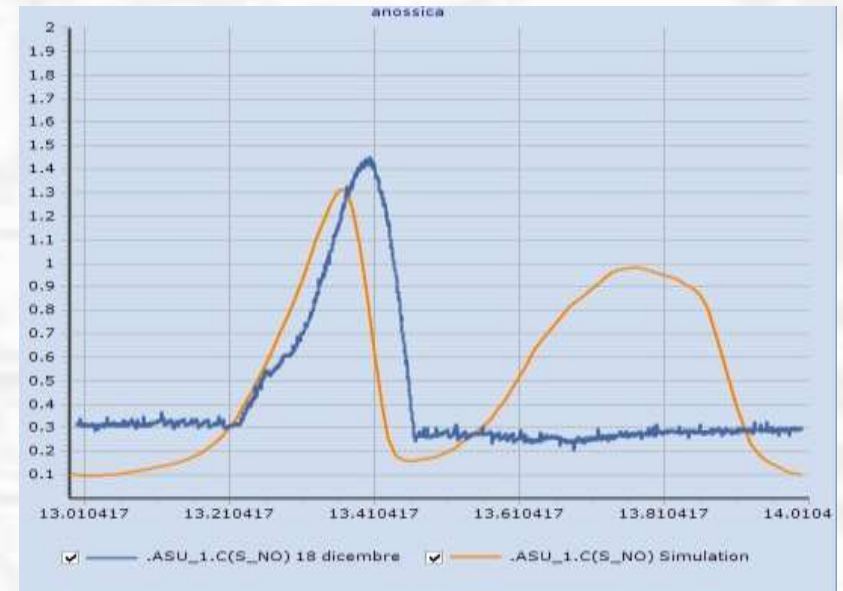


**Acquisiti**



**Pre- calibrazione**

| Parametro | Valori iniziali | Valore calibrato | Intervallo di confidenza (95%) |
|-----------|-----------------|------------------|--------------------------------|
| $K_X$     | 0.02            | 0.008            | +/- 3.381 E-007                |
| $K_{NO}$  | 0.5             | 0.2              | +/- 4.174 E-006                |
| $k_h$     | 2               | 5.79             | +/- 1.296 E-004                |
| $h_h$     | 0.4             | 0.85             | +/- 3.119 E-005                |

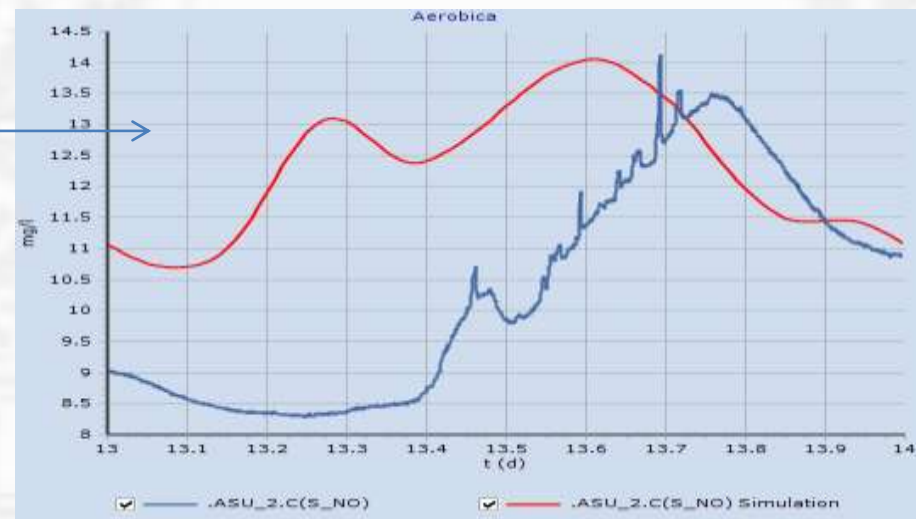
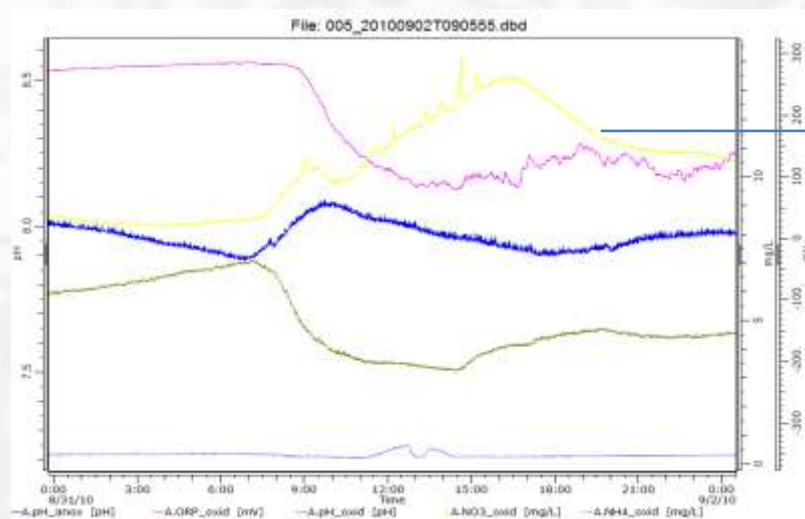
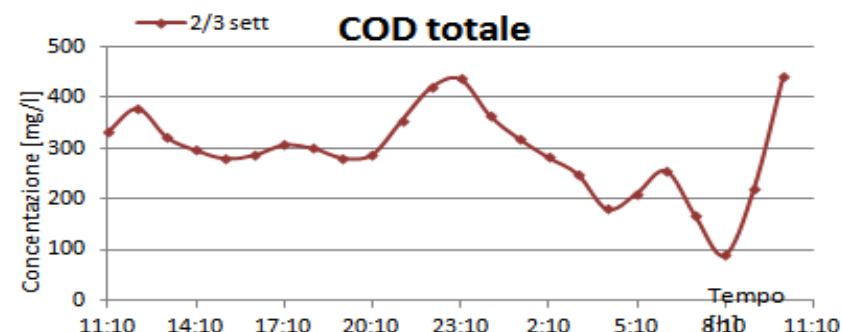
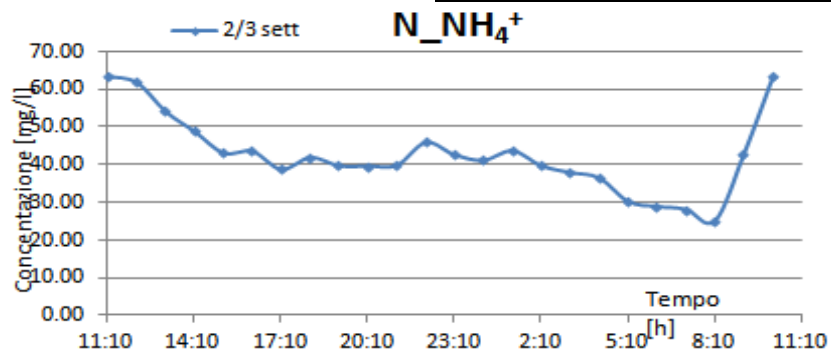


**Post- calibrazione**

# VALIDAZIONE



## 2° set di dati - Nuovo file di input al modello

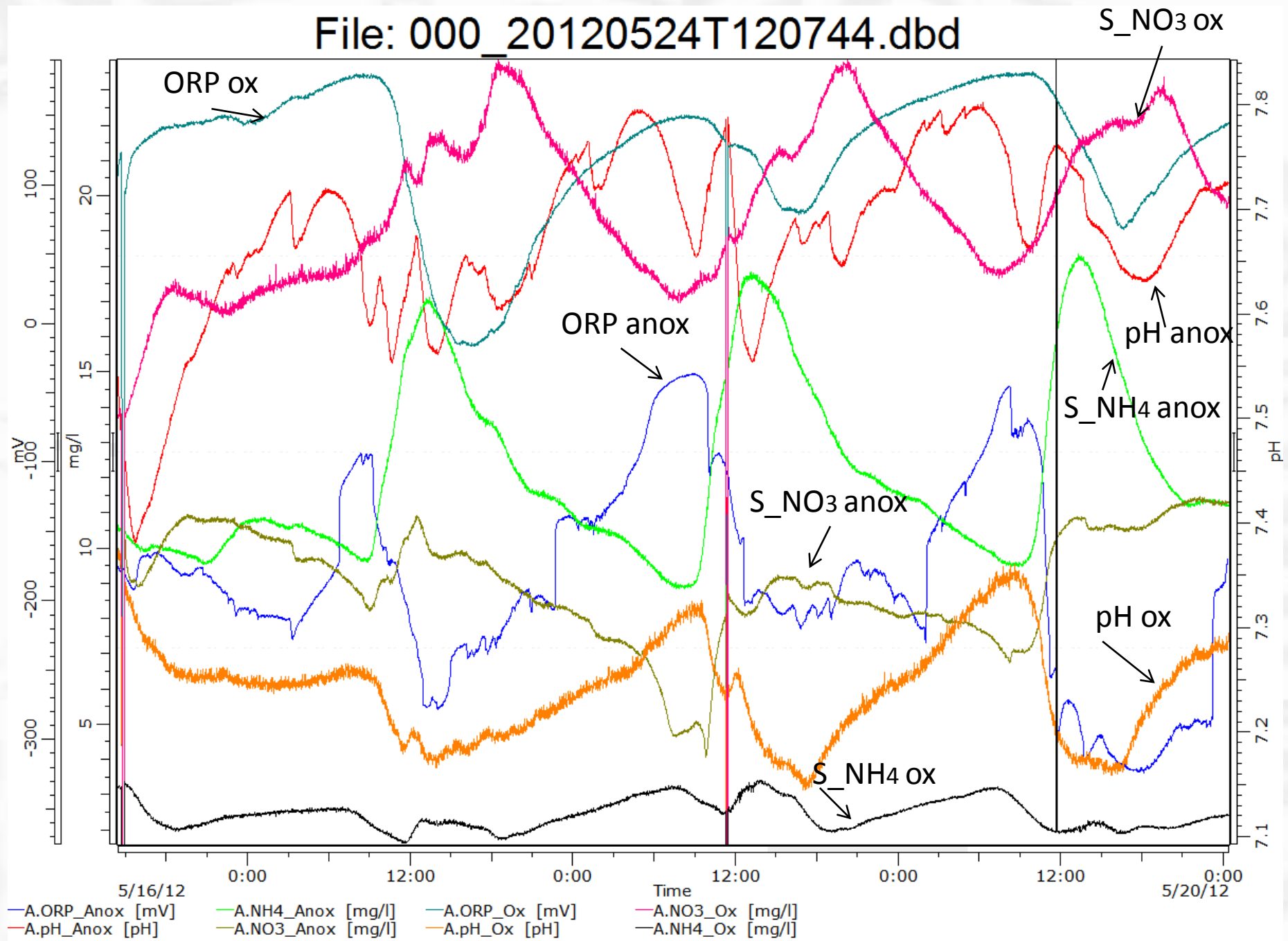


Acquisiti

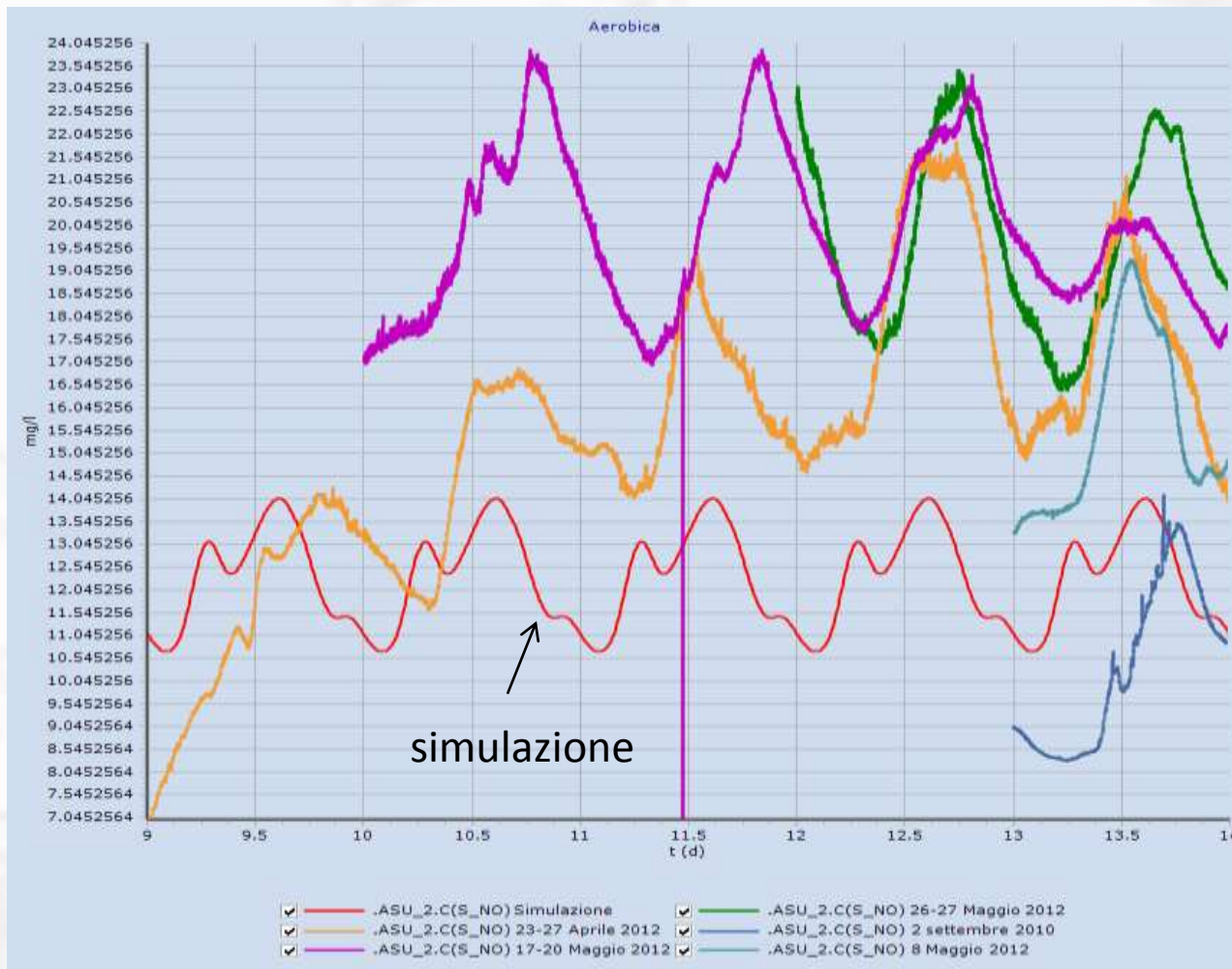
Confronto tra dati acquisiti e simulati

# Validazione

File: 000\_20120524T120744.dbd



# Validazione



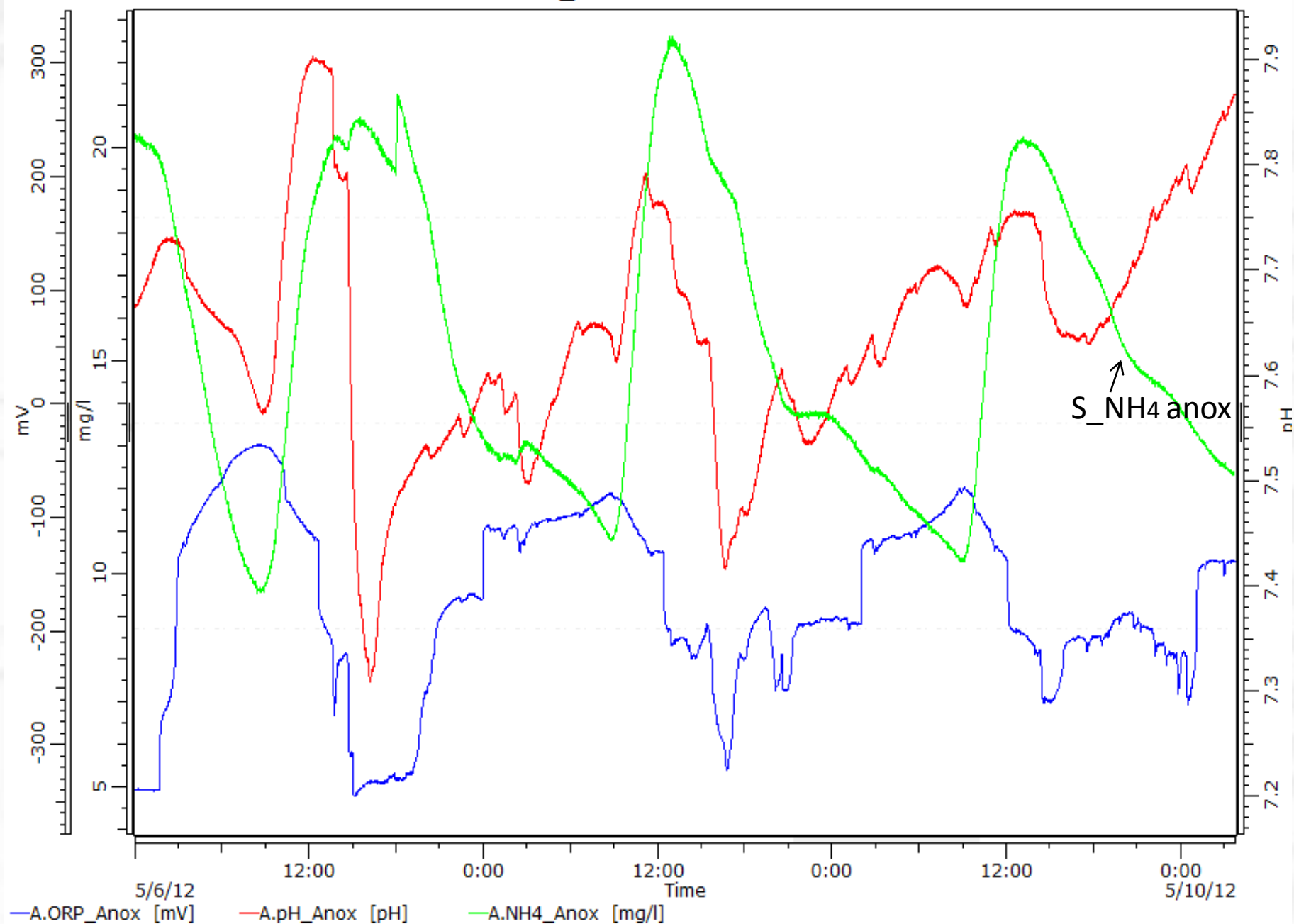
## THEIL'S INEQUALITY COEFFICIENT

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (X_i - Y_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_i X_i^2} + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i Y_i^2}}$$

| Data              | TIC N-NO <sub>3</sub> |
|-------------------|-----------------------|
| 24-27 Aprile 2012 | 0.15                  |
| 8 Maggio 2012     | 0.12                  |
| 27-28 Maggio 2012 | 0.23                  |
| 2 settembre 2010  | 0.11                  |
| 17-20 maggio 2012 | 0.24                  |

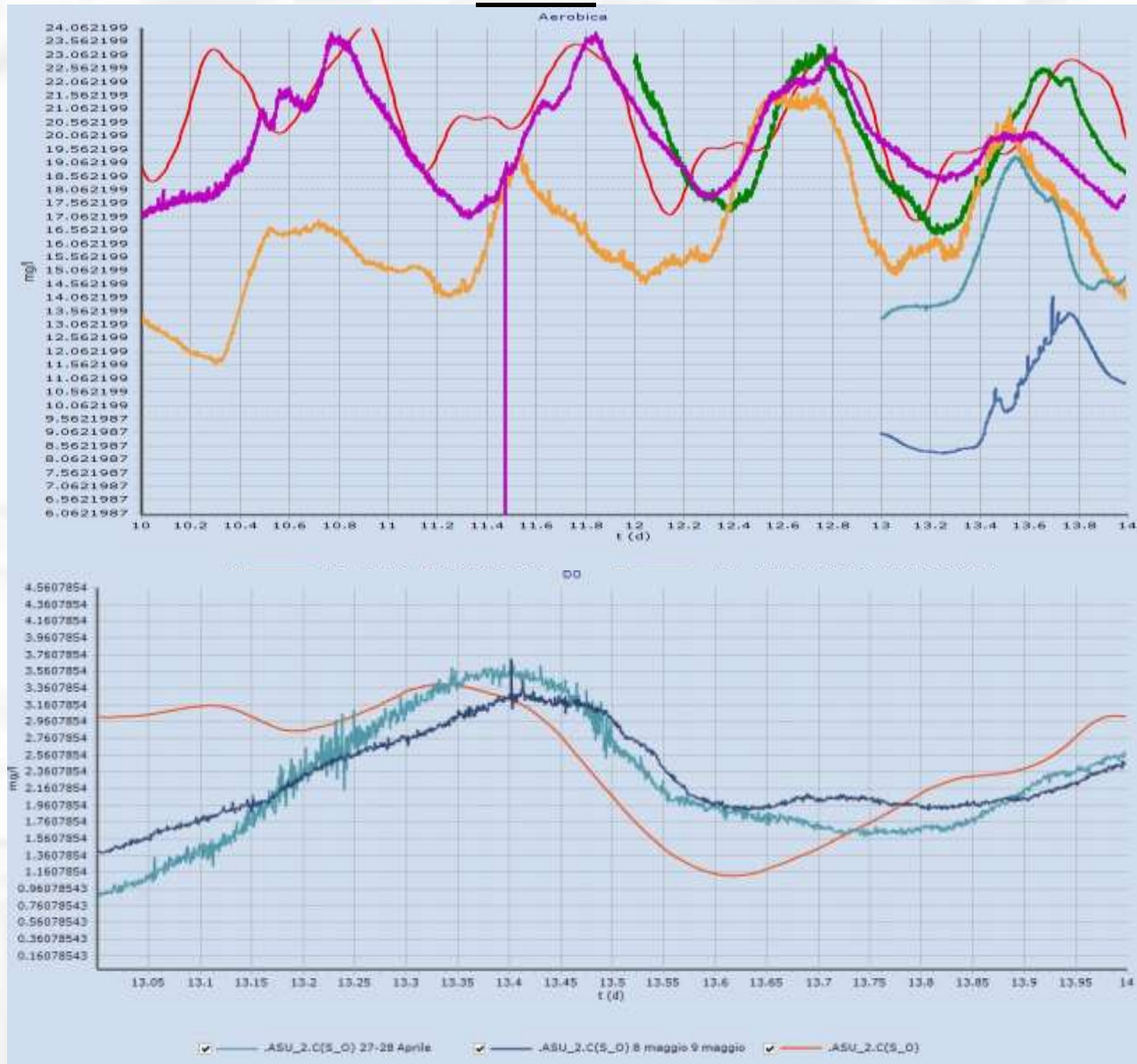


File: 000\_20120514T133751.dbd



# Validazione

## N-NO3



## THEIL'S INEQUALITY COEFFICIENT

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (X_i - Y_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_i X_i^2} + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i Y_i^2}}$$

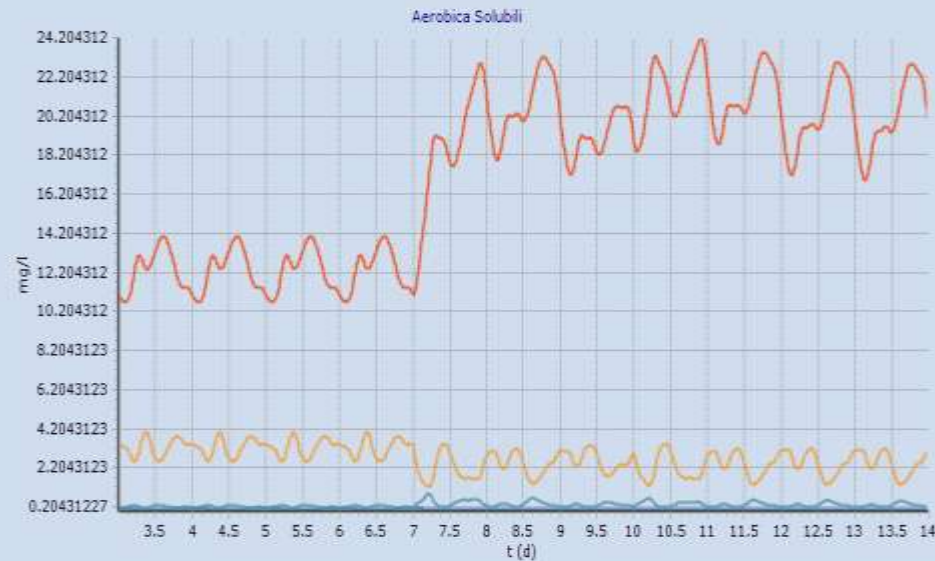
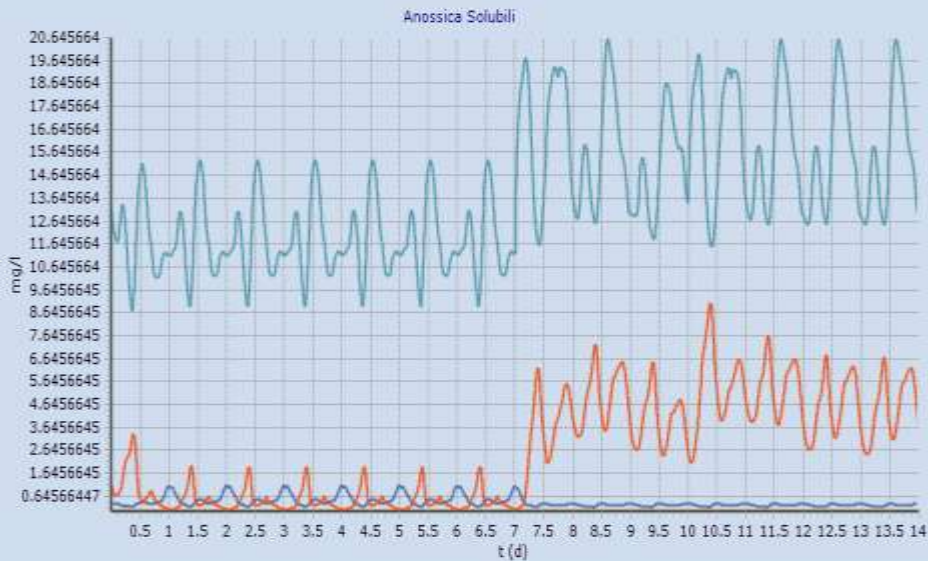
| Data              | TIC N-NO <sub>3</sub> |
|-------------------|-----------------------|
| 24-27 Aprile 2012 | 0.11/0.16             |
| 8 Maggio 2012     | 0.14                  |
| 27-28 Maggio 2012 | 0.042                 |
| 2 settembre 2010  | 0.32                  |
| 17-20 maggio 2012 | 0.041                 |

DO

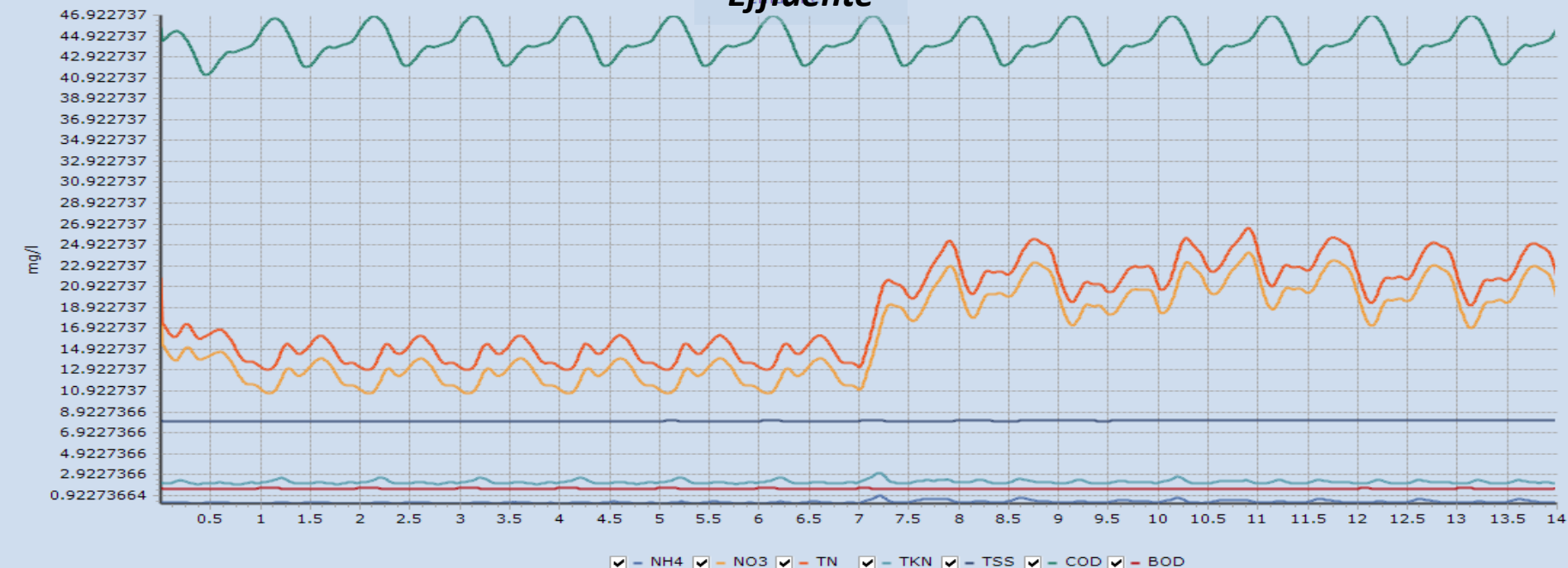
# CREAZIONE DI UN BUFFER TEMPORALE COMPOSTO

Anossica

Aerobica



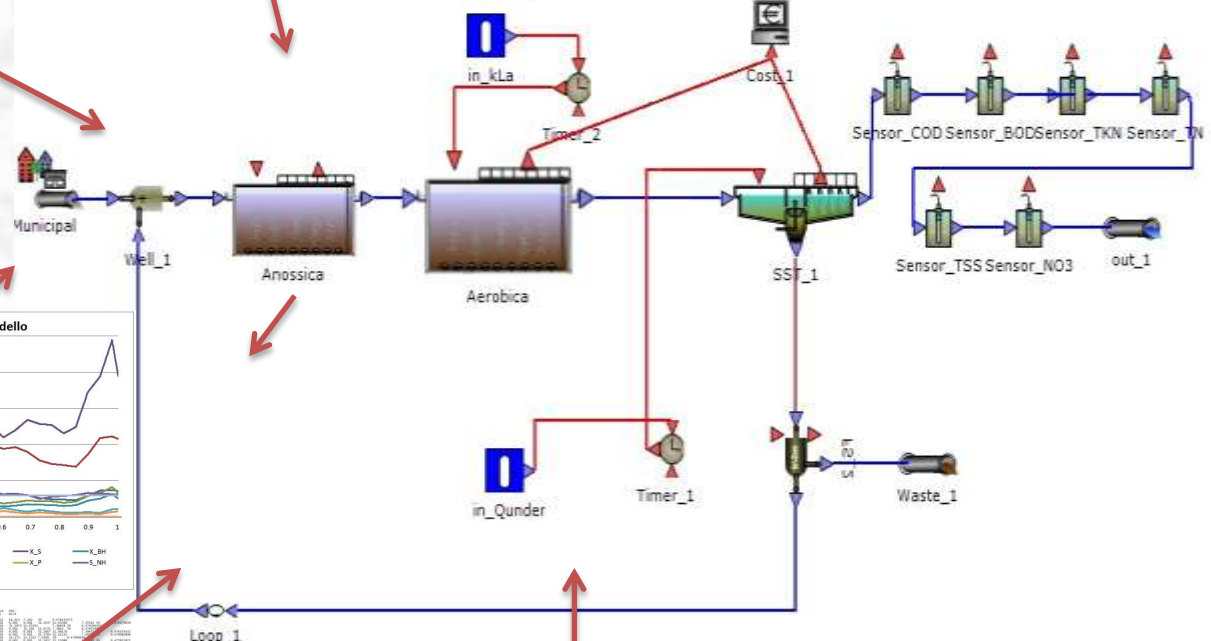
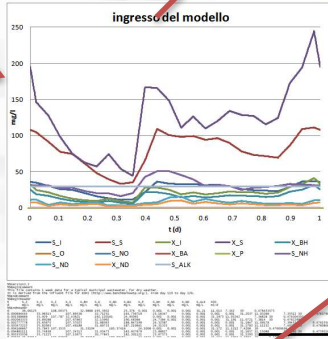
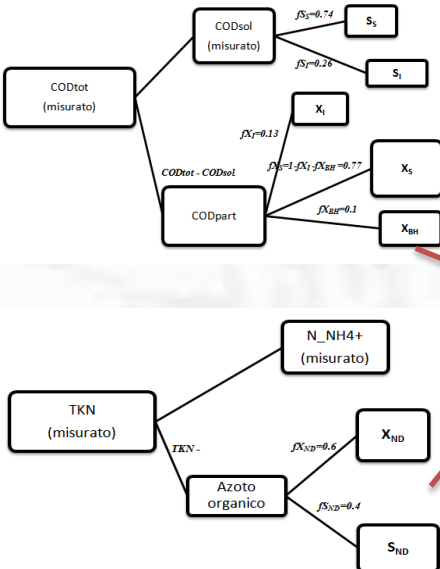
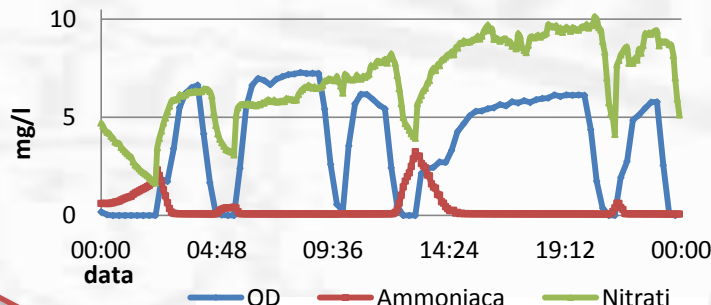
Effluente



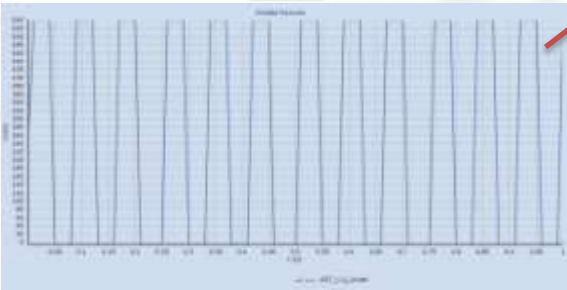
# IMPLEMENTAZIONE MODELLO IMPIANTO REALE

$kLa$

| Reale                     | Valore | Unità             |
|---------------------------|--------|-------------------|
| Volume Vasca Anossica     | 108    | l                 |
| Volume Vasca Aerobica     | 734    | l                 |
| Area Sedimentatore        | 133    | cm <sup>2</sup>   |
| Altezza Sedimentatore     | 360    | cm                |
| Portata Influenta media   | 450    | m <sup>3</sup> /d |
| Portata Ricircolo Fanghi  | 450    | m <sup>3</sup> /d |
| Portata Ricircolo Interno | -      | m <sup>3</sup> /d |
| Portata Spurgo            | 5      | m <sup>3</sup> /d |
| K <sub>la</sub>           | 140    | d <sup>-1</sup>   |
| Temperatura               | 20     | °C                |



| Parametro          | Valore prova 1<br>(20°C) | Valore prova 2<br>(20°C) | Valore di letteratura<br>in WEST (20°C) |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|
| [d <sup>-1</sup> ] | 4.44                     | 6.03                     | 6                                       |
| $k_s$ [mgCOD/l]    | 0.95                     | 0.99                     | 20                                      |
| [d <sup>-1</sup> ] | 0.63                     | -                        | 0.62                                    |
| [d <sup>-1</sup> ] | 0.74                     | 0.80                     | 0.8                                     |
| $k_{NH}$ [mgN/l]   | 0.21                     | 0.41                     | 1                                       |

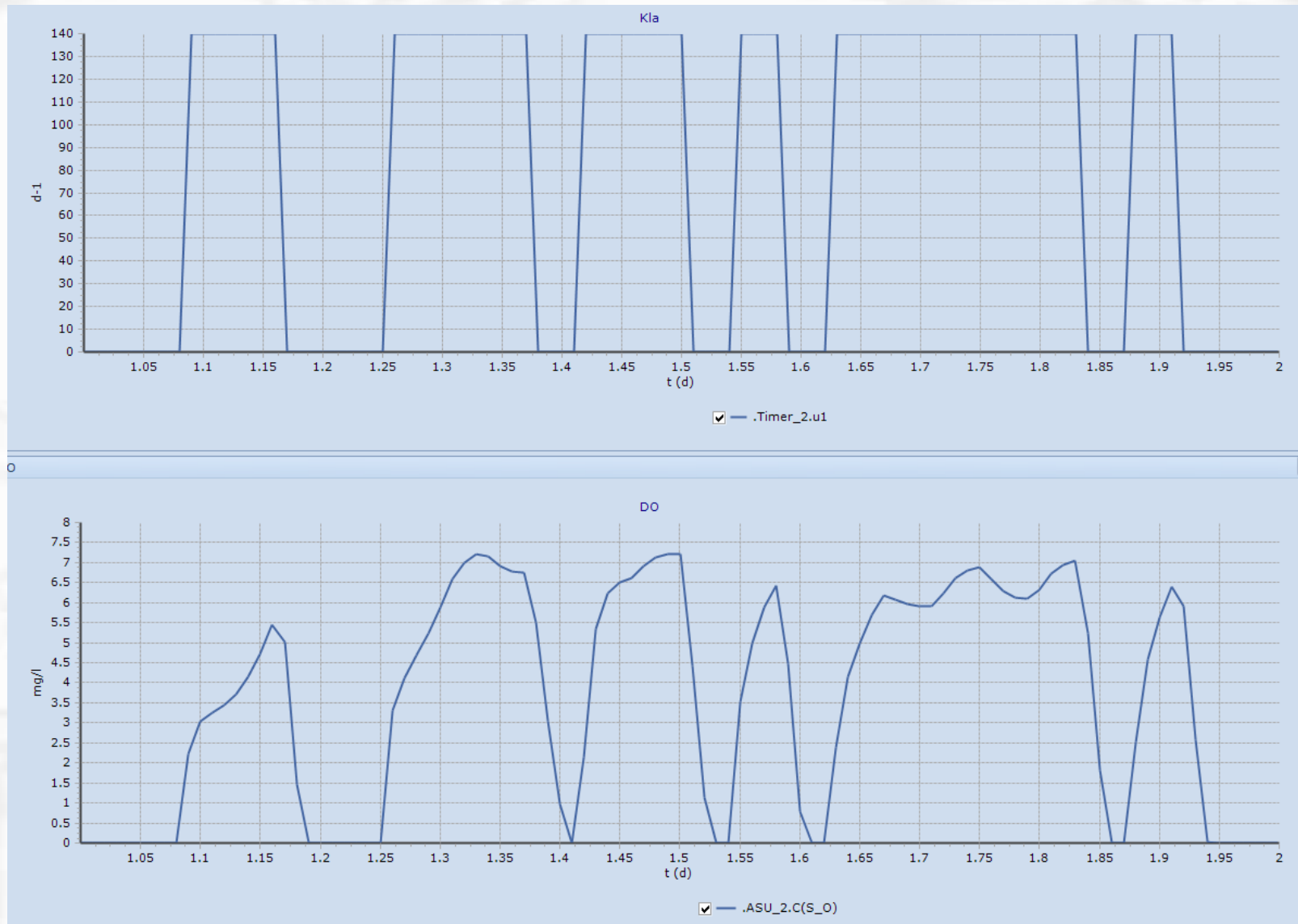


$Q_R$

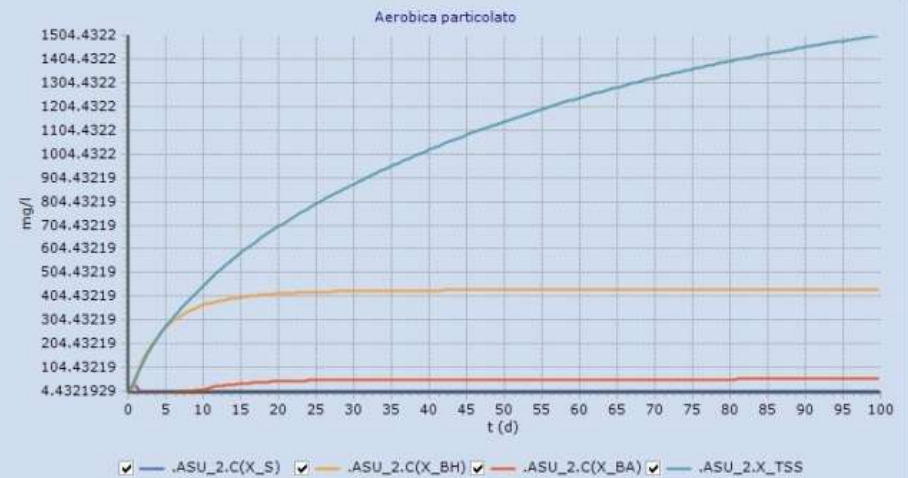
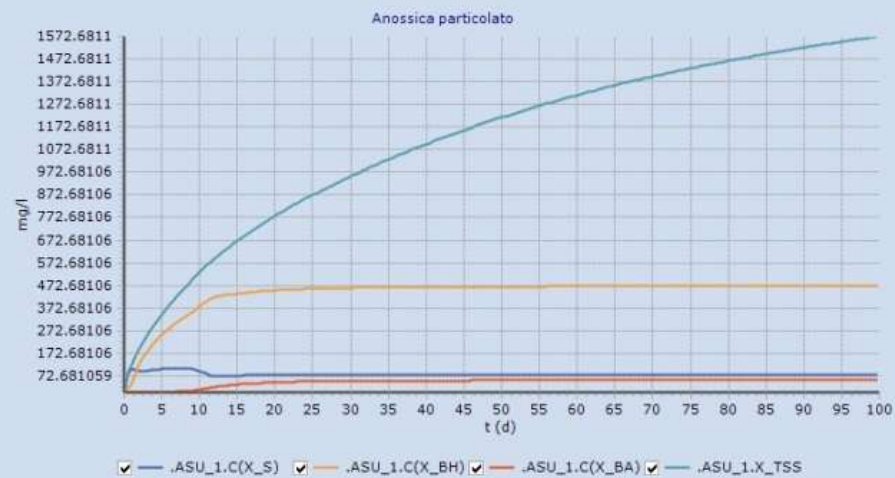
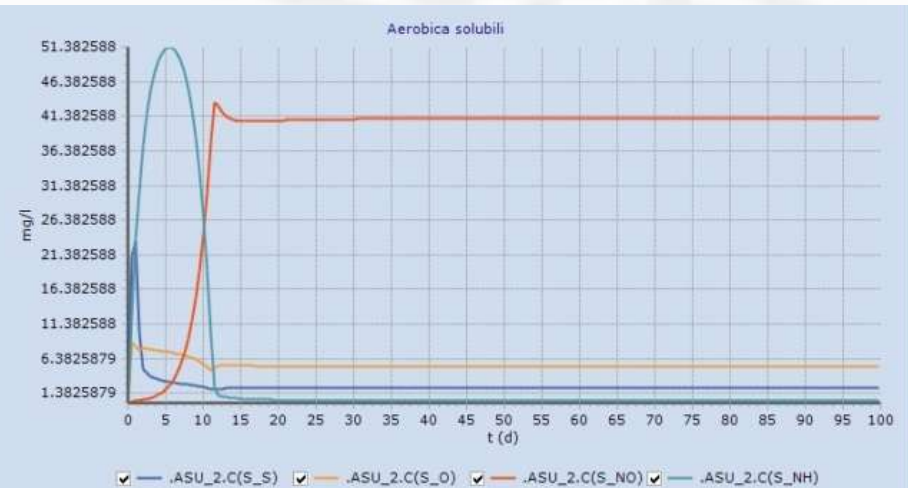
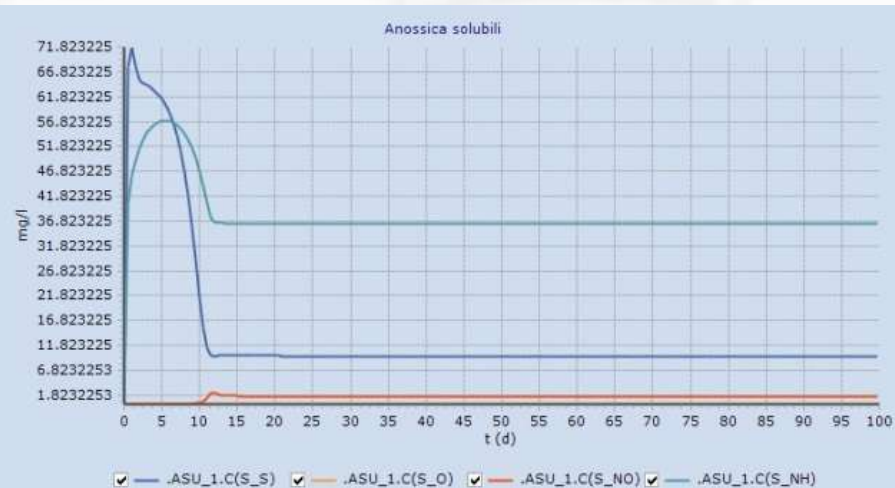


# **Calibrazione in stato stazionario**

Funzionamento discontinuo dell'areazione



# Calibrazione in stato stazionario



# Calibrazione dinamica

***Dati acquisiti da Aprile a Luglio 2012 in vasca Aerobica reale (DO, S\_NH4, S\_NO3)***

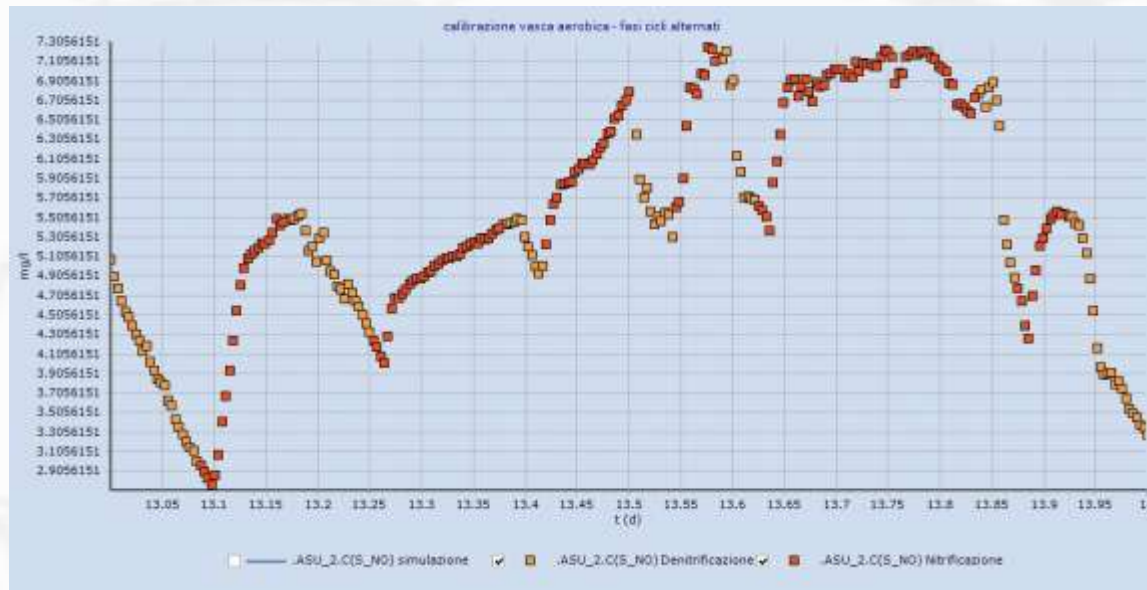


— Azoto ammoniacale

— Azoto nitrico

— DO

# Calibrazione dinamica



## Nitrificazione

| Parametro | Valore iniziale | Valore calibrato |
|-----------|-----------------|------------------|
| $k_{OH}$  | 0.2             | 3.5              |
| $\eta_g$  | 0.8             | 0.94             |

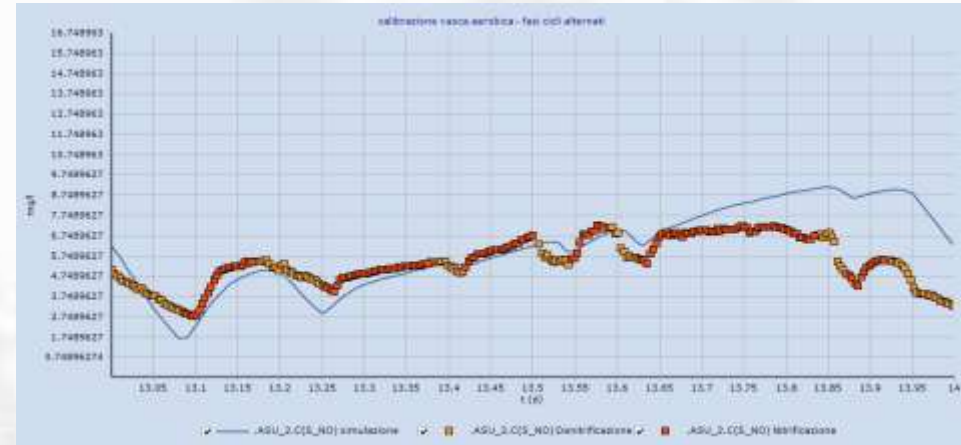
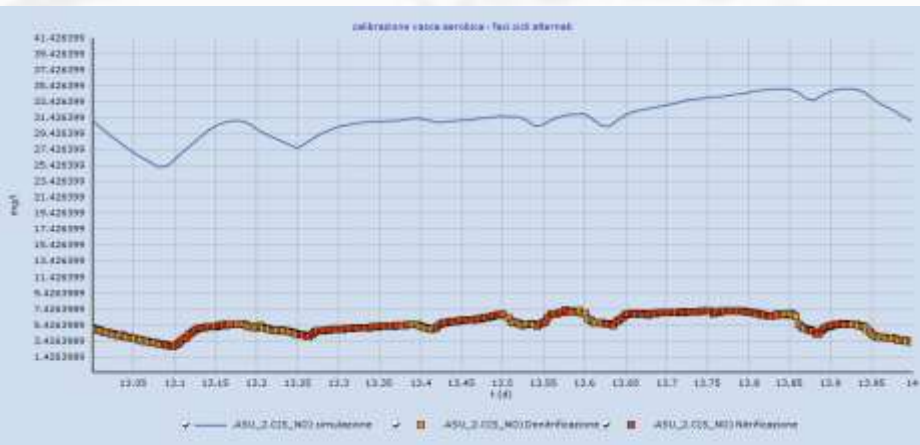
| Parametro | Valori iniziali | Valore calibrato |
|-----------|-----------------|------------------|
| $i_{XB}$  | 0.086           | 0.185            |
| $i_{XP}$  | 0.06            | 0.02             |
| $k_a$     | 0.08            | 0.153            |
| $k_h$     | 3               | 4.007            |

## Denitrificazione

| Parametro | Valori iniziali | Valore calibrato |
|-----------|-----------------|------------------|
| $K_X$     | 0.02            | 0.001            |
| $K_{NO}$  | 0.5             | 0.570            |
| $\eta_h$  | 0.4             | 0.939            |



# Calibrazione dinamica



## Pre- calibrazione

### Nitrificazione

| Parametro | Valore iniziale | Valore calibrato |
|-----------|-----------------|------------------|
| $k_{OH}$  | 0.2             | 3.5              |
| $\eta_g$  | 0.8             | 0.94             |

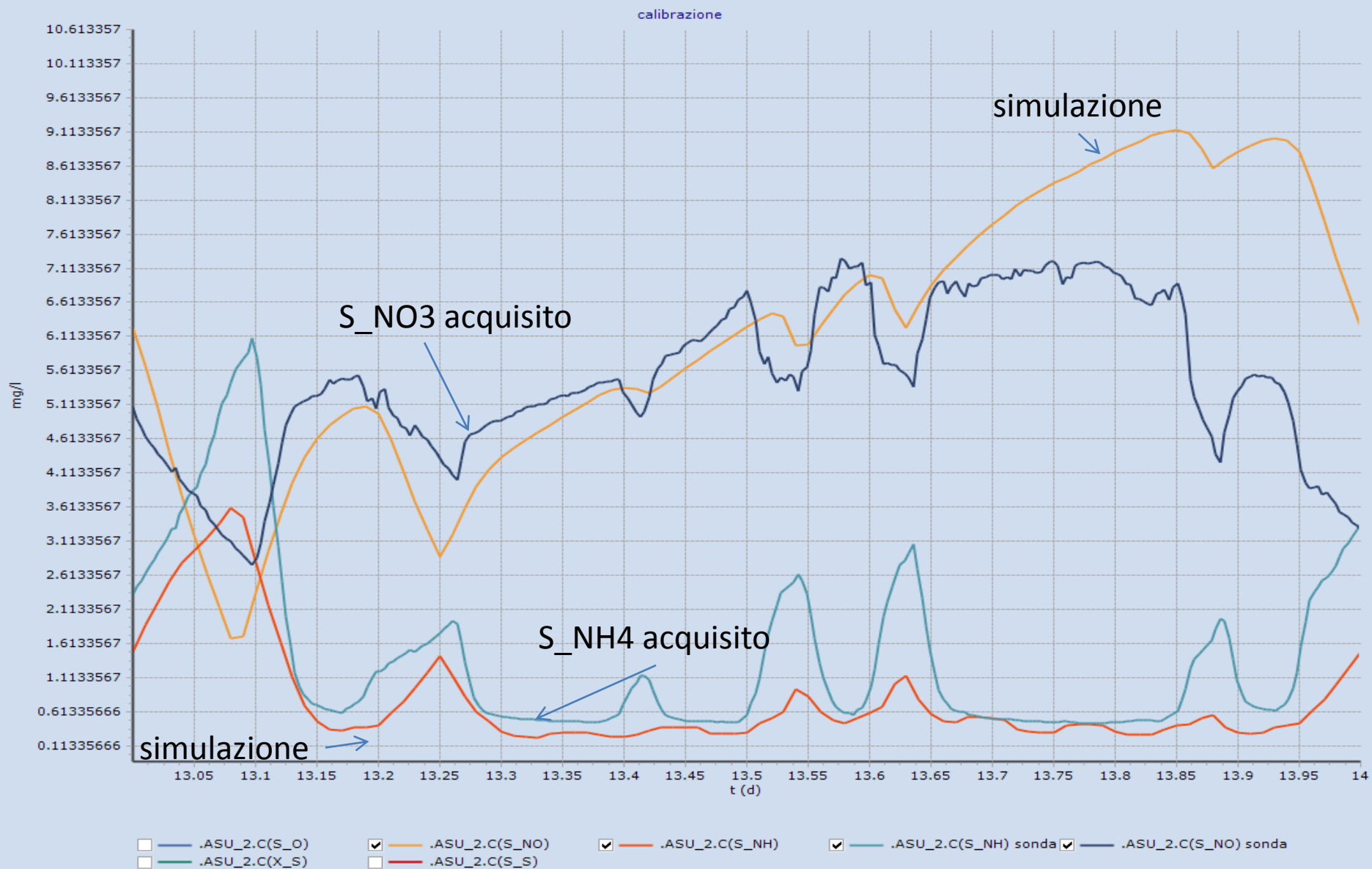
| Parametro | Valori iniziali | Valore calibrato |
|-----------|-----------------|------------------|
| $iXB$     | 0.086           | 0.185            |
| $iXP$     | 0.06            | 0.02             |
| $ka$      | 0.08            | 0.153            |
| $kh$      | 3               | 4.007            |

## Post- calibrazione

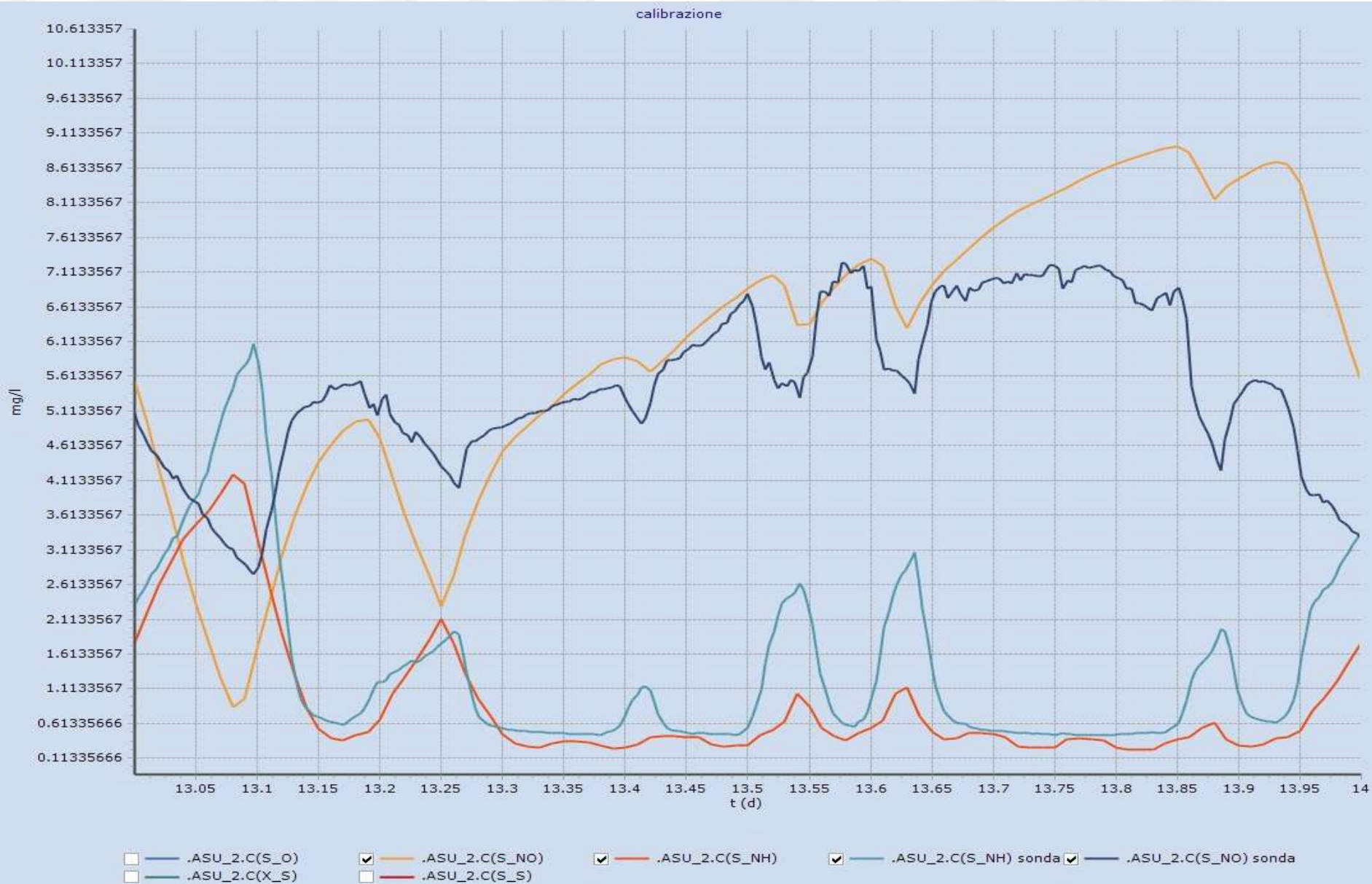
### Denitrificazione

| Parametro | Valori iniziali | Valore calibrato |
|-----------|-----------------|------------------|
| $K_X$     | 0.02            | 0.001            |
| $K_{NO}$  | 0.5             | 0.570            |
| $\eta_h$  | 0.4             | 0.939            |

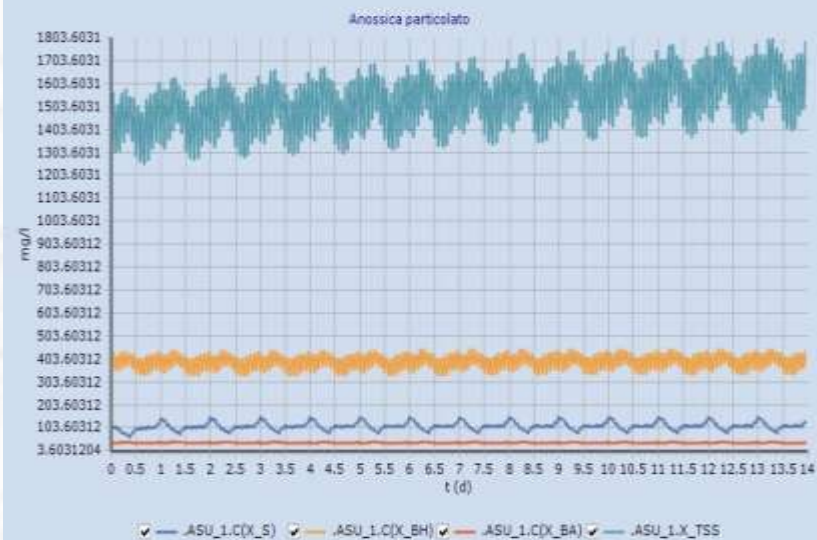
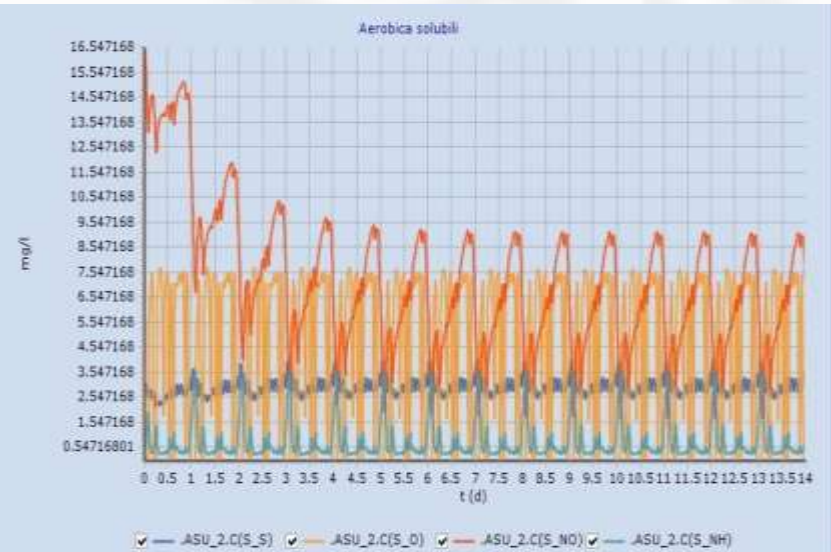
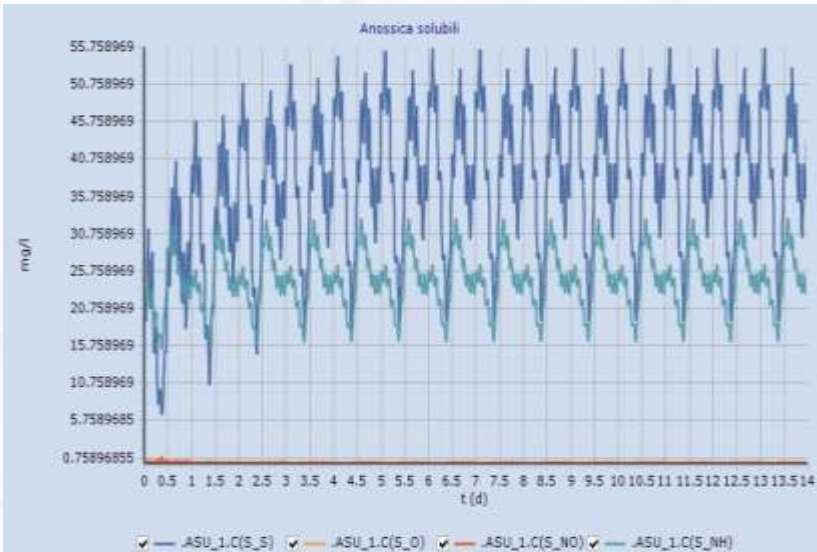
# Calibrazione dinamica



# VALIDAZIONE

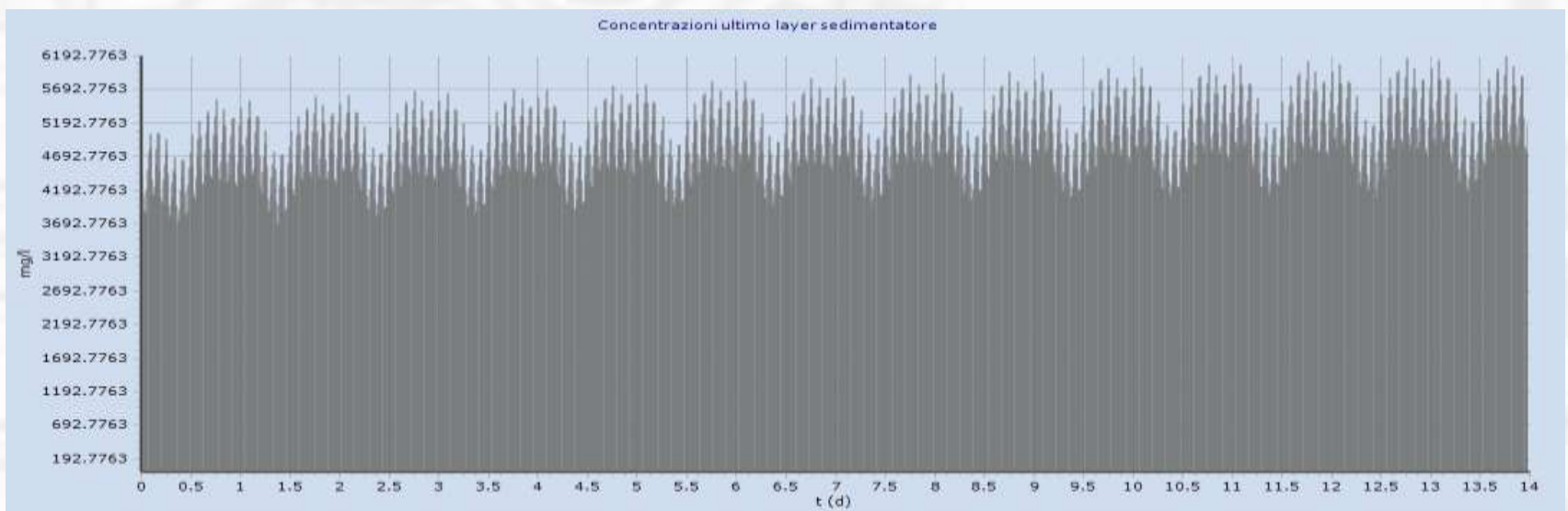
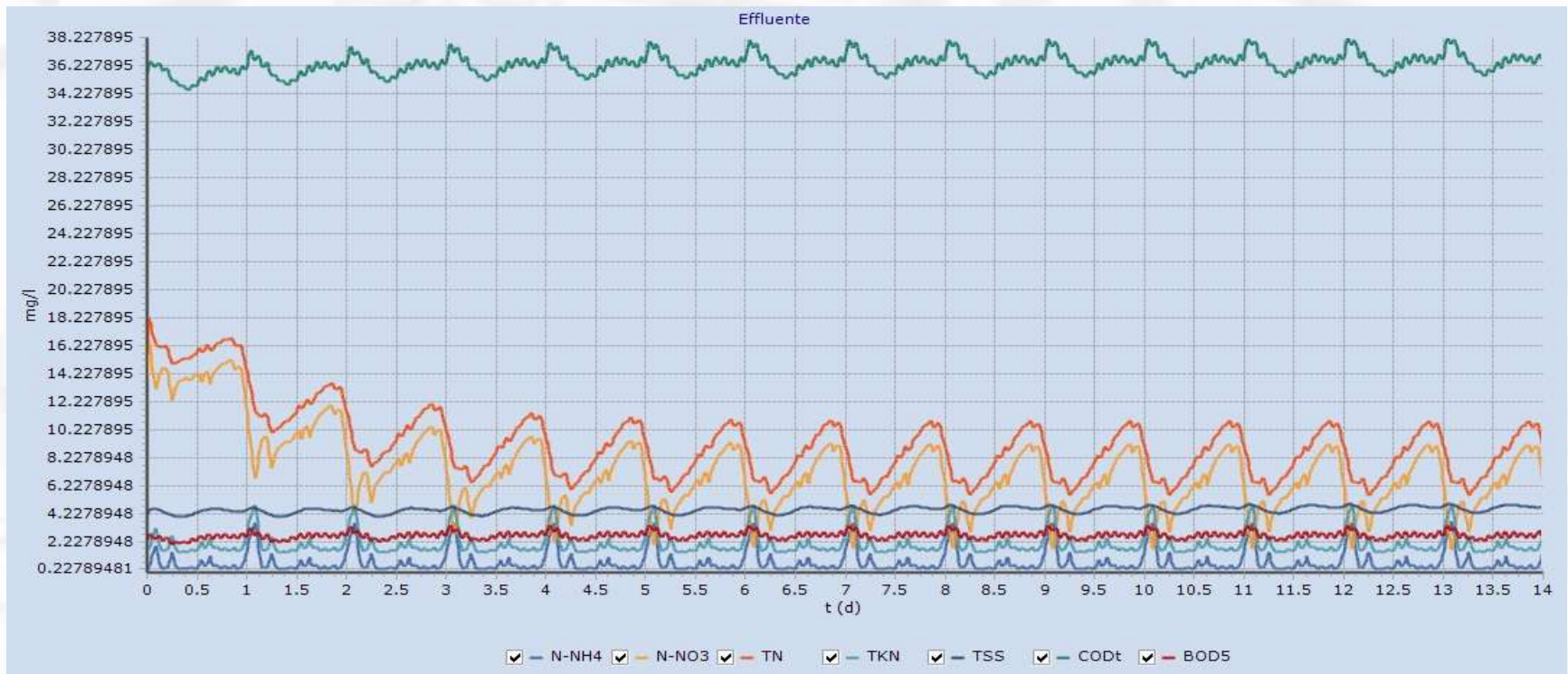


# RISULTATI SIMULAZIONI

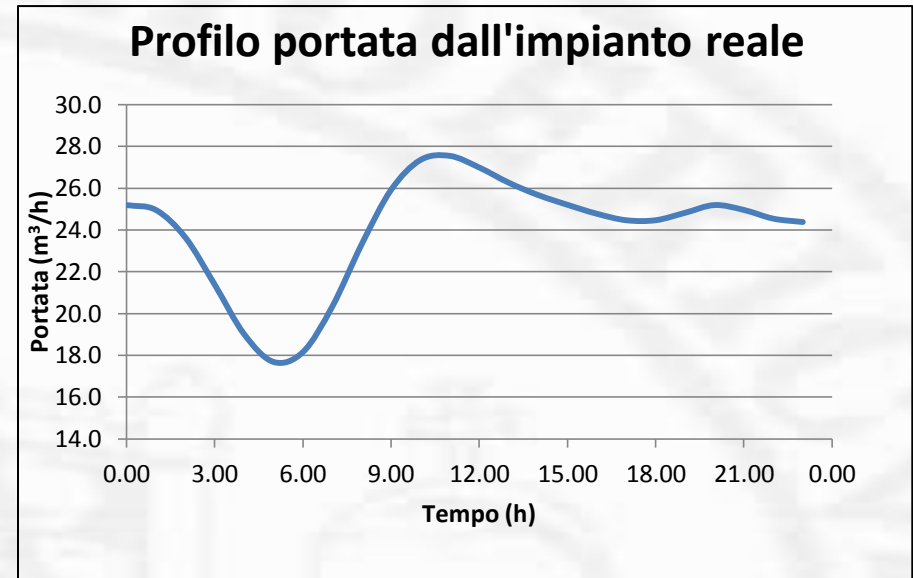
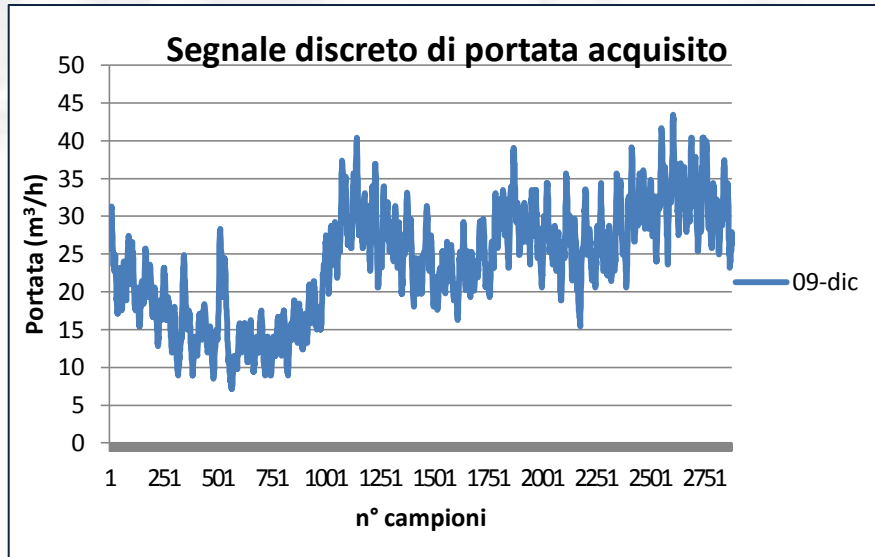




# RISULTATI SIMULAZIONI



# DISCRETIZZAZIONE SEGNALE DI PORTATA IN INGRESSO



$Y = \text{fft}(x)/N;$

$ak = \text{real}(Y);$

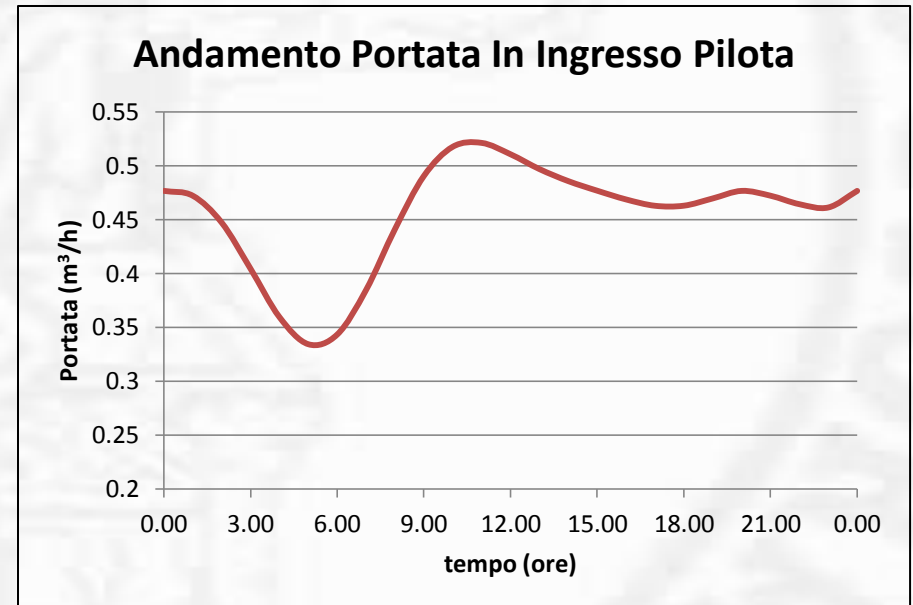
$bk = \text{imag}(Y);$

$t = [1:0.05:24];$

$ft = ([ak(1,1)] + [ak(2,1)] * \cos(2 * \pi * t) + [bk(2,1)] * \sin(2 * \pi * t) + [ak(3,1)] * \cos(4 * \pi * t) + [bk(3,1)] * \sin(4 * \pi * t) + [ak(4,1)] * \cos(6 * \pi * t) + [bk(4,1)] * \sin(6 * \pi * t));$

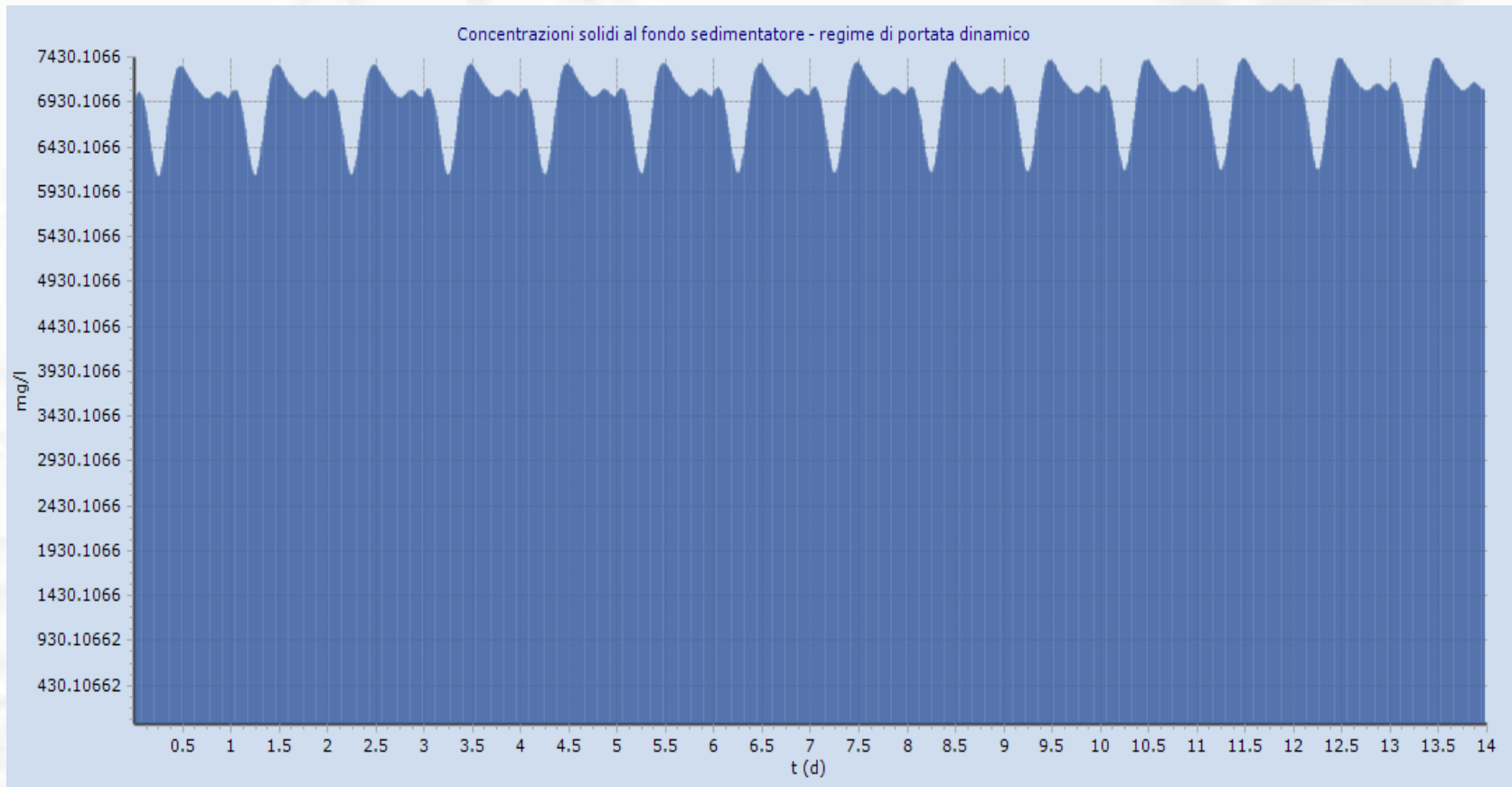
$q = ft(1, 12:24)';$

$\text{plot}(q(1:24,1), \text{'DisplayName'}, 'q(1:24,1)', \text{'YDataSource'}, 'q(1:24,1)'); \text{figure(gcf)}$



Il modello calibrato risponde sensibilmente ai picchi di portata

# **DISCRETIZZAZIONE SEGNALE DI PORTATA IN INGRESSO**



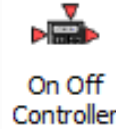
Il modello calibrato risponde sensibilmente ai picchi di portata

# IMPLEMENTAZIONE E SIMULAZIONI DI STRATEGIE DI CONTROLLO

## IMPIANTO PILOTA



F = fattore rapporto costante



On Off  
Controller



Control\_PI

$$CO = CO_{bias} + K_c \cdot e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int e(t) dt$$



Costi

```
interface.u = IF(interface.y_M < interface.y_Min)
THEN interface.u_On
ELSE
  IF (interface.y_M > interface.y_Max)
  THEN interface.u_Off
```

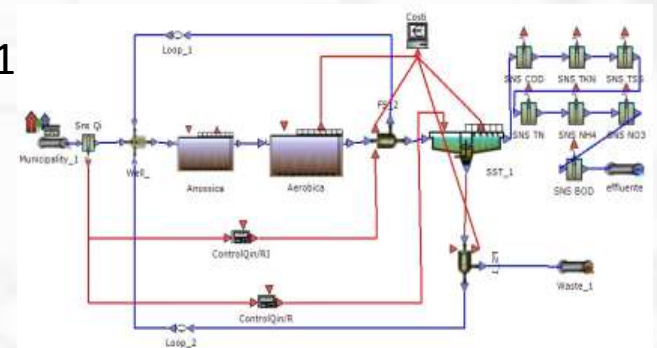
Costo energia = 0,14 €/Kwh

OTR = 1800 g/kWh

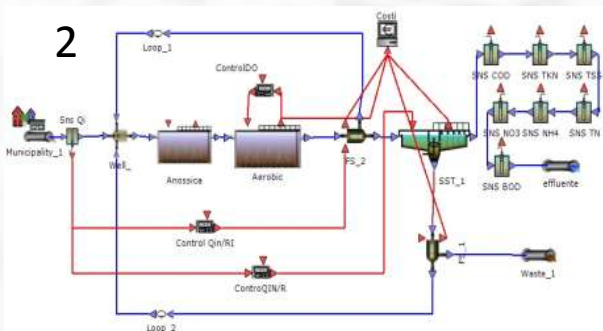
### STRATEGIE IMPLEMENTATE

- Open loop
- CTL DO sp2mg/l
- CTL DO sp1mg/l
- CTL DO sp0.5mg/l
- CTL R f(Qin) + RI f(1.65Qin) — 1
- CTL NH4 (sp1mg/l) AEROBICA ->CTL DO (sp0-2.5)
- CTL NH4 (sp1.5mg/l) AEROBICA ->CTL DO (sp0-2.5)
- CTL NH4 (sp1mg/l) AEROBICA ->CTL DO (sp0-2.5)+CTL Ri e R f(Qin)
- CTL NH4 (sp1.5mg/l) AEROBICA ->CTL DO (sp0-2.5)+CTL Ri e R f(Qin)
- CTL DO (sp0.5mg/l) + CTL R f(Qin) ed RI f(1.65Qin)
- CTL NO3 (sp 2mg/l) ->CTL ON/OFF RI f(1/1.65Qin) +CTL Rif(Qin)
- CTL NO3 (2 mg/l) ANOSSICA ->CTL ON/OFF RI f(1/1.65Qin) +CTL R f(Qin) — 4
- CTL NO3 (2 mg/l) ANOSSICA ->CTL ON/OFF RI f(1/1.65Qin) +CTL DO (2 mg/l)+CTL R f(Qin)
- CTL NH4 (sp2.5mg/l) AEROBICA ->CTL DO (sp0-2.5)+CTL Ri f(2.5Qin) e R f(Qin)
- CTL R f(Qin) + RI f(2 Qin)

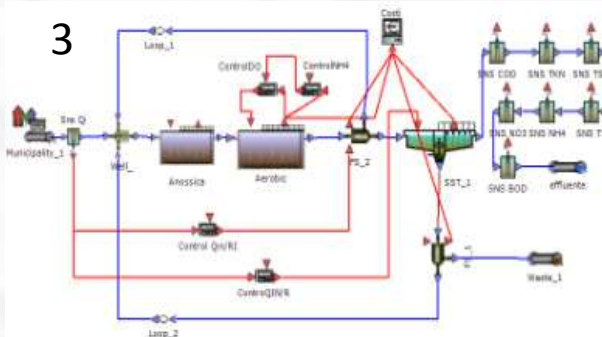
1



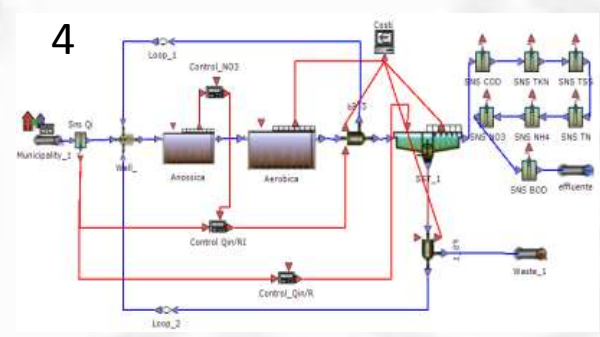
2



3



4

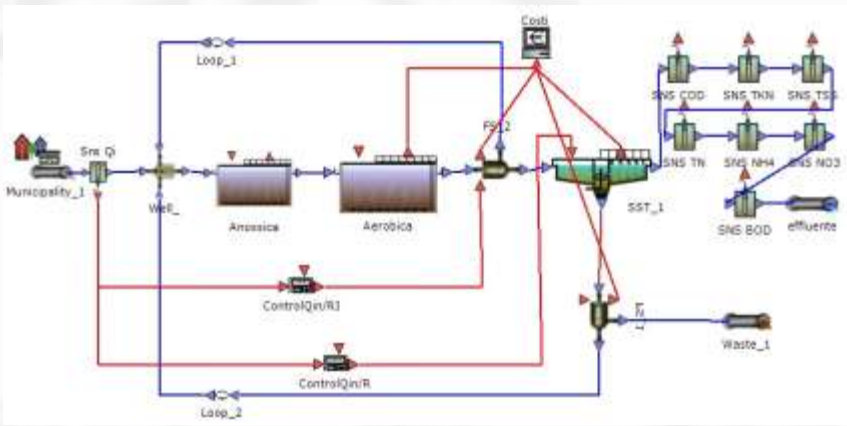




# MODULAZIONE DEI RICIRCOLI PROPORZIONALMENTE ALLA PORTATA IN INGRESSO

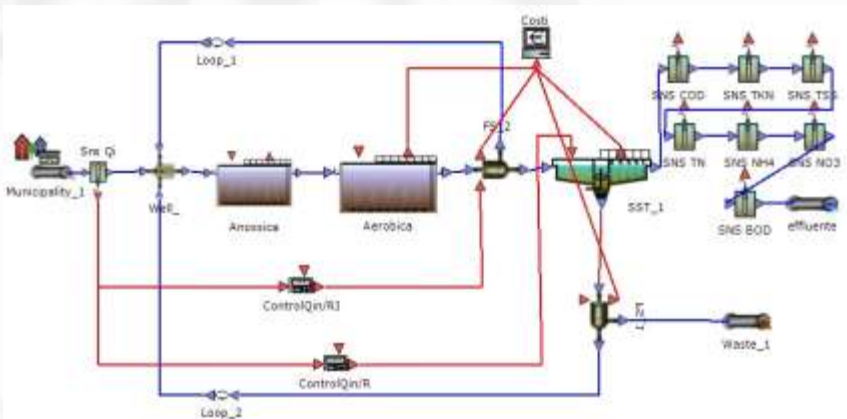
|                          |                       |           |
|--------------------------|-----------------------|-----------|
| Tipologia di controllore | Constant ratio        | Unità     |
| Fattore di rapporto      | Variabile tra R ed RI | 1<br>1,65 |

MINIMO GUADAGNO IN TERMINI DI QUALITA' DELL' EFFLUENTE



# MODULAZIONE DEI RICIRCOLI PROPORZIONALMENTE ALLA PORTATA IN INGRESSO

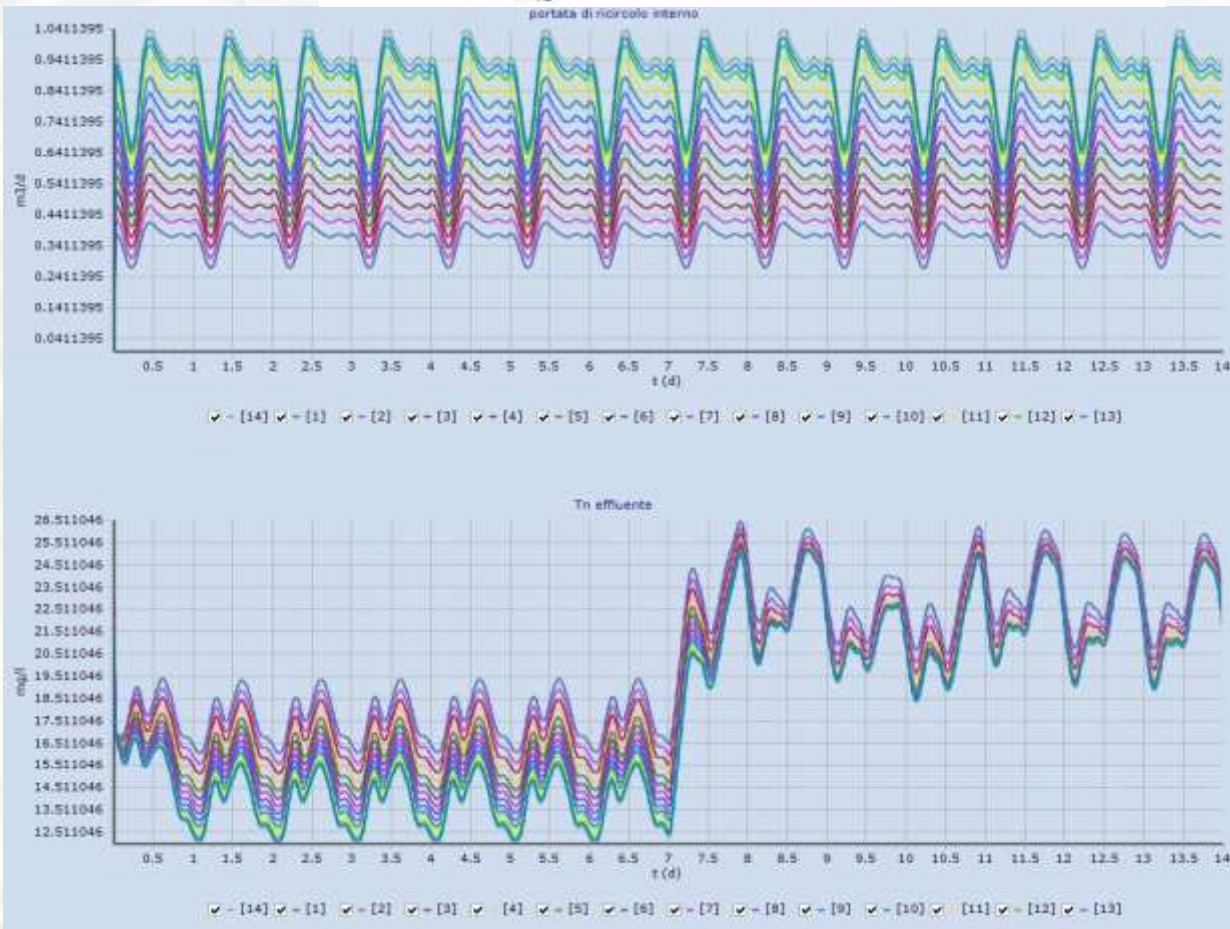
|                          |                       |           |
|--------------------------|-----------------------|-----------|
| Tipologia di controllore | Constant ratio        | Unità     |
| Fattore di rapporto      | Variabile tra R ed RI | 1<br>1,65 |



ANALISI DI SCENARIO  
OTTIMIZZAZIONE DI F PER  
RICIRCOLO INTERNO PER  
MASSIMIZZARE EFFICIENZA

Andamento dell'azoto totale  
nell'effluente

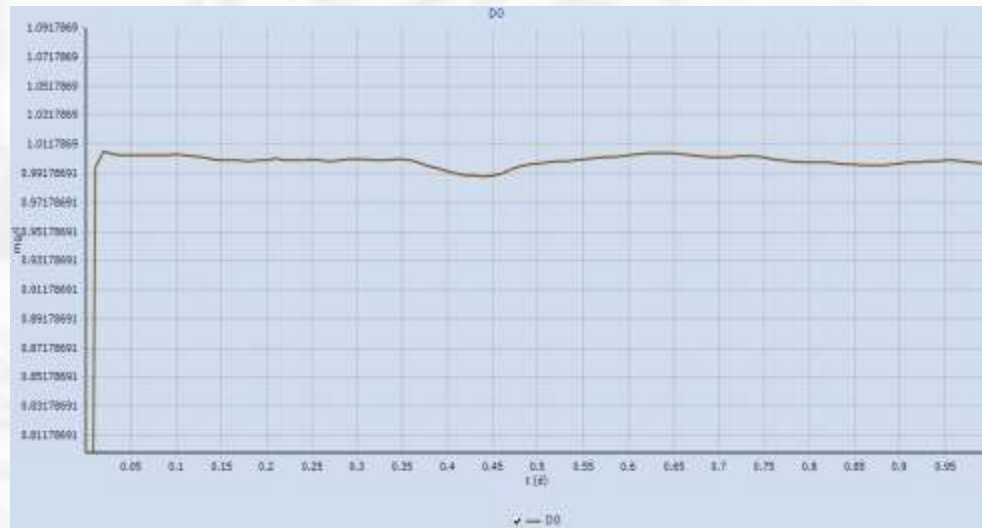
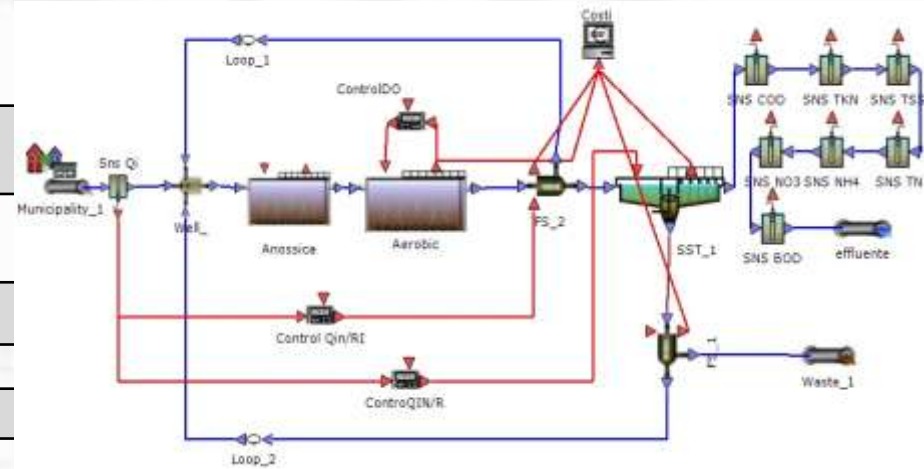
RI → F=1,99



# CONTROLLO DO IN VASCA AEROBICA

$$CO = CO_{bias} + K_c \cdot e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int e(t) dt$$

| Tipologia di controllore                 | PI              | Unità               |
|------------------------------------------|-----------------|---------------------|
| Guadagno Proporzionale ( $K_p$ )         | 250             | m3 (g (-COD))-1 d-1 |
| Costante integrale di tempo ( $\tau_i$ ) | 10              | minuti              |
| Variabile controllata                    | SO in aereo     |                     |
| Set point                                | 2-1-0.5         | mg/l                |
| Variabile manipolata (VM)                | KL <sub>a</sub> | d-1                 |
| Massimo valore della VM                  | 300             | d-1                 |



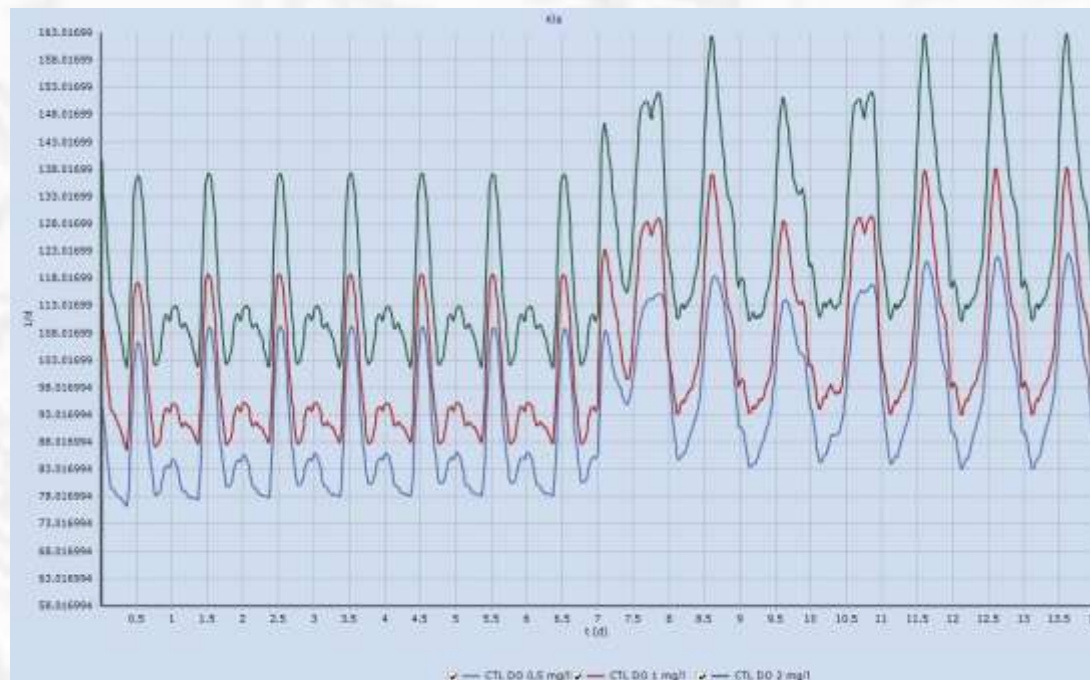
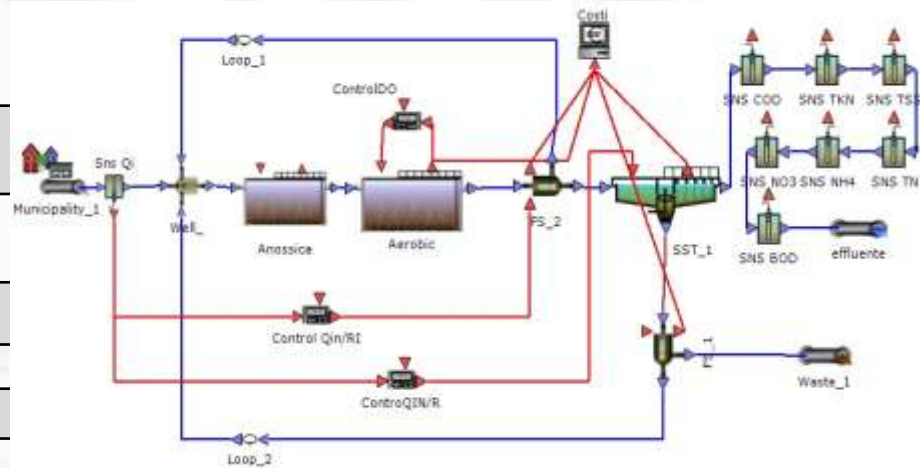
*Assestamento della concentrazione di ossigeno disciolto*



## **CONTROLLO DO IN VASCA AEROBICA**

$$CO = CO_{bias} + K_c \cdot e(t) + \frac{K_c}{T_I} \int e(t) dt$$

|                                                    |                       |                            |
|----------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| <b>Tipologia di controllore</b>                    | <b>PI</b>             | <b>Unità</b>               |
| <b>Guadagno Proporzionale (K<sub>p</sub>)</b>      | <b>250</b>            | <b>m3 (g (-COD))-1 d-1</b> |
| <b>Costante integrale di tempo (τ<sub>i</sub>)</b> | <b>10</b>             | <b>minuti</b>              |
| <b>Variabile controllata</b>                       | <b>SO in aero</b>     |                            |
| <b>Set point</b>                                   | <b>2-1-0.5</b>        | <b>mg/l</b>                |
| <b>Variabile manipolata (VM)</b>                   | <b>KL<sub>a</sub></b> | <b>d-1</b>                 |
| <b>Massimo valore della VM</b>                     | <b>300</b>            | <b>d-1</b>                 |

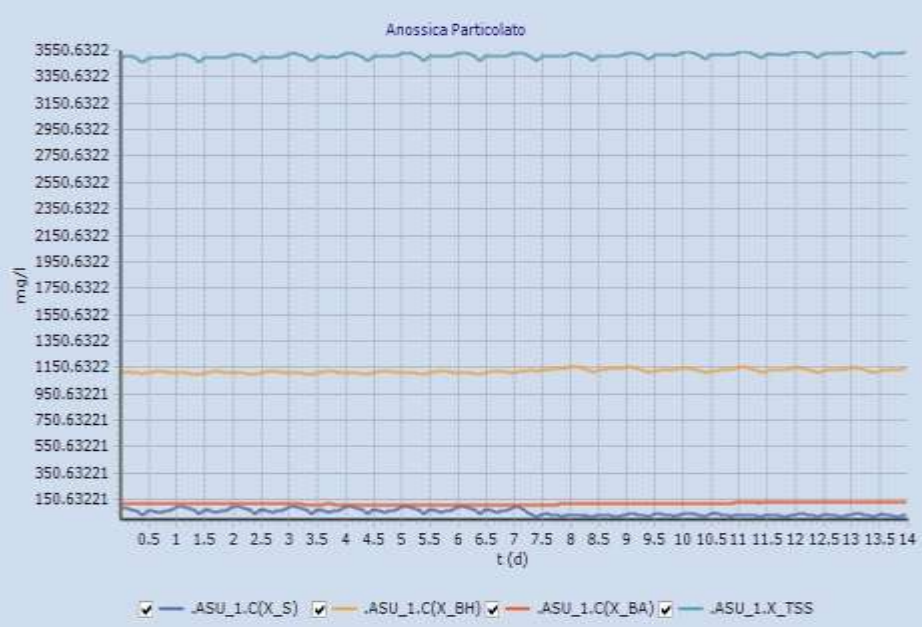
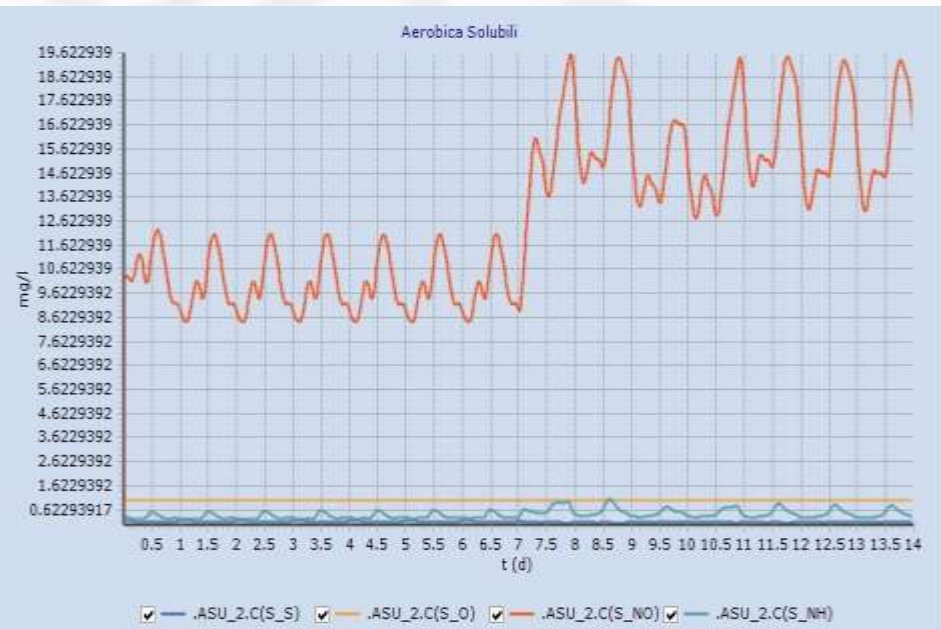
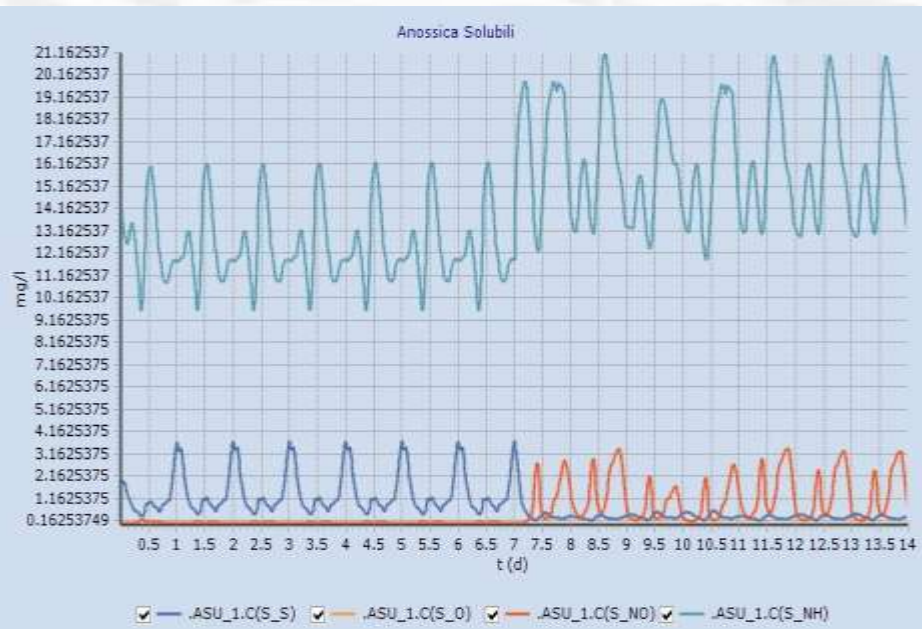


## Variabili manipolata kLa



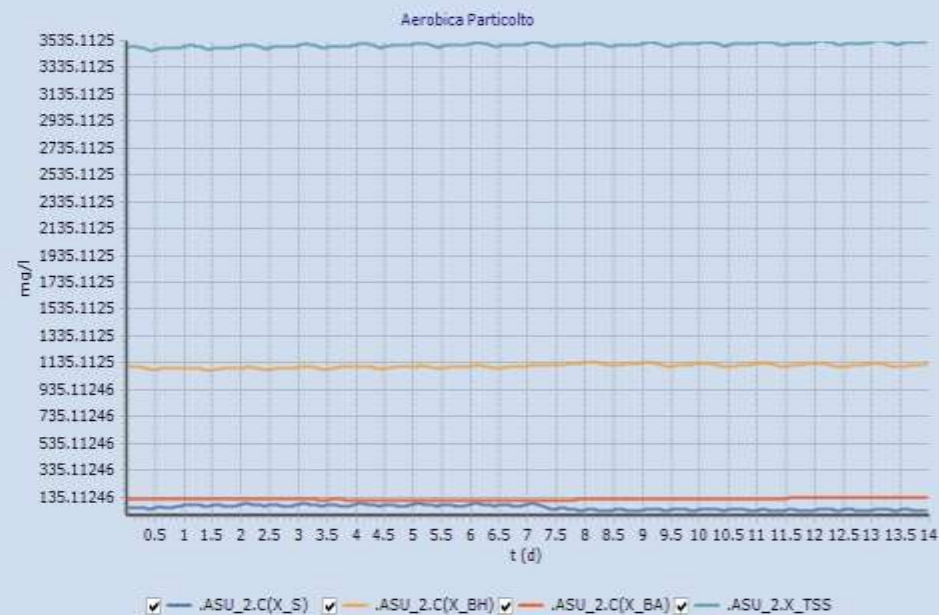
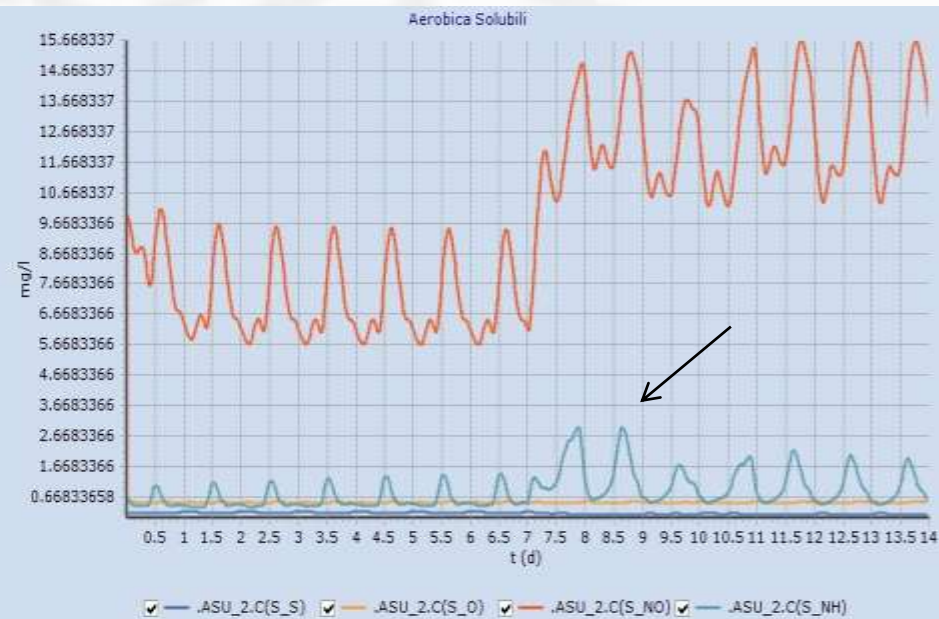
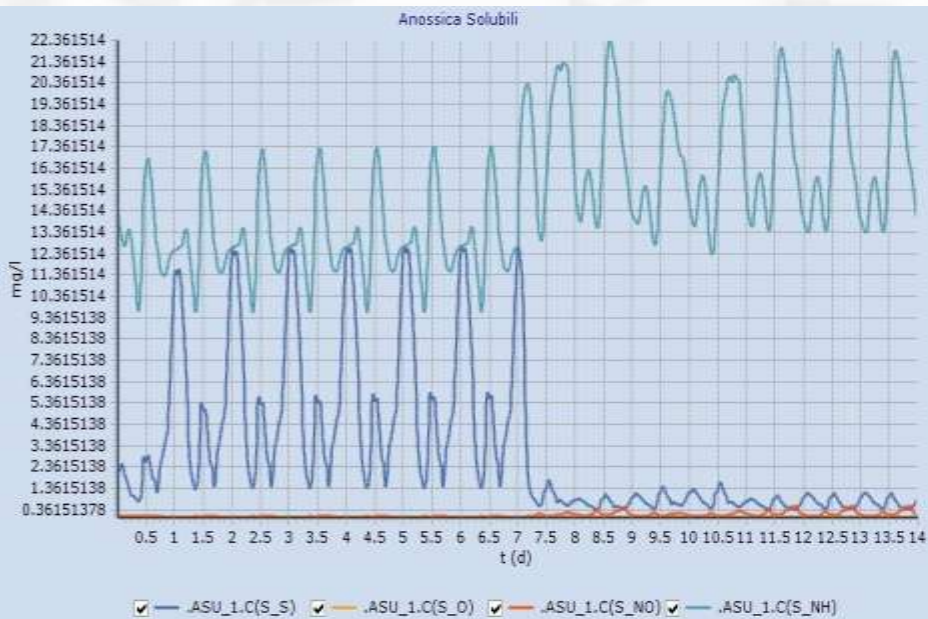
DO sp 1mg/l

# CONTROLLO DO IN VASCA AEROBICA



# CONTROLLO DO IN VASCA AEROBICA

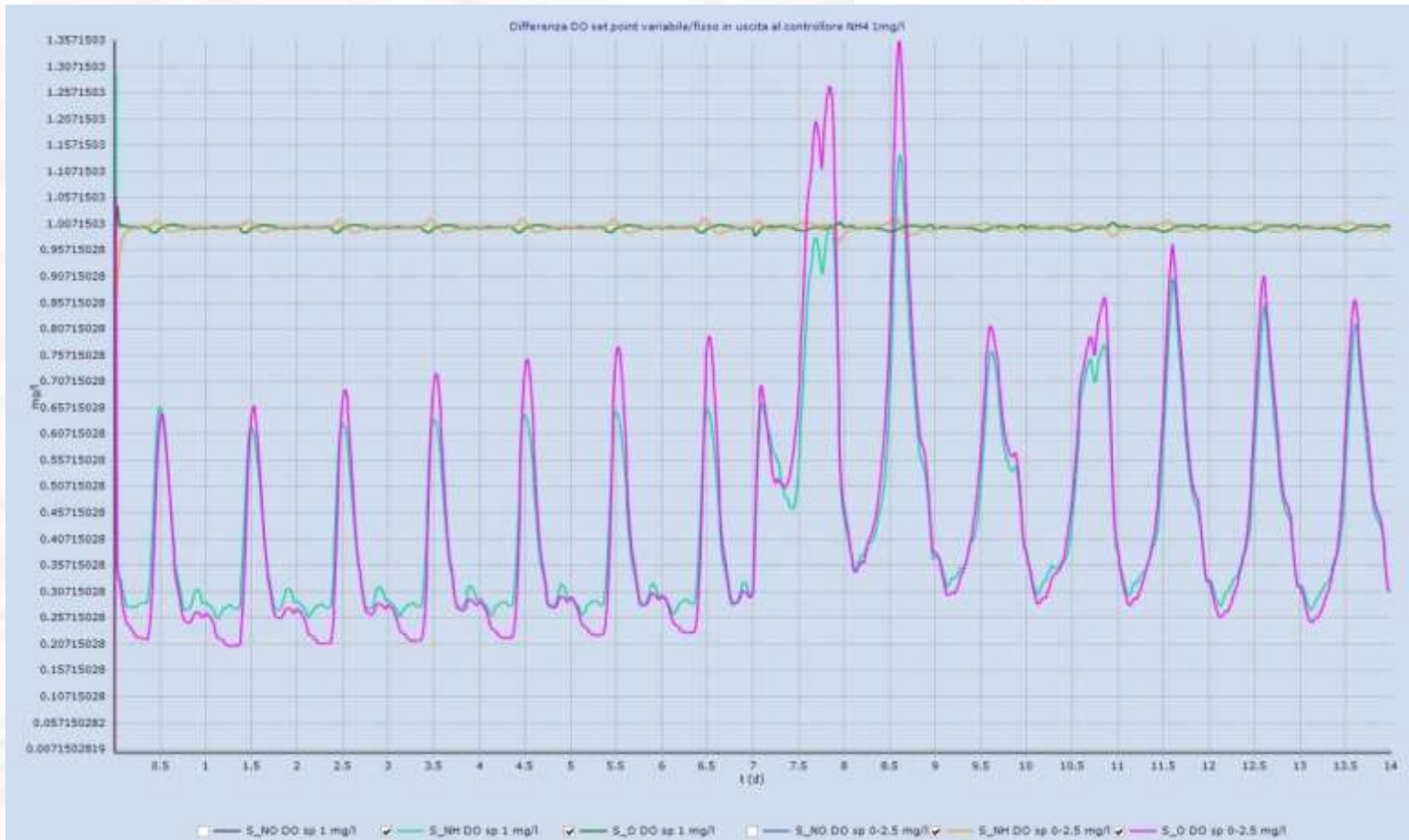
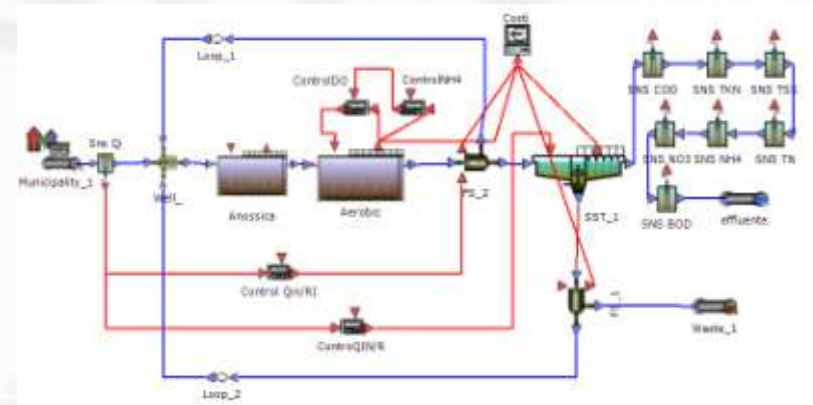
DO sp 0,5 mg/l



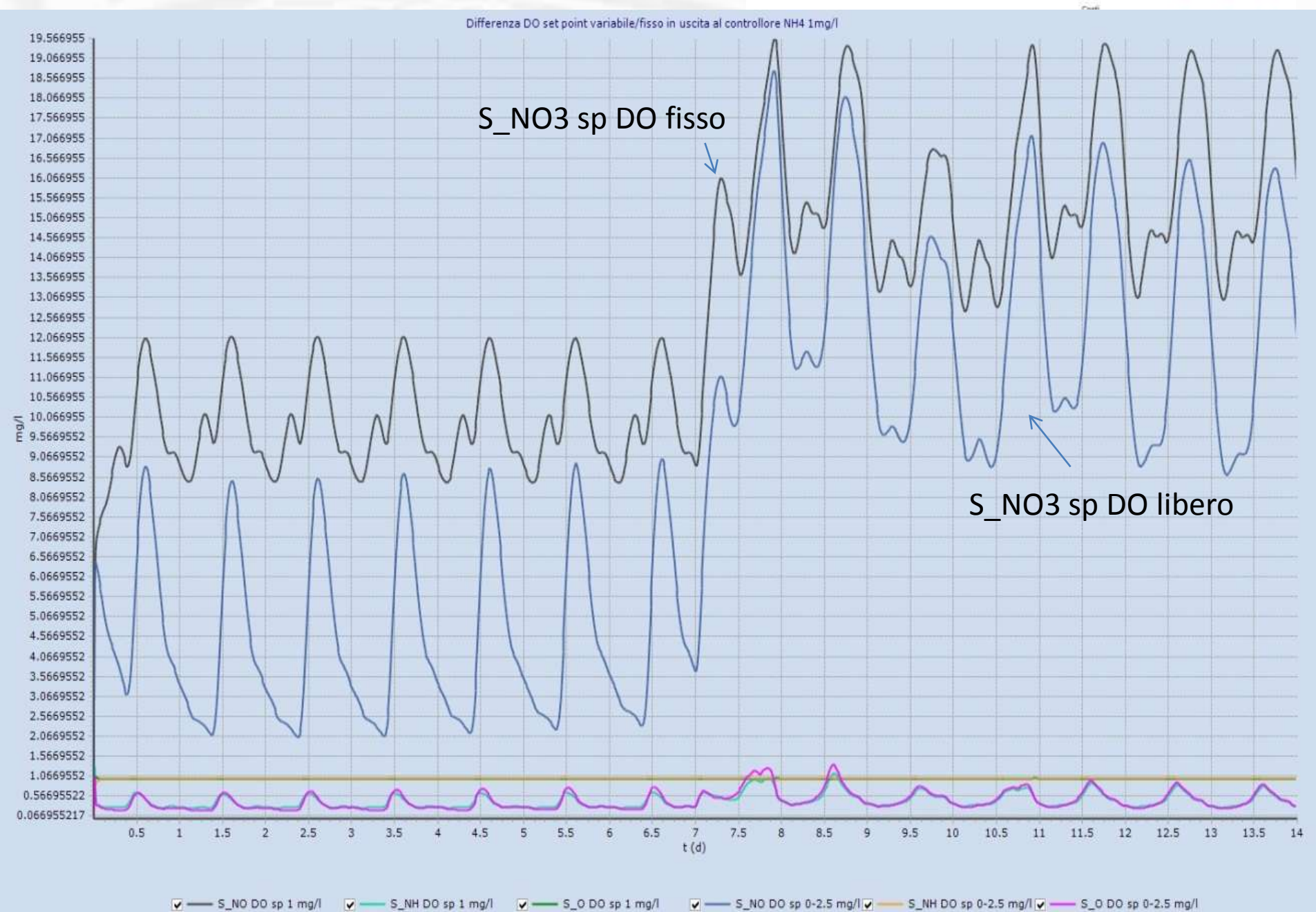


# DO controllato dalla concentrazione di ammoniaca in vasca aerobica

| Tipologia di controllore                 | PI                      | Unità                                        |
|------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------|
| Guadagno Proporzionale ( $K_p$ )         | -10                     | $\text{m}^3 (\text{g N})^{-1} \text{d}^{-1}$ |
| Costante integrale di tempo ( $\tau_i$ ) | 50                      | minuti                                       |
| Variabile controllata                    | $S_{\text{NH}}$ in aero |                                              |
| Set point                                | 1.5-1                   | mg/l                                         |
| Variabile manipolata (VM)                | ys nel CTL DO           | mg/l                                         |



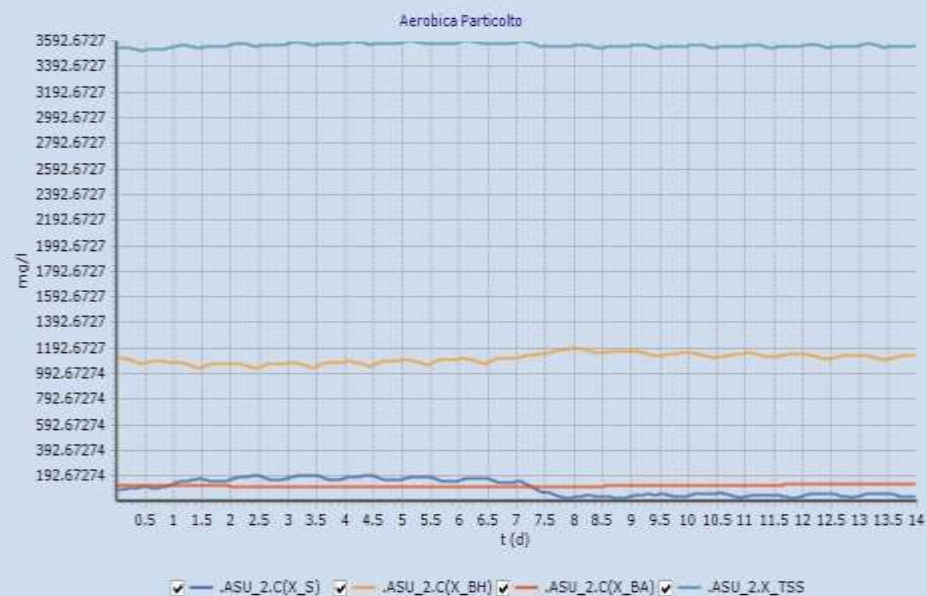
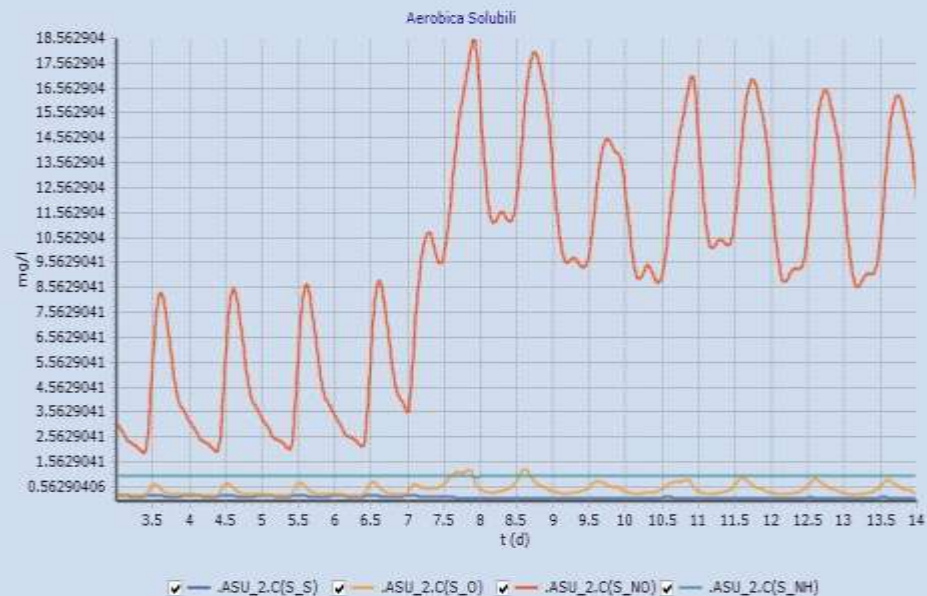
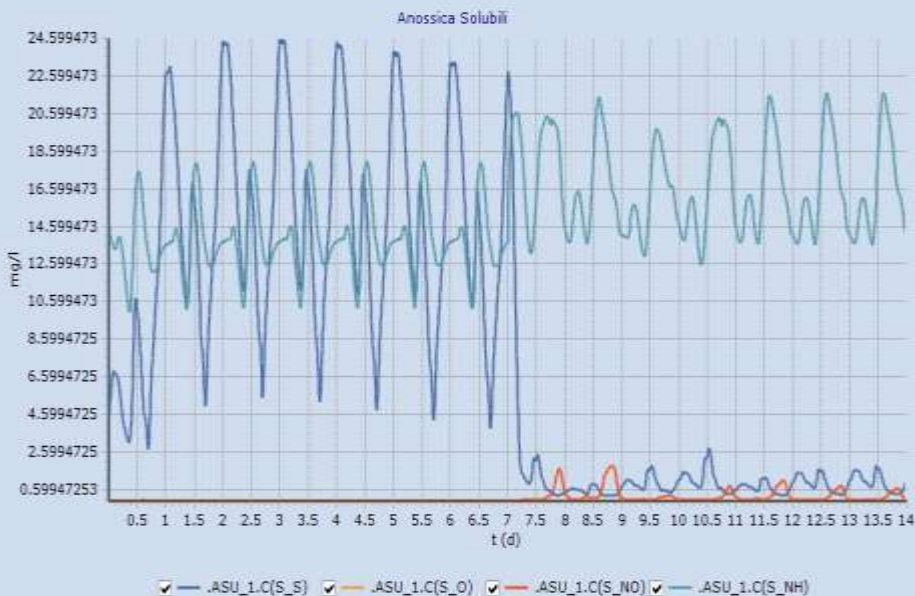
# DO controllato dalla concentrazione di ammoniaca in vasca aerobica





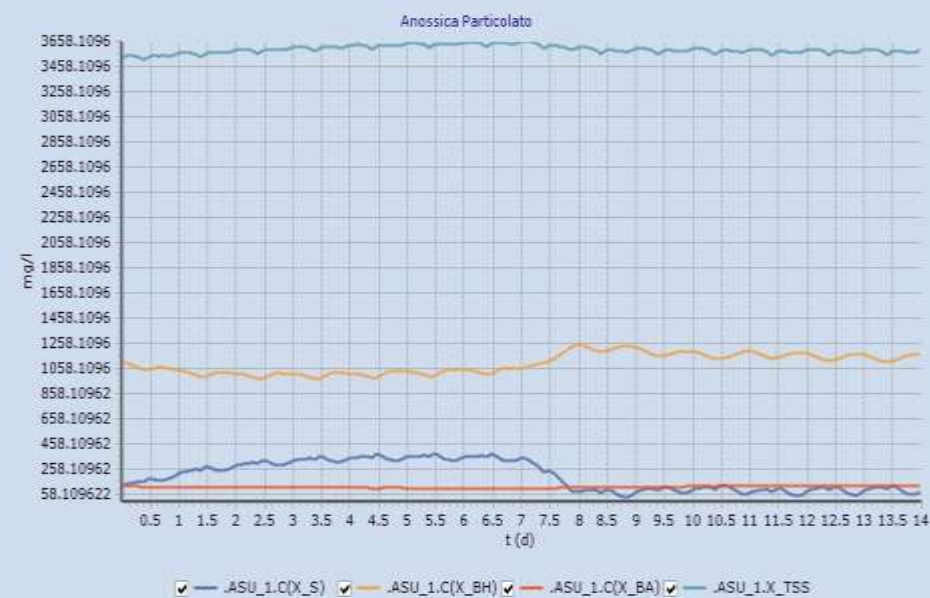
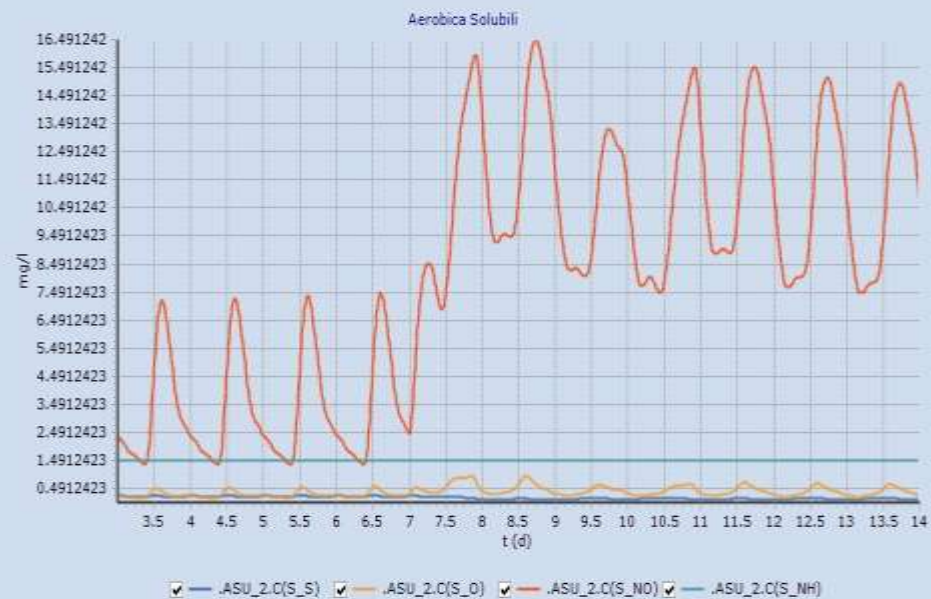
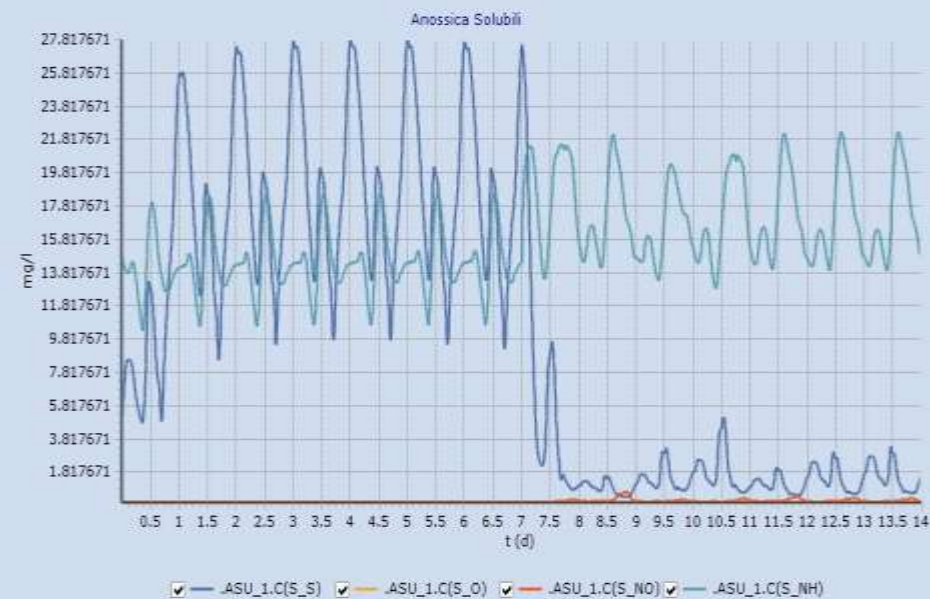
# DO controllato dalla concentrazione di ammoniaca in vasca aerobica

NH<sub>4</sub> sp 1 mg/l



# DO controllato dalla concentrazione di ammoniaca in vasca aerobica

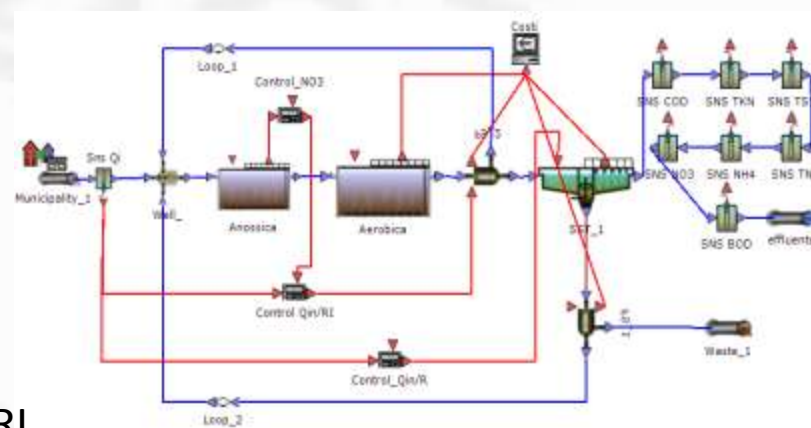
NH<sub>4</sub> sp 1,5 mg/l



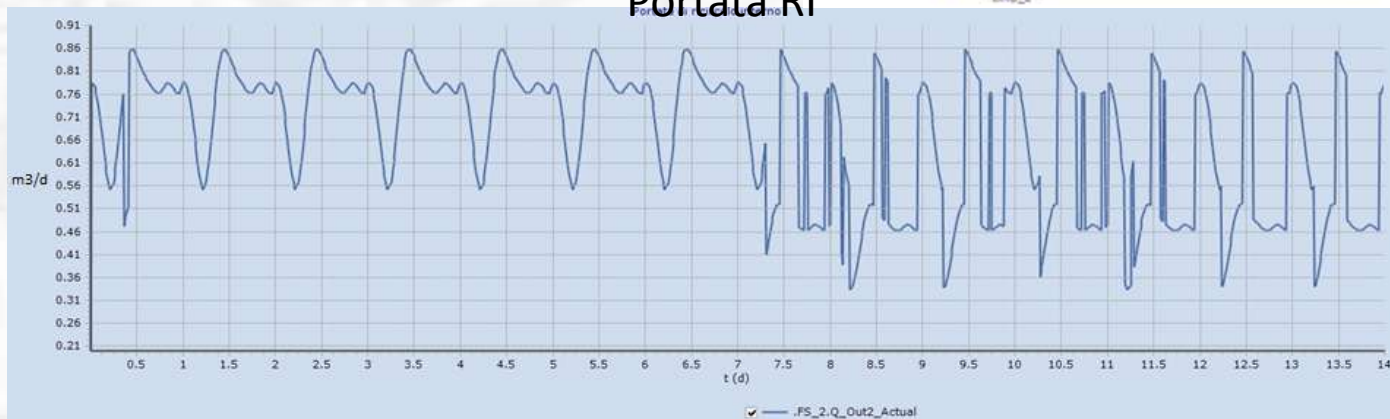


# Modulazione del ricircolo interno con controllo dell'azoto nitrico in vasca anossica

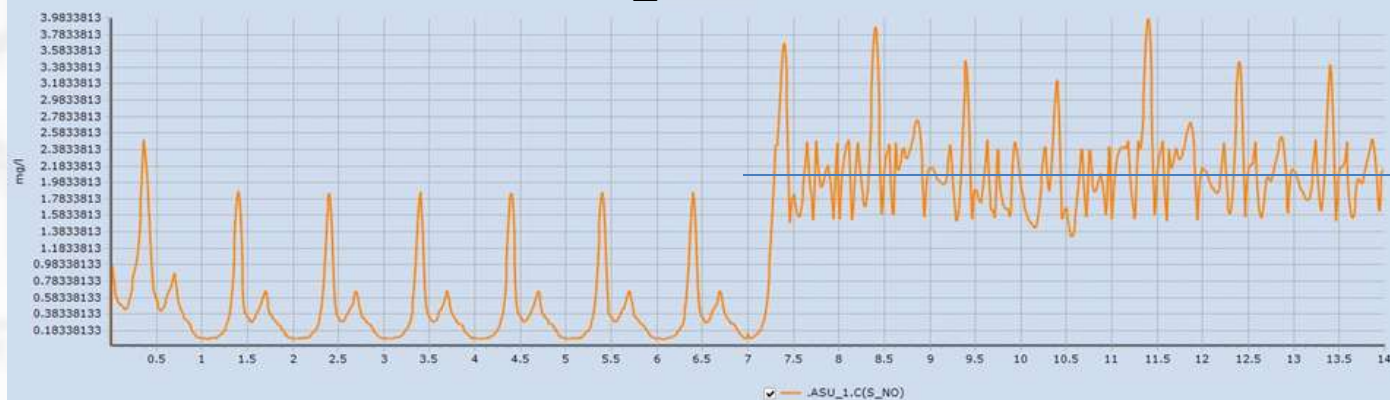
| 1                         | ON/OFF                | Unità       |
|---------------------------|-----------------------|-------------|
| y_S (set point)           | 2                     | mg/l        |
| y_min                     | 1.5                   | mg/l        |
| y_max                     | 2.5                   | mg/l        |
| Variabile controllata     | NO3 in anox           |             |
| Variabile manipolata (VM) | Constant factor in RI | 0,8<br>1,65 |



Portata RI

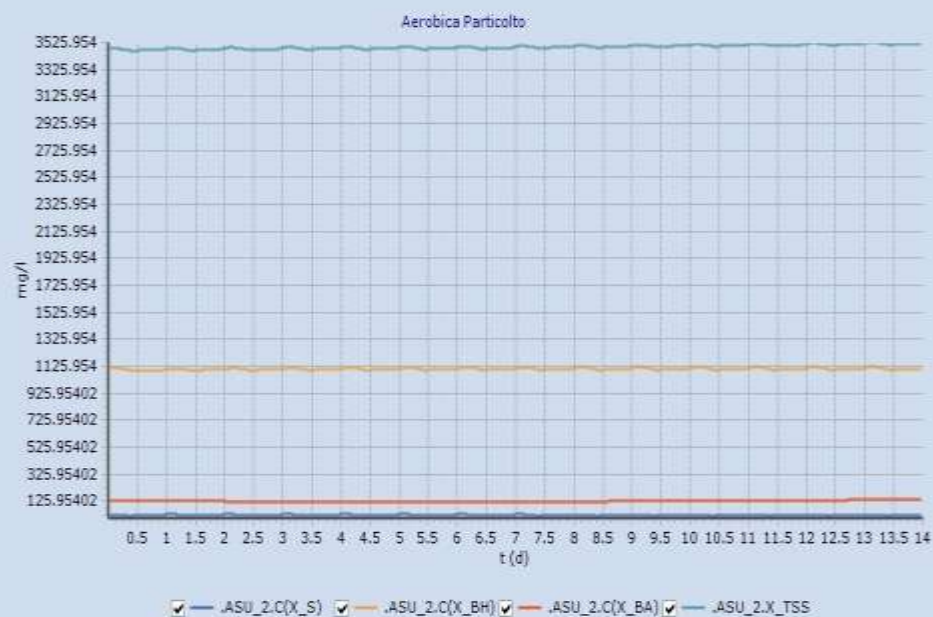
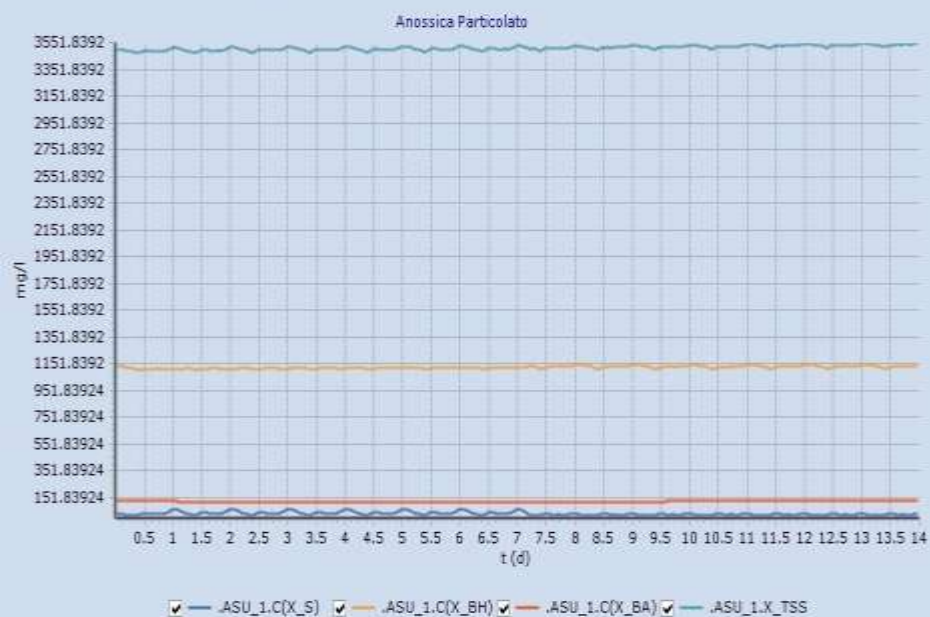
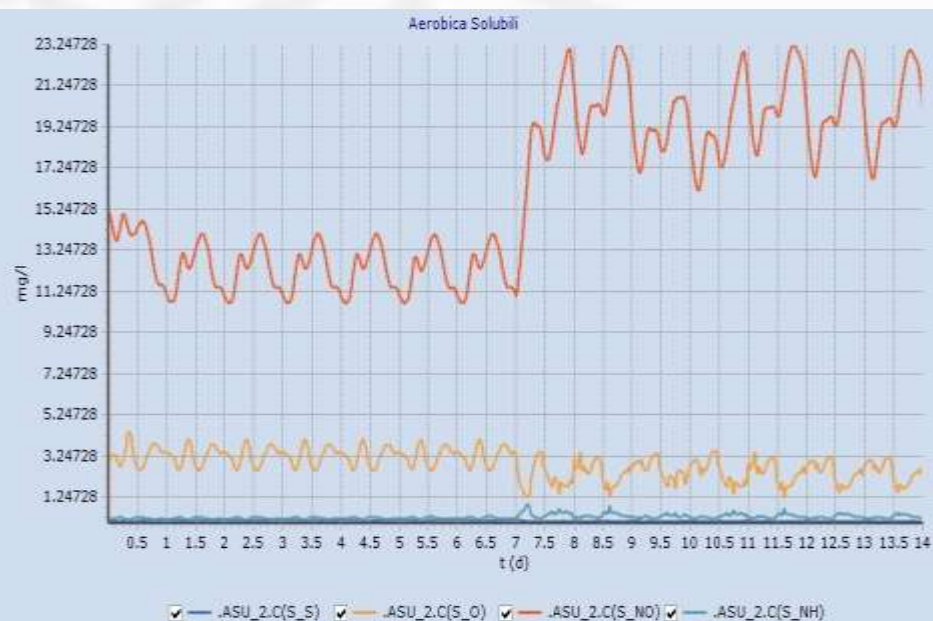
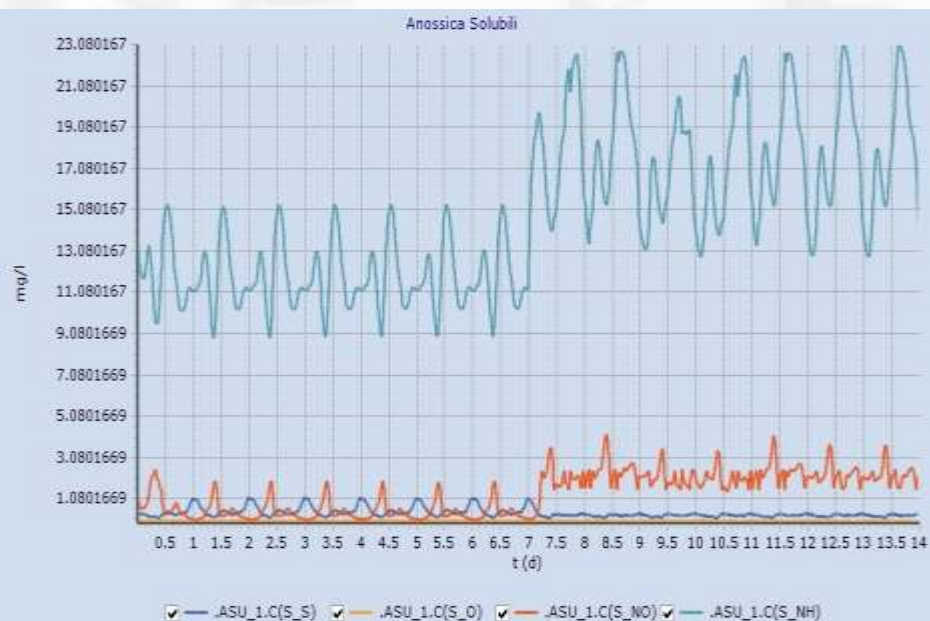


S\_NO3 Anox



isteresi

# Modulazione del ricircolo interno con controllo dell'azoto nitrico in vasca anossica



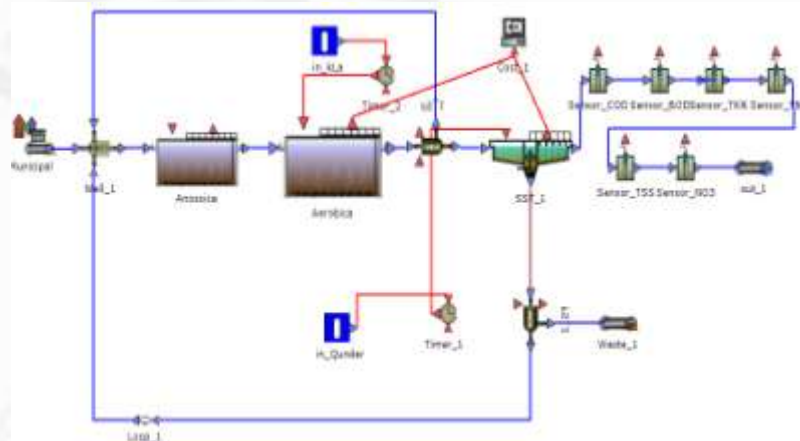


# IMPLEMENTAZIONE E SIMULAZIONI DI STRATEGIE DI CONTROLLO

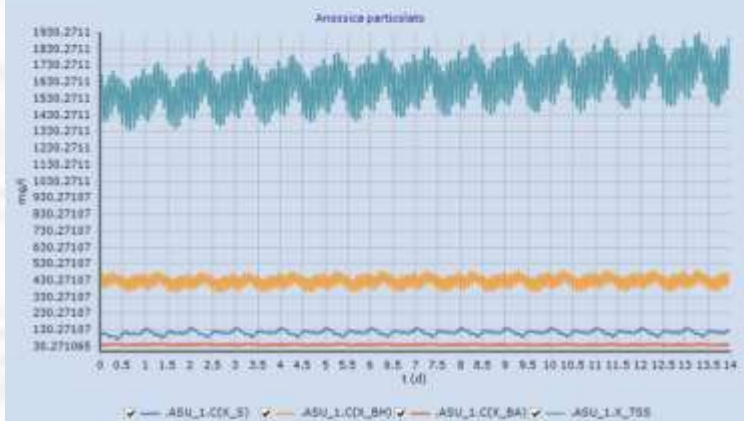
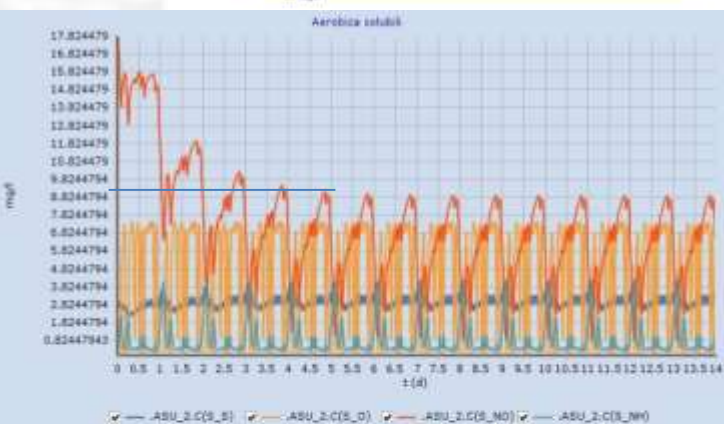
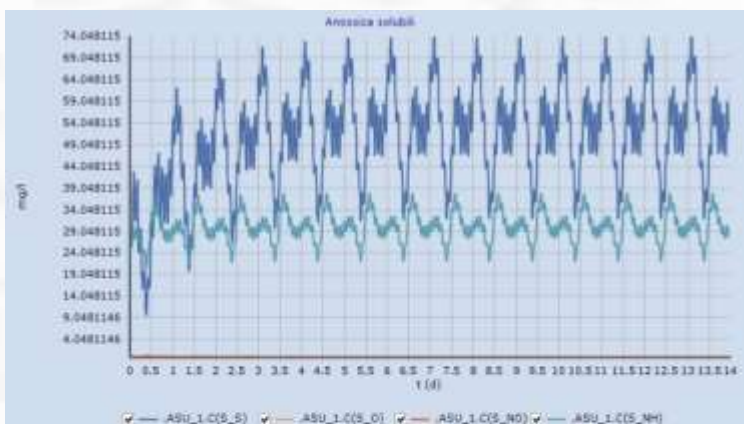
## IMPIANTO REALE

Q RI ATTIVATA = 1,65 Qin

545 m<sup>3</sup>/d



## SENZA RICIRCOLO



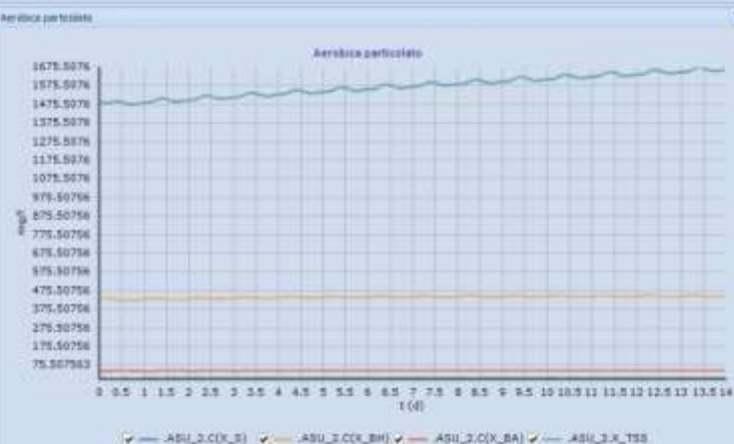
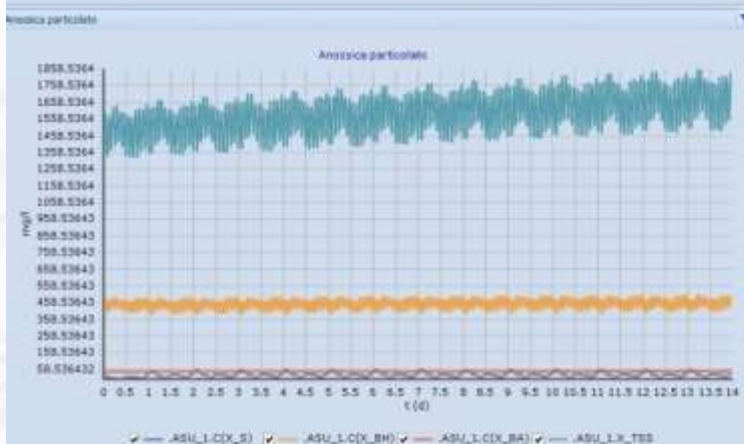
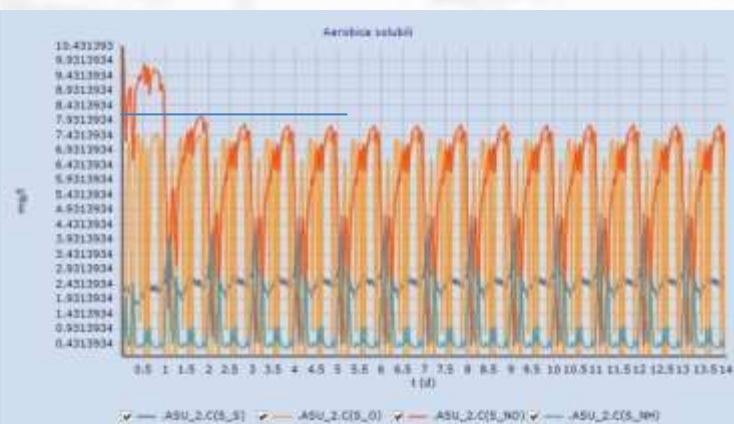
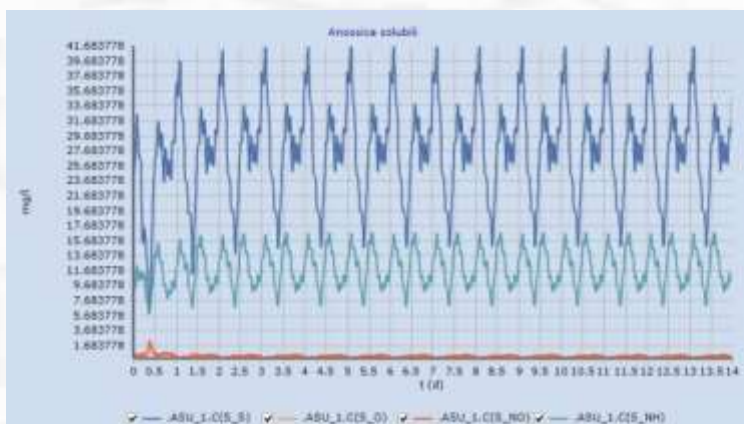
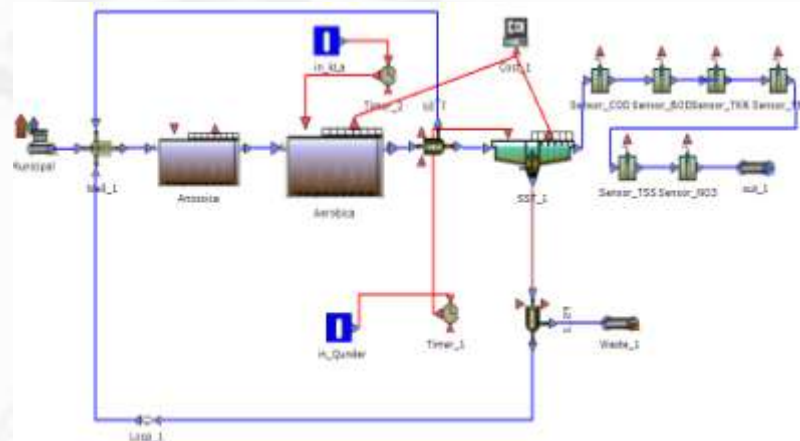
# IMPLEMENTAZIONE E SIMULAZIONI DI STRATEGIE DI CONTROLLO

## IMPIANTO REALE

Q RI ATTIVATA = 1,65 Qin

545 m<sup>3</sup>/d

CON RICIRCOLO

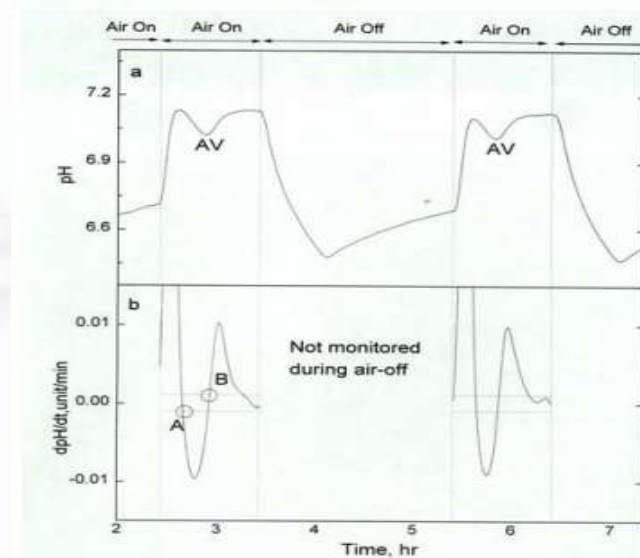
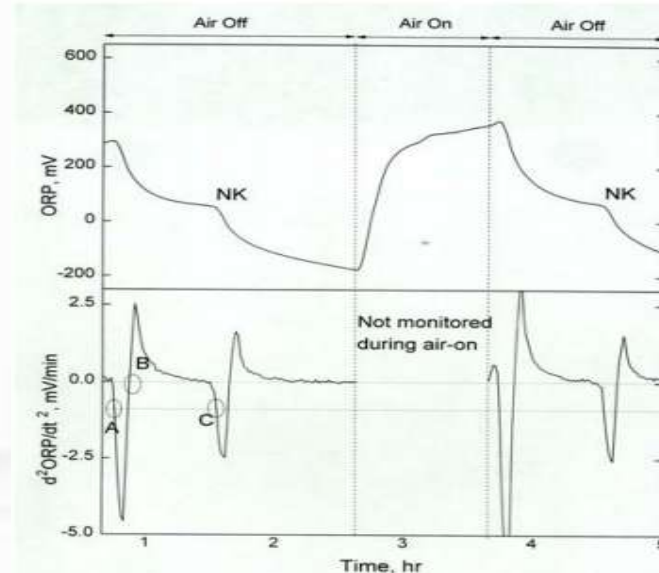
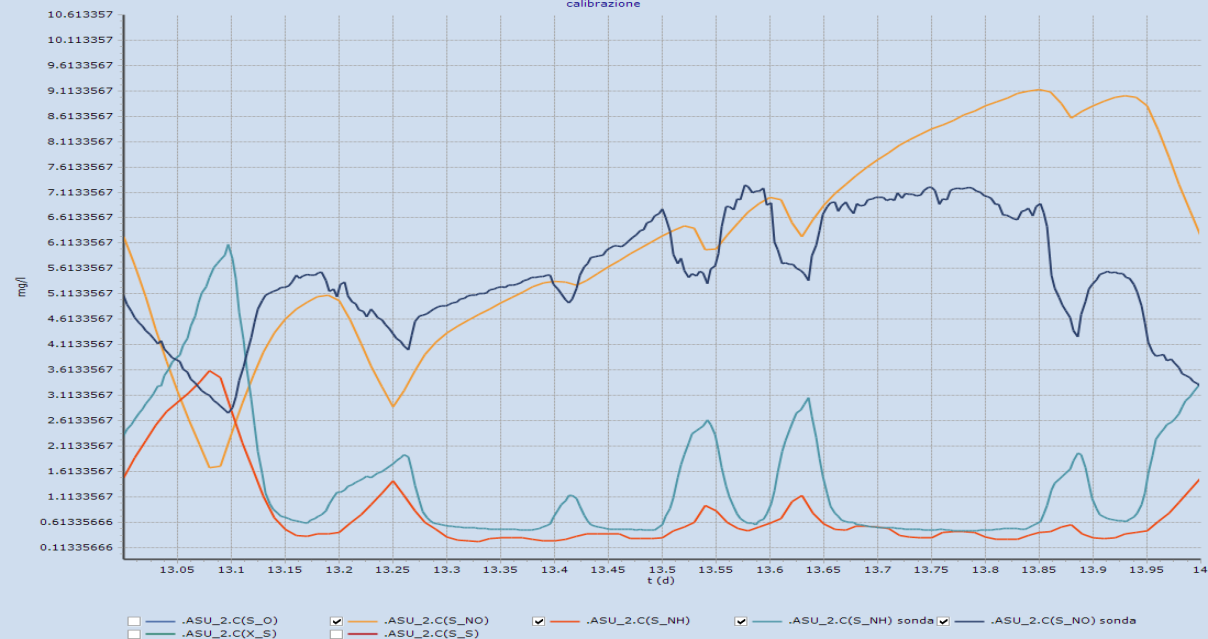
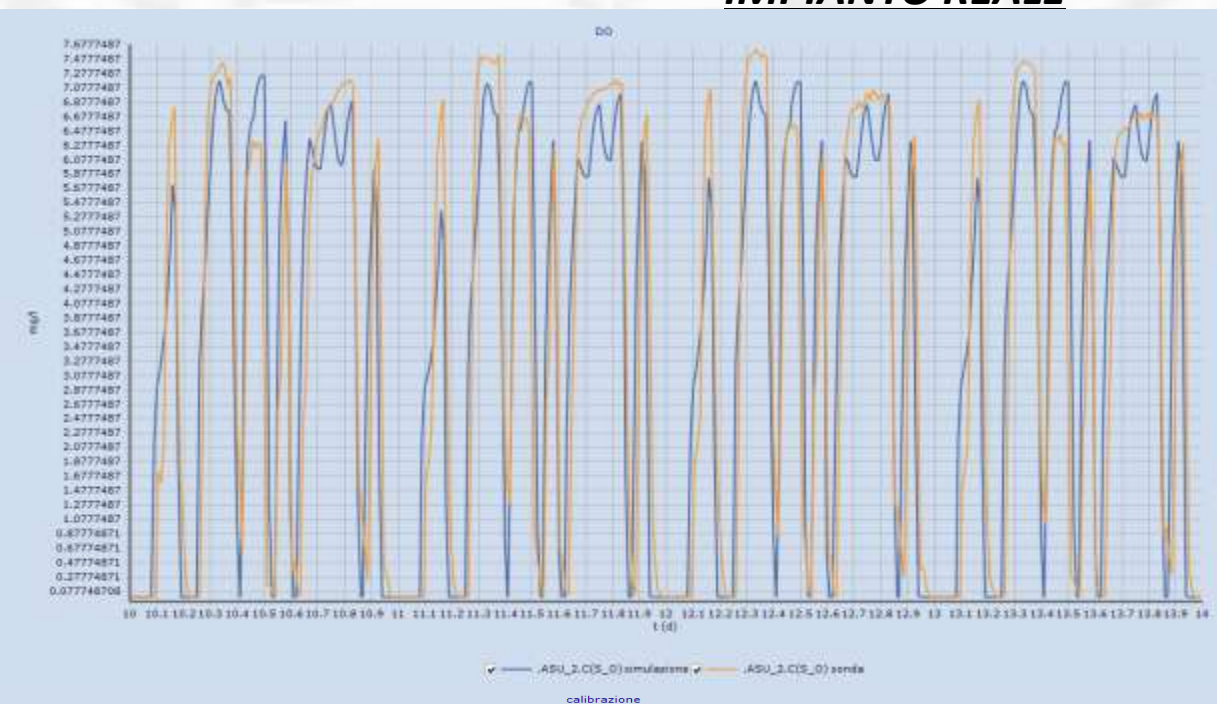


# IMPLEMENTAZIONE E SIMULAZIONI DI STRATEGIE DI CONTROLLO

## IMPIANTO REALE

Possibile controllo pH ORP

Ammonia valley fine nitrificazione  
Nitrate knee fine denitrificazione





# VALUTAZIONE ECONOMICA- QUALITATIVA DELLE STRATEGIE DI CONTROLLO

## IMPIANTO REALE

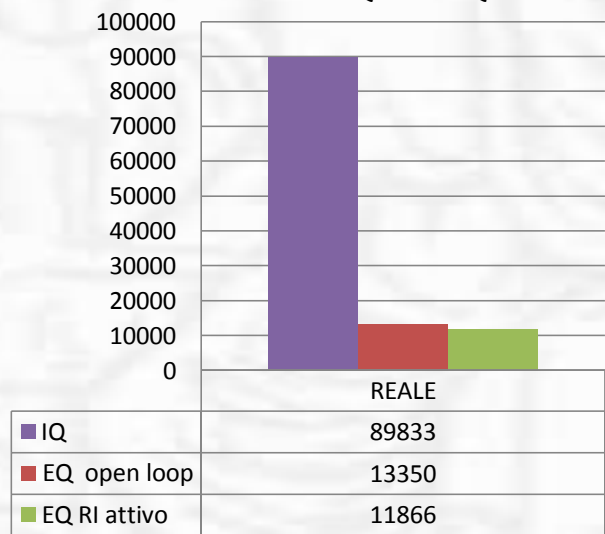
Approccio Benchmark \*

$$EQ = \frac{1}{T \cdot 1000} \int_{t_0}^{t_0 + T_{days}} [PU_{TSS}(t) + PU_{COD}(t) + PU_{BOD}(t) + PU_{TKN}(t) + PU_{NO}(t)] Q_e(t) dt$$

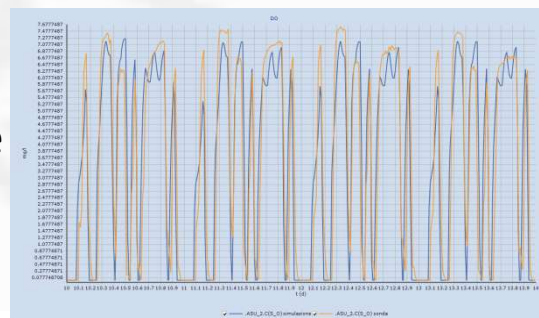
$\beta_i$  factors

|                                      |                 |    |
|--------------------------------------|-----------------|----|
| $PU_{TSS}(t) = \beta_{TSS} TSS_e(t)$ | $\beta_{TSS} =$ | 2  |
| $PU_{COD}(t) = \beta_{COD} COD_e(t)$ | $\beta_{COD} =$ | 1  |
| $PU_{BOD}(t) = \beta_{BOD} BOD_e(t)$ | $\beta_{BOD} =$ | 2  |
| $PU_{TKN}(t) = \beta_{TKN} TKN_e(t)$ | $\beta_{TKN} =$ | 20 |
| $PU_{NO}(t) = \beta_{NO} NO_e(t)$    | $\beta_{NO} =$  | 20 |

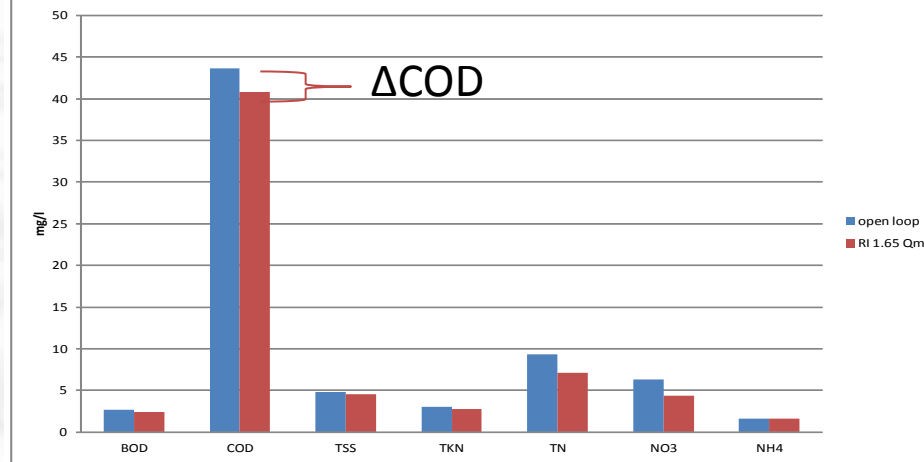
### IQI e EQI



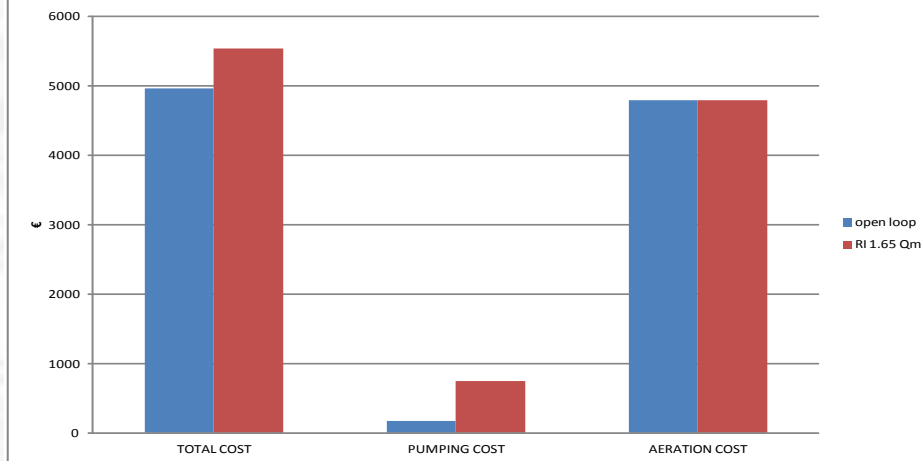
Valore integrale  
kLa = 1136



### Concentrazioni medie effluente



### Costi



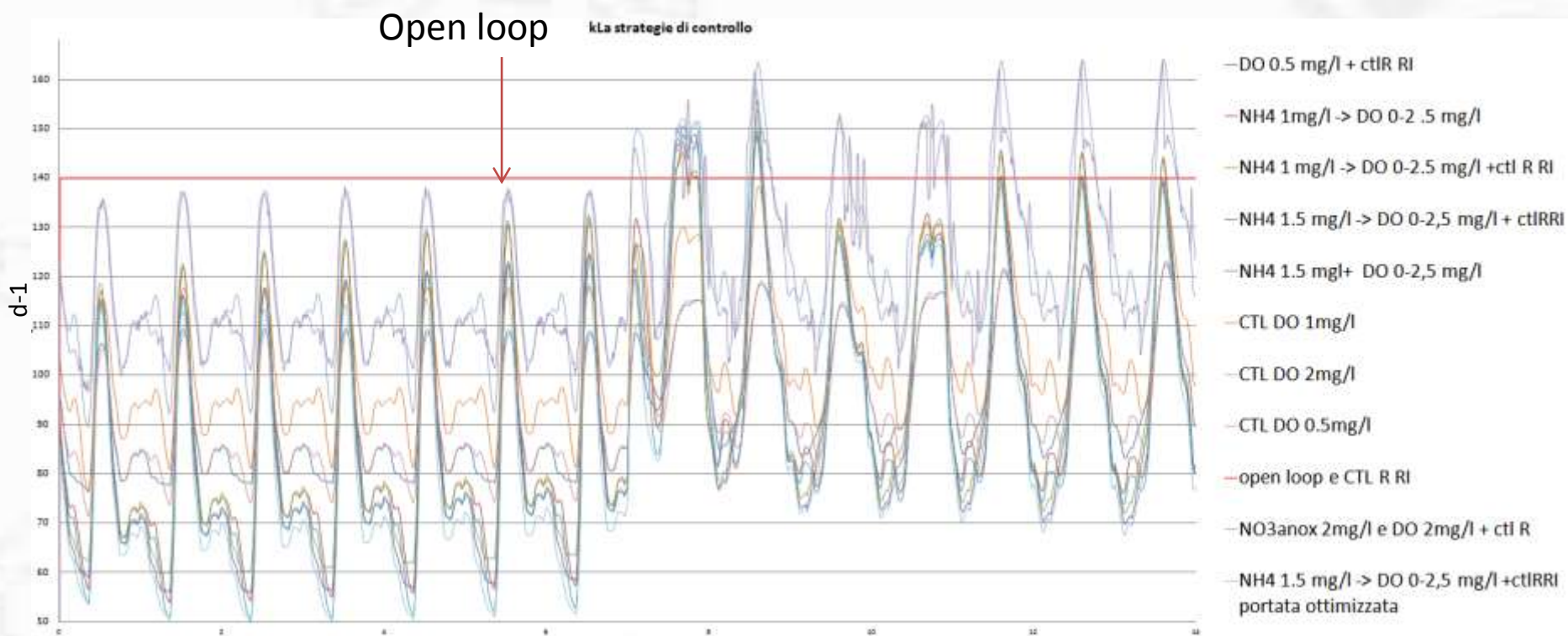
\* COST (Cooperation in Science and Technology)  
Copp (2002) e Jeppson et al., (2004).



# VALUTAZIONE ECONOMICA- QUALITATIVA DELLE STRATEGIE DI CONTROLLO

## IMPIANTO PILOTA

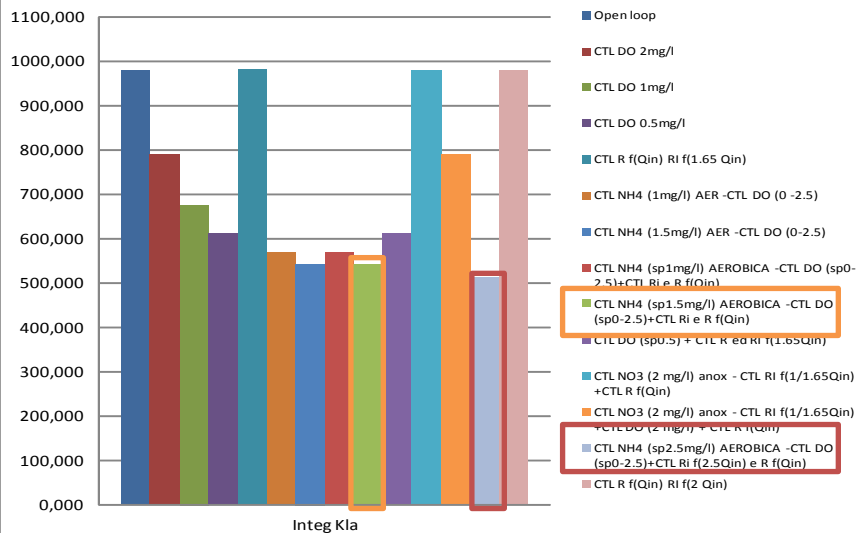
$kLa$



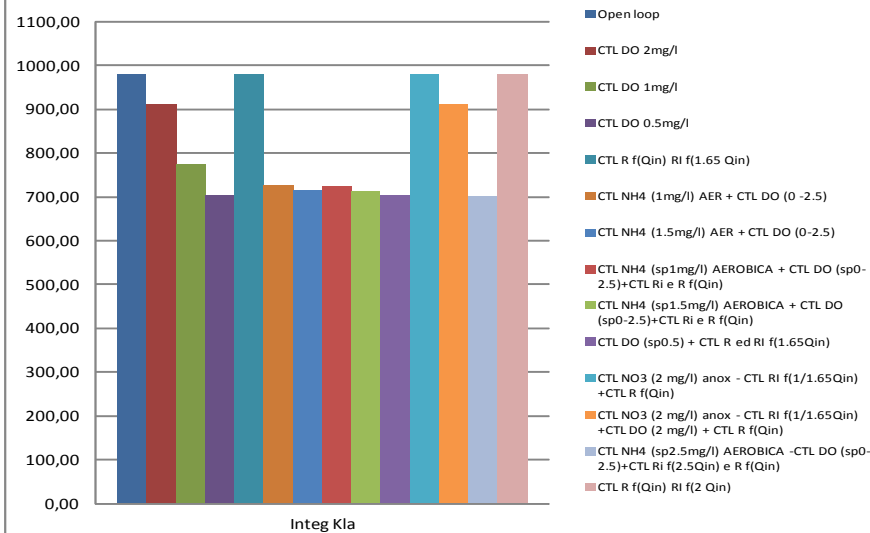
# VALUTAZIONE ECONOMICA- QUALITATIVA DELLE STRATEGIE DI CONTROLLO

## IMPIANTO PILOTA

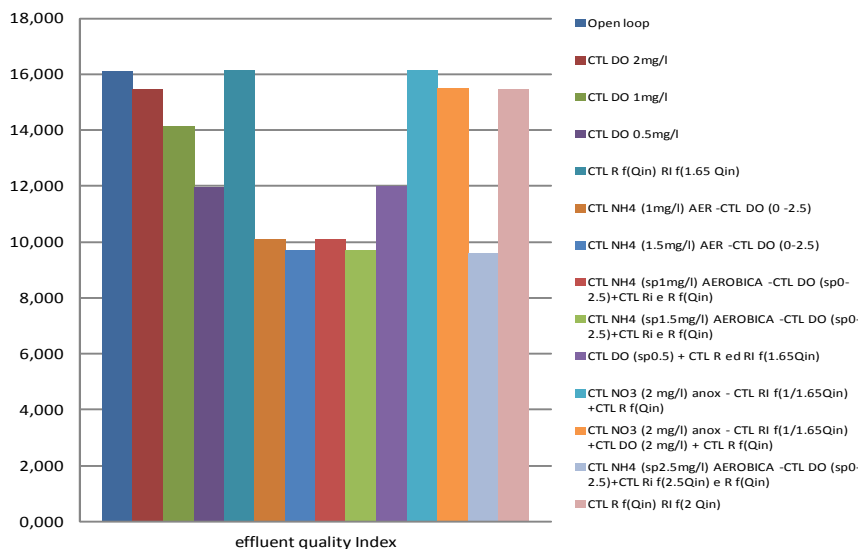
Kla giorni 1-7



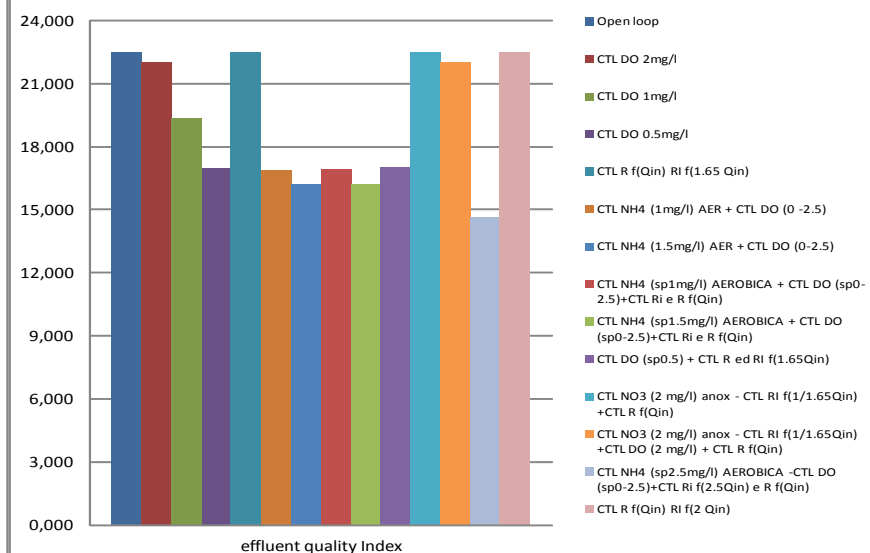
Kla giorni 7-14



effluent quality index giorni 1-7



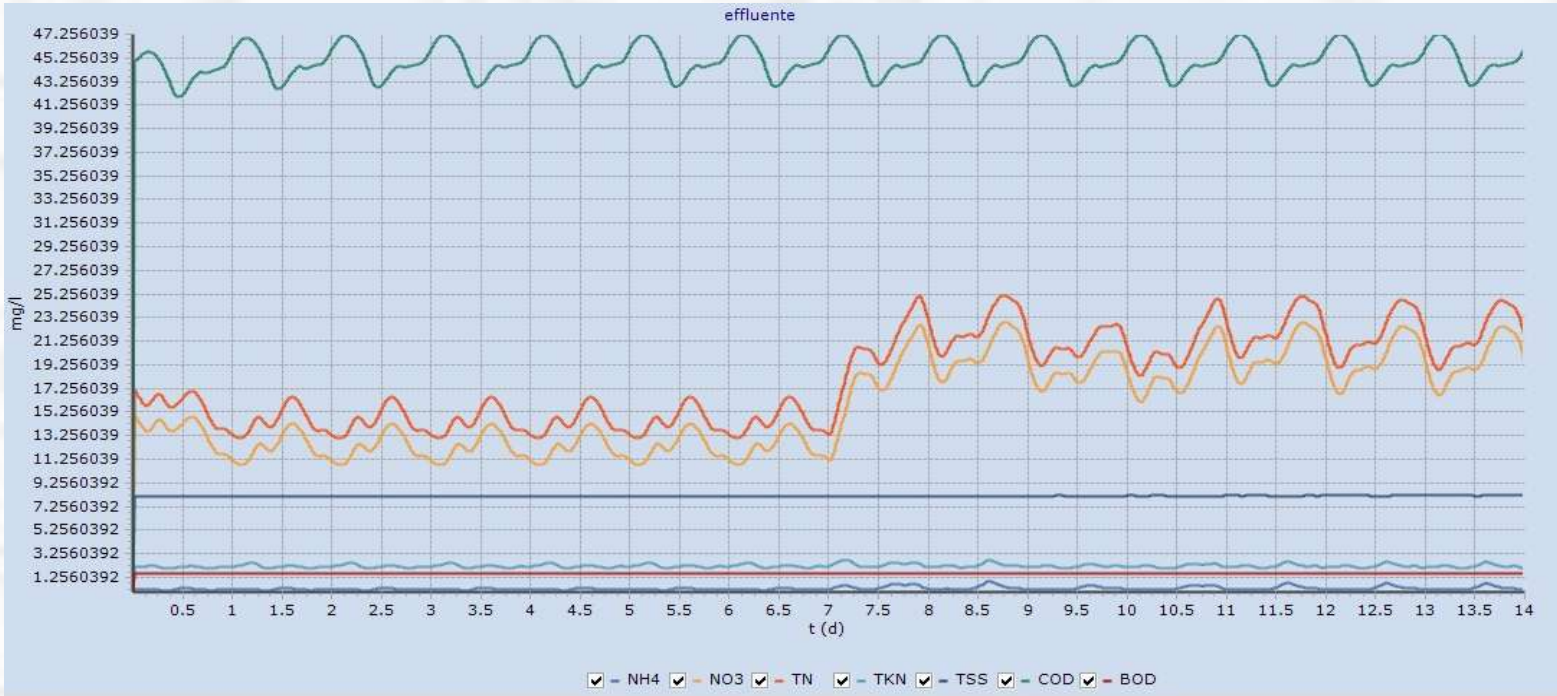
effluent quality index giorni 7-14



# VALUTAZIONE ECONOMICA- QUALITATIVA DELLE STRATEGIE DI CONTROLLO

## IMPIANTO PILOTA

| Effluent TN                                            | Open loop | CTL DO 2 mg/l | DO CTL 1mg/l | DO CTL 0.5mg/l | DO CTL f(Qin) f(1.65 Qin) | R CTL RI f(Qin) (2 Qin) | R CTL RI f AER -CTL DO (0 - 2.5) | CTL NH4 (1mg/l) DO (0 - 1.5mg/l) AER -CTL DO (0-2.5) | CTL NH4 (sp1mg/l) AEROBICA -CTL DO (sp0-2.5)+CTL Ri f(1.65 Qin) e R f(Qin) | CTL NH4 (sp1.5mg/l) AEROBICA -CTL DO (sp0-2.5)+CTL Ri e R f(Qin) | CTL NH4 (sp2.5mg/l) AEROBICA -CTL DO (sp0-2.5)+CTL Ri f(2.5 Qin) e R f(Qin) | CTL DO (sp0.5) +CTL R ed Ri f(1.65Qin) | CTL NO3 (2 mg/l) anox - CTL RI f(1/1.65Qin) +CTL R (2 mg/l) +CTL R f(Qin) | CTL NO3 (2 mg/l) anox - CTL RI f(1/1.65Qin) +CTL R f(Qin) |
|--------------------------------------------------------|-----------|---------------|--------------|----------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Mean                                                   | 18.36206  | 17.49798      | 15.27485     | 12.73252       | 18.17786                  | 17.8228                 | 11.61138923                      | 10.99762244                                          | 11.62464                                                                   | 11.00281                                                         | 10.06829                                                                    | 12.81375                               | 18.17583                                                                  | 17.54233                                                  |
| Standard Deviation                                     | 4.023699  | 4.021387      | 3.372201     | 3.349349       | 3.854109                  | 4.238428                | 4.60832596                       | 4.434636894                                          | 4.580654                                                                   | 4.396931                                                         | 3.576297                                                                    | 3.300996                               | 3.863872                                                                  | 3.991051                                                  |
| Number of Upper bound Violations 15 mg/l               | 14        | 10            | 10           | 8              | 14                        | 8                       | 7                                | 7                                                    | 7                                                                          | 7                                                                | 7                                                                           | 9                                      | 14                                                                        | 9                                                         |
| Percentage of Time in Violation of Upper bound 15 mg/l | 70.64215  | 61.66183      | 49.09641     | 23.87356       | 71.92117                  | 61.4                    | 23.73514177                      | 21.71618986                                          | 23.67822                                                                   | 21.58811                                                         | 13.90703                                                                    | 24.91854                               | 71.92681                                                                  | 61.3775                                                   |



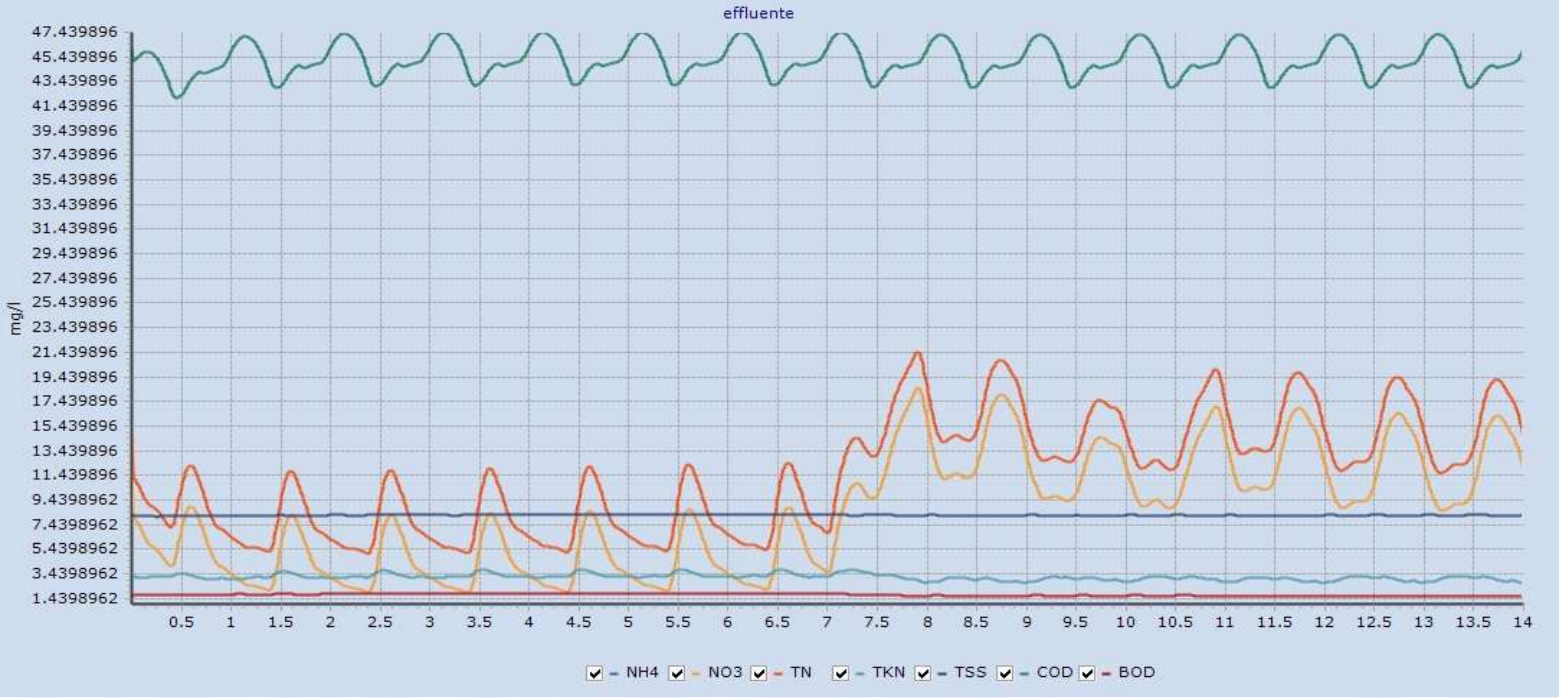
solo per valutare la strategia; l'impianto non è in area sensibile

# VALUTAZIONE ECONOMICA- QUALITATIVA DELLE STRATEGIE DI CONTROLLO

## IMPIANTO PILOTA

Superamenti del valore 15 mg/l per TN nell’effluente

| Effluent TN                                            | Open loop | CTL<br>2mg/l | DO<br>CTL<br>1mg/l | DO<br>CTL<br>0.5mg/l | DO<br>CTL<br>f(Qin)<br>f(1.65 Qin) | R<br>CTL<br>RI<br>f(Qin)<br>(2 Qin) | R<br>CTL<br>RI<br>f(AER -<br>CTL DO<br>(0 -<br>1.5mg/l)<br>2.5) | CTL<br>NH4<br>(1mg/l)<br>DO<br>(0 -<br>1.5mg/l)<br>DO<br>(0 -<br>2.5)<br>+CTL<br>f(1.65<br>Qin)<br>e R<br>f(Qin) | CTL<br>NH4<br>(sp0-<br>2.5)<br>+CTL<br>f(2.5<br>Qin)<br>e R<br>f(Qin) | CTL<br>NH4<br>(sp1mg/l)<br>AEROBICA -<br>CTL<br>DO<br>(sp0-<br>2.5)<br>+CTL<br>f(1.65<br>Qin)<br>e R<br>f(Qin) | CTL<br>NH4<br>(sp2.5mg/l)<br>AEROBICA -<br>CTL<br>DO<br>(sp0-<br>2.5)<br>+CTL<br>f(2.5<br>Qin)<br>e R<br>f(Qin) | CTL<br>NO3<br>(2 mg/l)<br>anox -<br>CTL<br>RI<br>f(1/1.65Qin)<br>+CTL<br>R<br>f(Qin)    |                                                                                         | CTL<br>NO3<br>(2 mg/l)<br>anox -<br>CTL<br>RI<br>f(1/1.65Qin)<br>+CTL<br>R<br>f(Qin)    |                                                                                         |
|--------------------------------------------------------|-----------|--------------|--------------------|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                        |           |              |                    |                      |                                    |                                     |                                                                 |                                                                                                                  |                                                                       | CTL<br>DO<br>(sp0-<br>2.5)<br>+CTL<br>f(1.65<br>Qin)<br>e R<br>f(Qin)                                          | CTL<br>DO<br>(sp0-<br>2.5)<br>+CTL<br>f(2.5<br>Qin)<br>e R<br>f(Qin)                                            | CTL<br>DO<br>(sp0.5)<br>+<br>anox -<br>CTL<br>RI<br>f(1/1.65Qin)<br>+CTL<br>R<br>f(Qin) | CTL<br>DO<br>(sp0.5)<br>+<br>anox -<br>CTL<br>RI<br>f(1/1.65Qin)<br>+CTL<br>R<br>f(Qin) | CTL<br>DO<br>(sp0.5)<br>+<br>anox -<br>CTL<br>RI<br>f(1/1.65Qin)<br>+CTL<br>R<br>f(Qin) | CTL<br>DO<br>(sp0.5)<br>+<br>anox -<br>CTL<br>RI<br>f(1/1.65Qin)<br>+CTL<br>R<br>f(Qin) |
| Mean                                                   | 18.36206  | 17.49798     | 15.27485           | 12.73252             | 18.17786                           | 17.8228                             | 11.61138923                                                     | 10.99762244                                                                                                      | 11.62464                                                              | 11.00281                                                                                                       | 10.06829                                                                                                        | 12.81375                                                                                | 18.17583                                                                                | 17.54233                                                                                |                                                                                         |
| Standard Deviation                                     | 4.023699  | 4.021387     | 3.372201           | 3.349349             | 3.854109                           | 4.238428                            | 4.60832596                                                      | 4.434636894                                                                                                      | 4.580654                                                              | 4.396931                                                                                                       | 3.576297                                                                                                        | 3.300996                                                                                | 3.863872                                                                                | 3.991051                                                                                |                                                                                         |
| Number of Upper bound Violations 15 mg/l               | 14        | 10           | 10                 | 8                    | 14                                 | 8                                   | 7                                                               | 7                                                                                                                | 7                                                                     | 7                                                                                                              | 7                                                                                                               | 9                                                                                       | 14                                                                                      | 9                                                                                       |                                                                                         |
| Percentage of Time in Violation of Upper bound 15 mg/l | 70.64215  | 61.66183     | 49.09641           | 23.87356             | 71.92117                           | 61.4                                | 23.73514177                                                     | 21.71618986                                                                                                      | 23.67822                                                              | 21.58811                                                                                                       | 13.90703                                                                                                        | 24.91854                                                                                | 71.92681                                                                                | 61.3775                                                                                 |                                                                                         |



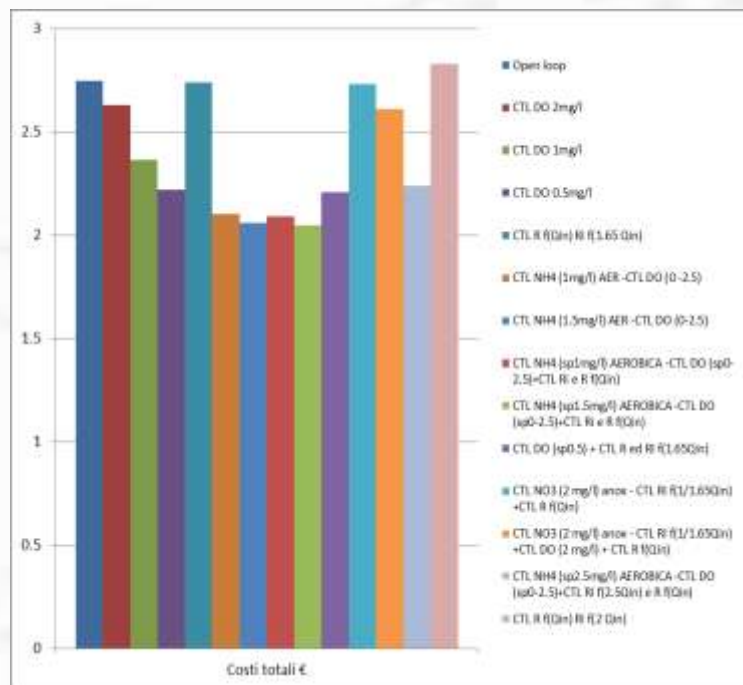
solo per valutare la strategia; l’impianto non è in area sensibile



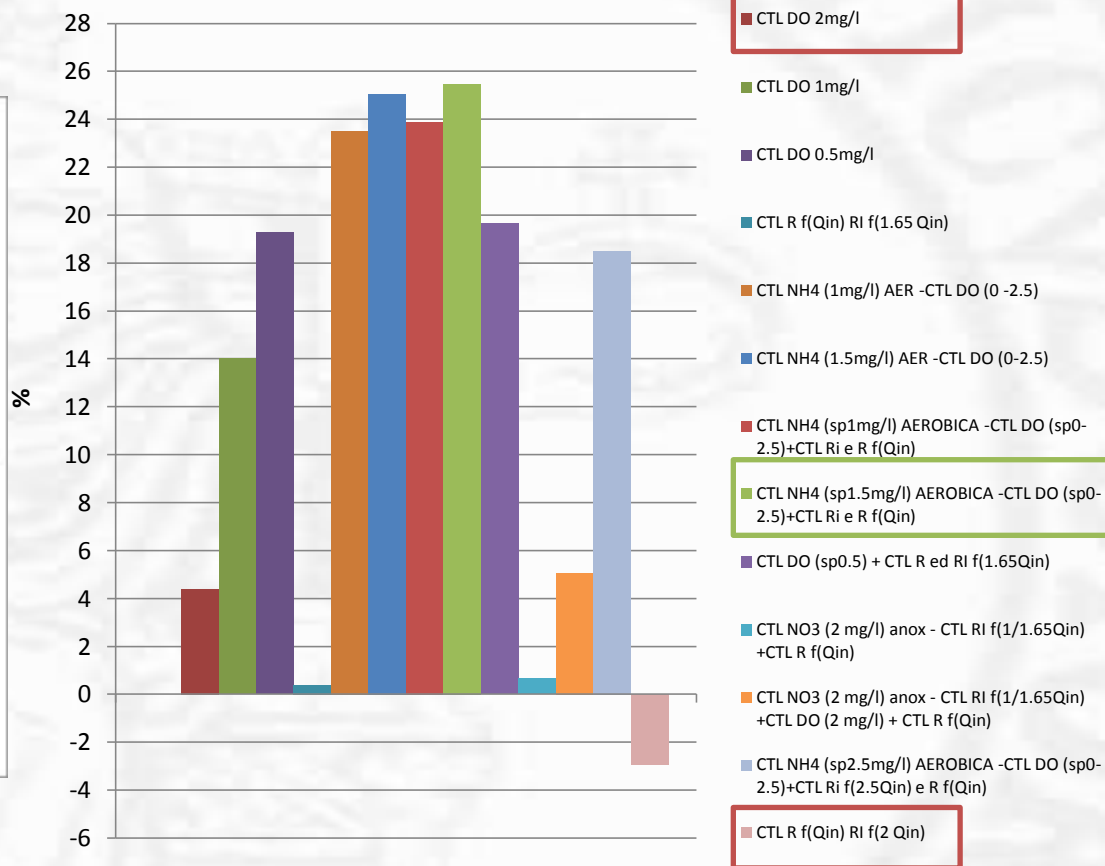
# VALUTAZIONE ECONOMICA- QUALITATIVA DELLE STRATEGIE DI CONTROLLO

## IMPIANTO PILOTA

### Costi



### Guadagno percentuale



## **CONCLUSIONI**

- La calibrazione ha portato a buoni risultati per la simulazione del funzionamento dell'impianto a regime
- Risposta sensata del modello alla perturbazione del carico ammoniacale dell'influente
- Valido strumento di valutazione di strategie di controllo, che in simulazione si confermano decisamente utili per l'ottimizzazione dei processi e la riduzione dei costi

## **OBIETTIVI FUTURI**

**Attuazione pratica su impianto pilota di semplici strategie di controllo :**

**Modulazione delle portate di ricircolo con attuazione di elettrovalvole**

**Regolazione dell'aerazione con controllori PI – PID mediante relazioni sui segnali indiretti**

**Monitoraggio vasca di denitrificazione reale**

**Studio sul controllo pH-ORP per le fasi Nitro/Denitro in vasca di ossidazione**