



Università degli studi di Firenze

Facoltà di Ingegneria

*Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria
per la Tutela dell'Ambiente e del Territorio*

Anno Accademico 2005/2006

*“Controllo dell’ossigeno disciolto
in un impianto di depurazione
biologica in funzione della
nitrificazione”*

Docente:

Prof. Ing. Stefano Marsili Libelli

Studente:

Lisa Zanieri

Indice

IL CONTROLLO DELL'AREAZIONE	3
1.1. Introduzione.....	3
1.2. Valutazione della qualità e dei consumi energetici	4
1.3. Il controllo fuzzy	7
1.4. Il controllo PID	13
ANALISI DEI RISULTATI.....	17
2.1. Risposta del modello in assenza di controllo.....	17
2.2. Risposta del modello con controllo PID sul DO	21
2.3. Risposta del modello con DO_{sp} variabile	24
Appendice.....	31

CAPITOLO 1

IL CONTROLLO DELL'AREAZIONE

1.1. Introduzione

Il controllo del funzionamento di un impianto di depurazione si rende necessario sia per garantire la qualità dell'effluente e il rispetto dei limiti di legge, sia per contenere le spese di gestione; in particolare, quest'ultimo aspetto sta assumendo un'importanza sempre maggiore a causa dei crescenti costi dell'energia.

Quest'elaborato è finalizzato a sviluppare in particolare un controllore dell'ossigeno disciolto per conseguire il duplice obiettivo di salvaguardia della qualità e di minimizzazione dell'energia impiegata per l'areazione. Lo schema a cui si fa riferimento è il seguente:

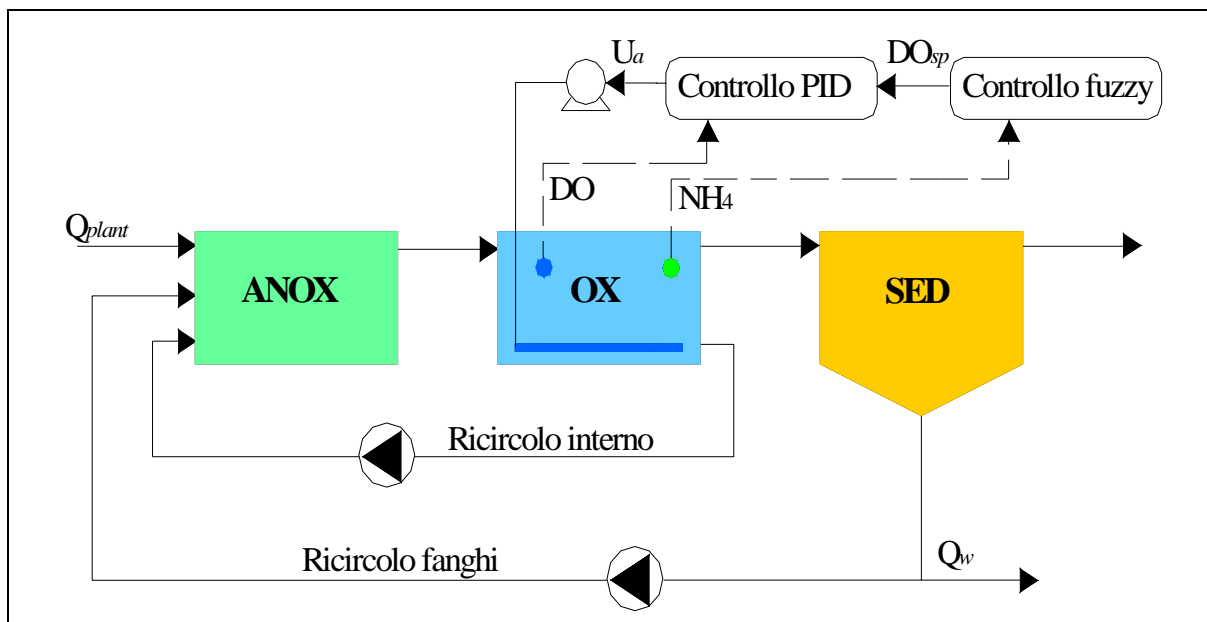


Figura 1.1 – Schema del tipo di controllo sviluppato.

Dato che il carico carbonioso in ingresso all'impianto viene quasi completamente consumato dal processo di denitrificazione, l'areazione nella vasca aerobica può essere dimensionata esclusivamente sulla base del fabbisogno di ossigeno richiesto dall'ossidazione dell'ammonio. Il principio da seguire è quello di erogare solo l'aria strettamente necessaria: basandosi su misure di NH_4^+ , un controllore fuzzy sceglie il valore di set-point per l'ossigeno disciolto in vasca aerobica; in cascata, un controllore PID valuta la differenza fra il DO_{sp} , così

determinato, e la concentrazione di DO misurata nel reattore e in funzione di tale valore comanda la portata d'aria da insufflare.

In questo lavoro, studiamo il funzionamento di un impianto di depurazione biologica composto da una vasca di predenitrificazione, da una vasca di ossidazione e da un sedimentatore secondario nei seguenti casi:

- assenza di controllo;
- controllo del DO mediante PID con DO_{sp} costante;
- controllo del DO, con DO_{sp} scelto da un controllore fuzzy in funzione della sola concentrazione dell'ammonio;
- controllo del DO, con DO_{sp} scelto da un controllore fuzzy in funzione sia della concentrazione dell'ammonio che della sua derivata temporale.

1.2. Valutazione della qualità e dei consumi energetici

Il modello utilizzato per le simulazioni è l'ASM3_2N, modificato rispetto alla configurazione standard mediante la riduzione del numero di vasche.

La sottostante tabella riassume le caratteristiche dell'impianto:

	Valore	Unità
Volume vasca anossica	2000	m ³
Volume vasca aerobica	3999	m ³
Volume sedimentatore	6000	m ³
Portata influente	18443	m ³ d ⁻¹
Portata di ricircolo	18446	m ³ d ⁻¹
Portata di ricircolo interno	55338	m ³ d ⁻¹
Portata di spurgo	385	m ³ d ⁻¹

Tabella 1. 1 - Caratteristiche dell'impianto.

I dati impiegati in ingresso sono le serie temporali (contenenti 14 giorni di dati di portata, COD, ammoniaca, alcalinità, campionati ad intervalli di 15 minuti) sviluppate nell'ambito del progetto Benchmark, corrispondenti alle condizioni meteorologiche di tempo secco ("Dry weather").

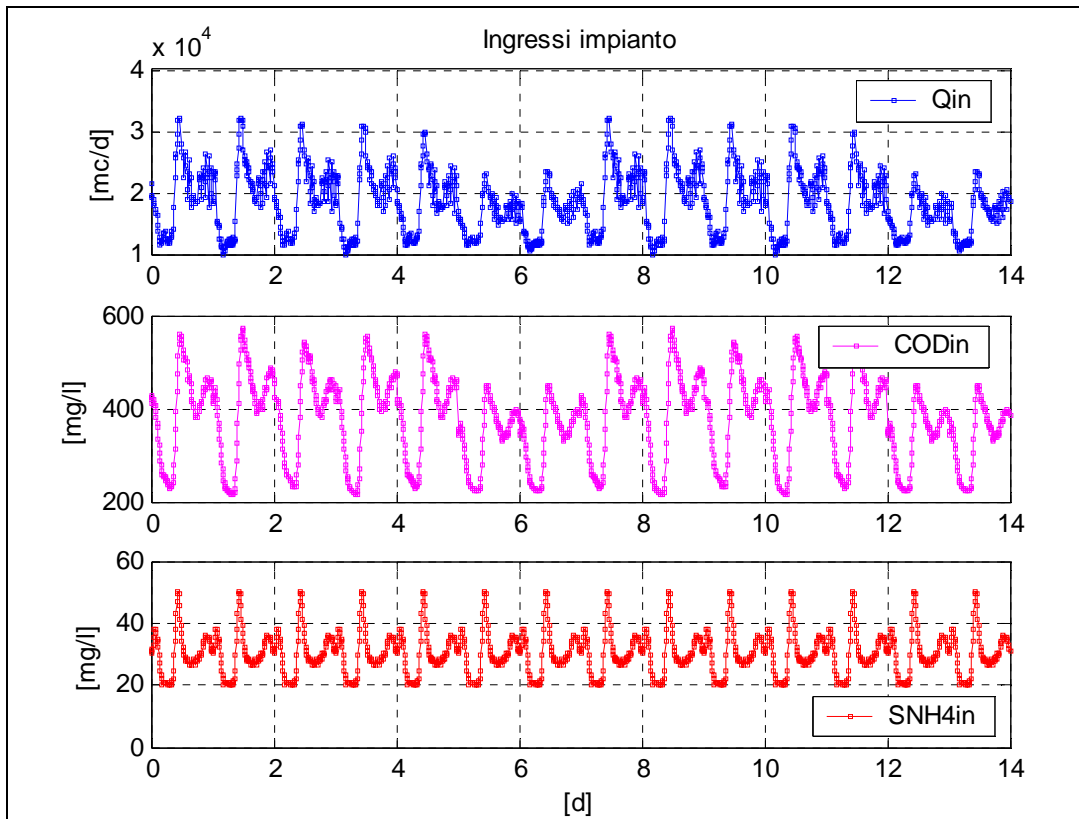


Figura 1. 2 - Serie dati in ingresso Dry Weather.

Per valutare la qualità del refluo effluente si fa riferimento ai limiti imposti dalla normativa vigente (D.Lgs. 152/2006) per azoto ammoniacale, azoto nitroso, azoto nitrico, BOD₅ e COD totale (Tabella 1.2):

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

Tabella 1. 2 – Limiti di emissione nell'effluente.

Un'ulteriore parametro per la valutazione delle caratteristiche dell'effluente è l'indice di qualità dell'effluente *EQ*, che fornisce una misura sintetica del carico inquinante in uscita dall'impianto. *EQ* viene stimato come media temporale pesata dei costituenti principali del refluo:

$$EQ = \frac{1}{T \cdot 1000} \int_{t_0}^{t_7 \text{ days}} \left[\begin{aligned} &\beta_{TSS} \cdot TSS_e(t) + \beta_{COD} \cdot COD_e(t) \\ &+ \beta_{BOD} \cdot BOD_e(t) + \beta_{TKN} \cdot \\ &\cdot TKN_e(t) + \beta_{NOX} \cdot S_{NOX,e}(t) \end{aligned} \right] \cdot Q_e(t) \cdot dt \text{ [kg/d]}$$

Dove $Q_e(t)$ è la portata effluente dall'impianto (m^3/d); le componenti del carico sono stimate come segue:

Componente	Espressione	Unità
$TSS_e =$ solidi totali sospesi	$0.75 \cdot (X_I + X_S) + 0.9 \cdot (X_H + X_{ns} + X_{nb}) + 0.6 \cdot X_{STO}$	mg/l
COD_e	$S_I + X_I + S_S + X_S + X_H + X_{ns} + X_{nb} + X_{STO}$	mg/l
$BOD_{5,e}$	$0.25 \cdot (S_S + X_S + (1-f_p) \cdot (X_H + X_{ns} + X_{nb} + X_{STO}))$	mg/l
$TKN_e =$ azoto organico + azoto ammoniacale	$S_{NH4} + (S_S \cdot i_{NSS}) + (S_I \cdot i_{NSI}) + (X_S \cdot i_{NXS}) + (X_I \cdot i_{NXI}) +$ $+ i_{NBM} \cdot (X_H + X_{ns} + X_{nb})$	mg/l
$S_{NOx,e}$	$S_{NO2,e} + S_{NO3,e}$	mg/l

Tabella 1. 3- Componenti dell'indice di qualità.

I coefficienti i_N rappresentano il contenuto di azoto nella biomassa e nel substrato.

I valori β_i sono invece i pesi dei diversi tipi di inquinanti e vengono introdotti sia per rendere comparabili gli ordini di grandezza che per tener conto dell'importanza relativa delle componenti.

Fattori β_i	Valore
B_{TSS}	2
B_{COD}	1
B_{BOD}	2
B_{TKN}	20
B_{NOx}	20

Tabella 1. 4 – Coefficienti di peso degli inquinanti.

Il calcolo di EQ viene implementato nel modello Simulink mediante l'omonimo sottosistema.

L'energia spesa per l'areazione viene stimata attraverso l'indice di rendimento AE ; tale indice è calcolato usando la seguente relazione valida per un dispositivo costituito da piattelli distribuiti sul fondo della vasca:

$$AE = \frac{24}{T} \int_t^{t+T} [0.4032 \cdot k_{La}(t)^2 + 7.8408 \cdot k_{La}(t)] \cdot dt \quad [kWh/d]$$

Dove:

- $k_{La} (h^{-1})$ è il coefficiente di trasferimento di massa ed esprime la capacità di scambio del gas in fase liquida; k_{La} è proporzionale alla portata d'aria U_a attraverso il

coefficiente K_a ($1/m^3$) che esprime il rendimento del sistema di areazione ed è assunto pari a 0.15.

In Simulink, il calcolo dell'indice AE è effettuato dal blocco di sottosistema omonimo:

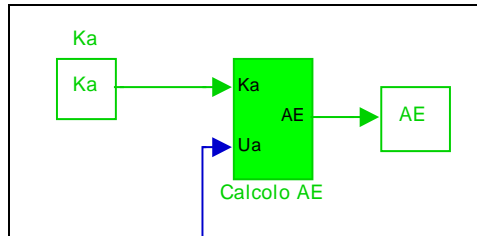


Figura 1. 3- Blocco per il calcolo dell'indice di areazione.

Tale blocco prende in ingresso i valori di K_a e U_a e restituisce l'indice AE , valutato secondo la relazione sopra riportata.

1.3. Il controllo fuzzy

La logica fuzzy rappresenta un'estensione della logica booleana, in quanto “sfuma” la netta suddivisione vero/falso attraverso l'introduzione del grado di appartenenza (che può assumere valori fra 0 e 1 con continuità) di un concetto ad un insieme di qualificatori predefiniti. La “fuzzificazione” fa corrispondere ad ogni valore della variabile considerata un vettore contenente i gradi di verità di tale valore rispetto ai qualificatori. Attraverso l'operazione di implicazione (*then*), il grado di verità dell'antecedente condiziona quello del conseguente. Questo tipo di approccio offre il grande vantaggio di poter lavorare con variabili linguistiche, e quindi di poter sfruttare informazioni sia quantitative che qualitative, e quello di essere più flessibile rispetto alla logica “classica”.

Un regolatore fuzzy si basa su una serie di regole di inferenza, che legano l'antecedente (o gli antecedenti) al conseguente attraverso implicazioni logiche.

Nel nostro caso, viene implementato un controllore fuzzy che fornisca in uscita il valore di set-point per l'ossigeno disciolto nel comparto aerobico, in funzione o , nel caso più semplice, solo del valore della concentrazione di ammonio ($NH_4_DO_{sp}.fis$), o sia della concentrazione di NH_4^+ che della sua derivata nel tempo ($NH_4_DO_{sp1}.fis$). La fuzzy toolbox di Matlab permette di costruire il regolatore in modo molto immediato:

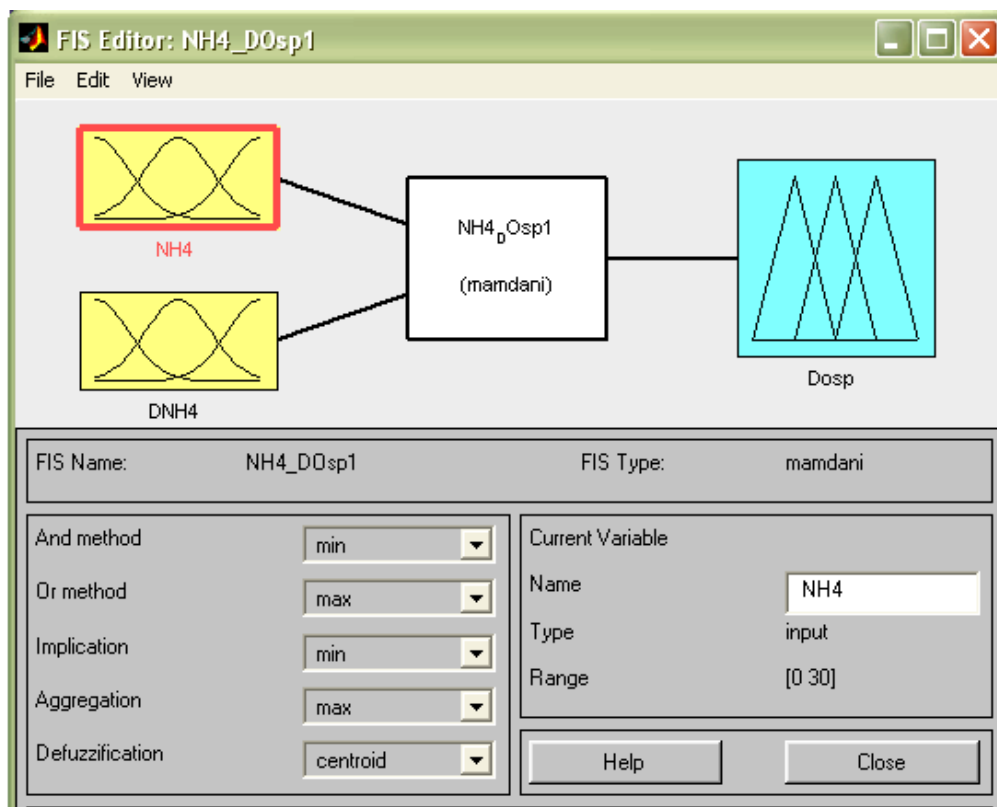


Figura 1. 4 – Costruzione del regolatore NH4_DOsp1.

Il primo passo consiste nella definizione delle variabili di input e di output e dei rispettivi rappresentatori. In questo caso le grandezze in ingresso sono la concentrazione di ammonio e la sua derivata, mentre in uscita abbiamo il valore di DO_{sp} . Nella finestra di dialogo in basso a sinistra sono specificate le opzioni per connettere più antecedenti (AND), per l'implicazione e per la defuzzificazione (operazione che fa corrispondere al fuzzy set derivante dall'implicazione un singolo valore dell'uscita).

Definiamo per l'ammonio un range di variazione compreso fra 0 mg/l e 30 mg/l e cinque classi di appartenenza:

Qualificatore	Valori (mg/l)
<i>Very low</i>	$\sim < 5 - 6$
<i>Low</i>	$\sim 6 \div 11$
<i>Medium</i>	$\sim 11 \div 16$
<i>High</i>	$\sim 16 \div 21$
<i>Very high</i>	> 21

Tabella 1. 5 – Qualificatori per l'ammonio.

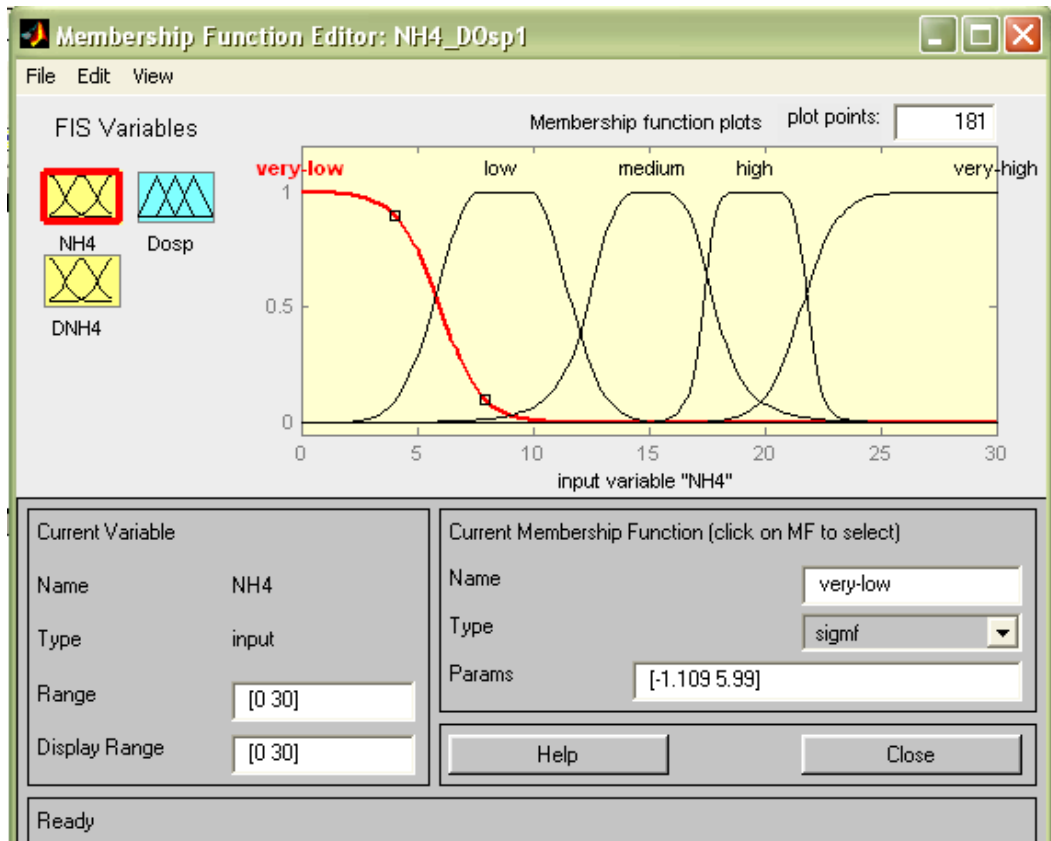


Figura 1. 5 – Rappresentatori per NH4.

Analogamente specifichiamo 3 rappresentanti per la derivata (D_{NH4}): negativa, zero e positiva.

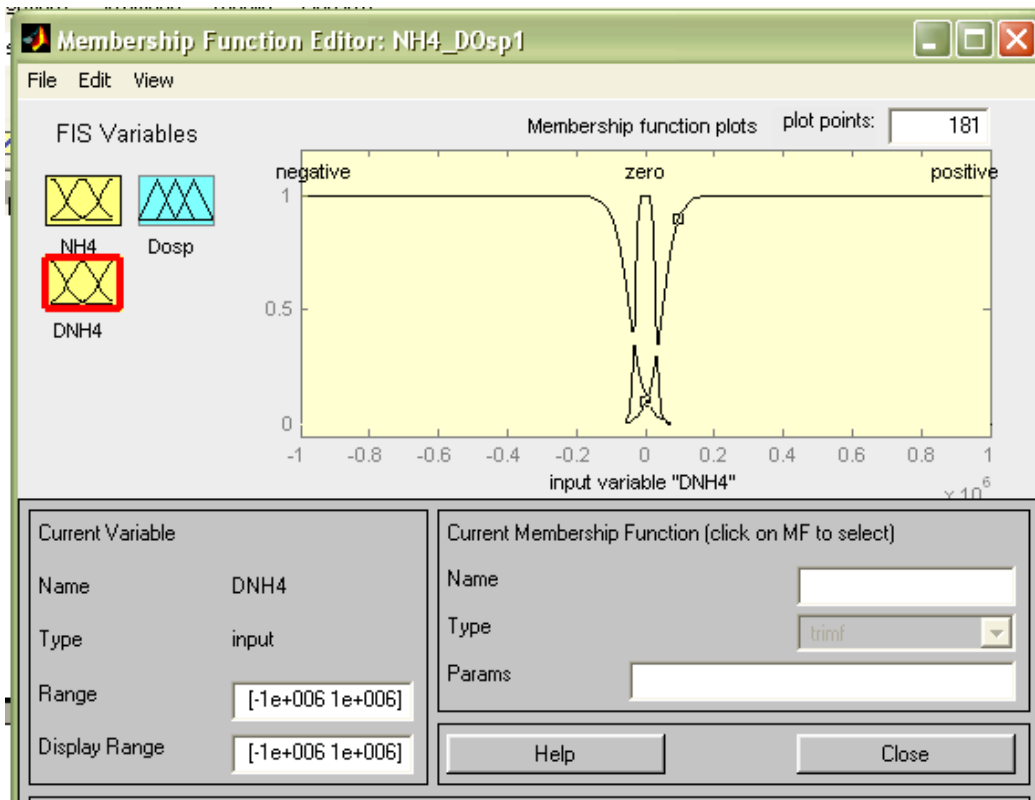


Figura 1. 6 – Rappresentatori per NH4.

Stabiliamo che DO_{sp} possa variare fra 0.1 mg/l e 2.1 mg/l e ne specifichiamo i seguenti qualificatori:

Qualificatore	Valori (mg/l)
<i>Very low</i>	$\sim < 0.3$
<i>Low</i>	$\sim 0.4 \div 0.9$
<i>Medium</i>	$\sim 1 \div 1.3$
<i>High</i>	$\sim 1.4 \div 1.9$
<i>Very high</i>	> 1.9

Tabella 1. 6 – Qualificatori per DO_{sp} .

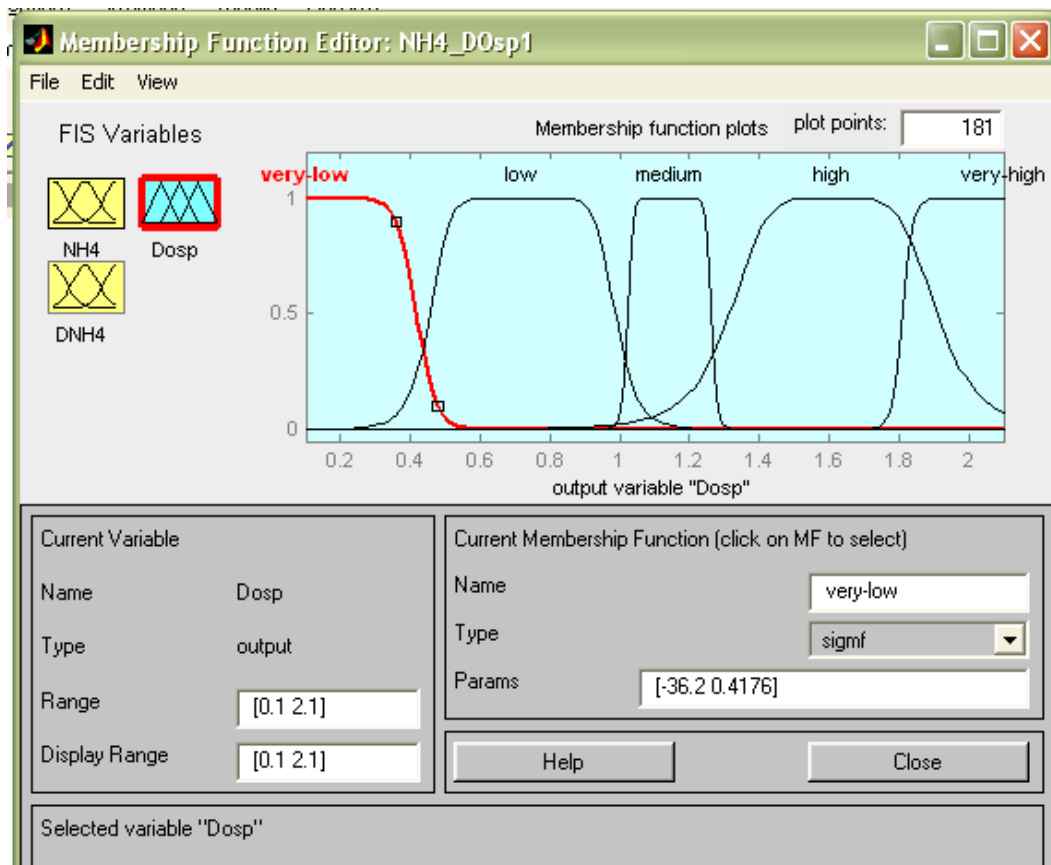


Figura 1. 7 - Rappresentatori per DO_{sp} .

Una volta definite le membership, si procede alla compilazione delle regole; in questo caso specifico è stato seguito un principio guida molto semplice: il regolatore deve produrre in uscita valori di DO_{sp} bassi o comunque medi quando la concentrazione di ammonio sta decrescendo e valori più elevati quando invece NH_4^+ è superiore al limite di legge (15 mg/l) e presenta un trend crescente. La seguente tabella illustra sinteticamente le regole utilizzate:

Regola n°	NH ₄ ⁺	DNH ₄	DO _{sp}	
1	Very low	Negative	Very low	NH ₄ ⁺ è molto basso e sta ulteriormente diminuendo ⇒ è sufficiente un set-point molto basso
2	Very low	Positive	Low	NH ₄ ⁺ è molto basso ma tende ad aumentare ⇒ è necessario prevedere un set-point superiore
3	Low	Negative	Very low	NH ₄ ⁺ è basso e sta ulteriormente diminuendo ⇒ è sufficiente un set-point molto basso
4	Low	Positive	Low	NH ₄ ⁺ è basso ma tende ad aumentare ⇒ è necessario prevedere un set-point superiore
5	Medium	Positive	Medium	NH ₄ ⁺ ha un valore intermedio ma sta aumentando ⇒ è necessario un set-point intermedio
6	High	Negative	Medium	NH ₄ ⁺ ha un valore elevato ma sta diminuendo ⇒ è sufficiente un set-point intermedio
7	High	Positive	High	NH ₄ ⁺ ha un valore elevato ma sta aumentando ⇒ è necessario un set-point elevato
8	Medium	Negative	Low	NH ₄ ⁺ ha un valore intermedio ma sta diminuendo ⇒ è sufficiente un set-point basso
9	Very high	Negative	High	NH ₄ ⁺ ha un valore molto elevato ma sta diminuendo ⇒ è sufficiente un set-point elevato
10	Very high	Positive	Very high	NH ₄ ⁺ ha un valore molto elevato e sta aumentando ⇒ è necessario un set-point molto elevato
11	Very high	Zero	High	NH ₄ ⁺ ha valore massimo ma sta diminuendo ⇒ è sufficiente un set-point elevato
12	Very low	Zero	Low	NH ₄ ⁺ è minimo ma tende ad aumentare ⇒ è necessario prevedere un set-point superiore

Tabella 1. 7 – Prospetto delle regole.

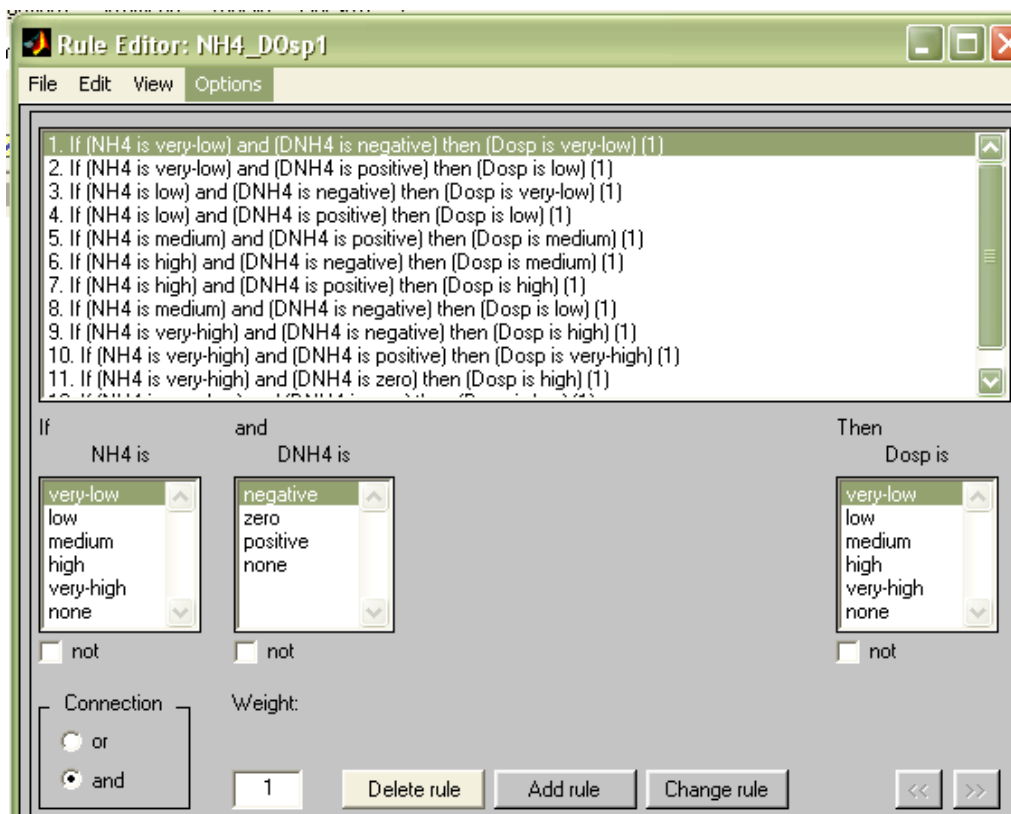


Figura 1. 8 – Regole per il valore di set-point dell'ossigeno disciolto.

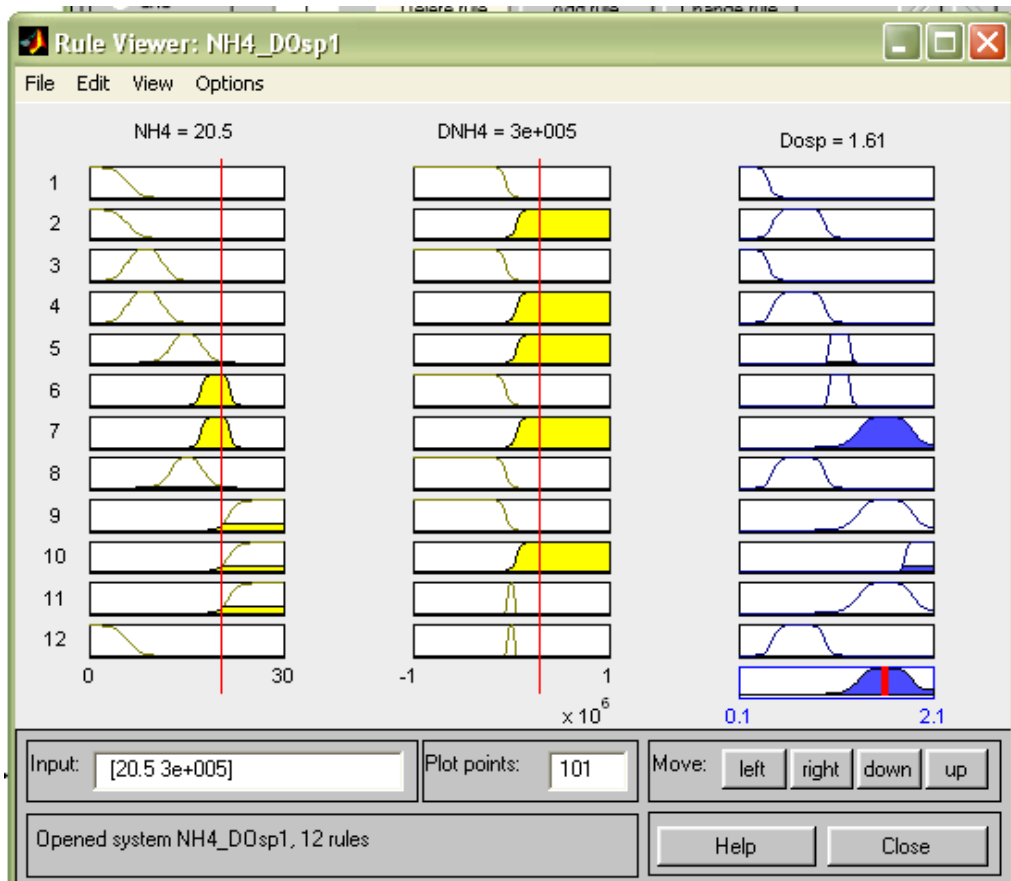


Figura 1. 9 – Visualizzazione delle regole.

Infine, per verificare la correttezza delle regole imposte, è possibile visualizzarle in un'apposita finestra, in cui al variare degli input si può leggere il valore dell'output (Fig. 1.9). Al termine di queste operazioni, otteniamo un file.fis, che dovrà essere inserito come parametro del blocco Simulink "Fuzzy Logic Controller".

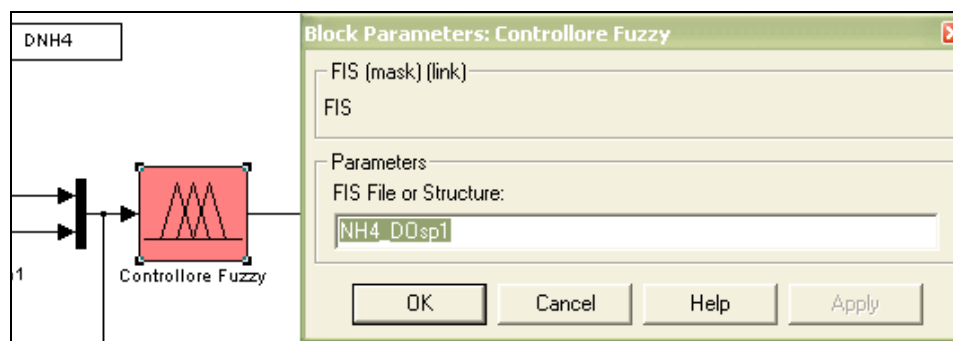


Figura 1. 10 – Utilizzo del blocco Fuzzy in Simulink.

1.4. Il controllo PID

Il regolatore PID (Proporzionale-Integrale-Derivativo) è un controllore deterministico ampiamente utilizzato anche a livello industriale. Il controllo si basa sulla valutazione della differenza fra il valore della grandezza che vogliamo regolare e un valore di set-point. L'errore così determinato viene corretto dinamicamente attraverso tre azioni parallele:

- proporzionale: correzione proporzionale all'errore di regolazione;
- integrale: facendo dipendere il segnale di controllo non solo dal valore dell'errore, ma anche da quello del suo integrale, si riesce a tener conto della sua storia precedente ed a esercitare così un'azione correttiva "cumulativa";
- derivativa: rappresenta il termine di previsione sull'andamento dell'errore e consente, quindi, di esercitare un'intervento preventivo.

Nel controllo dell'ossigeno disciolto, viene calcolato lo scarto fra il valore di DO misurato in vasca aerobica (variabile controllata) e il DO_{sp} ; in funzione di tale errore viene inviato un comando per l'erogazione della portata d'aria U_a (variabile manipolata).

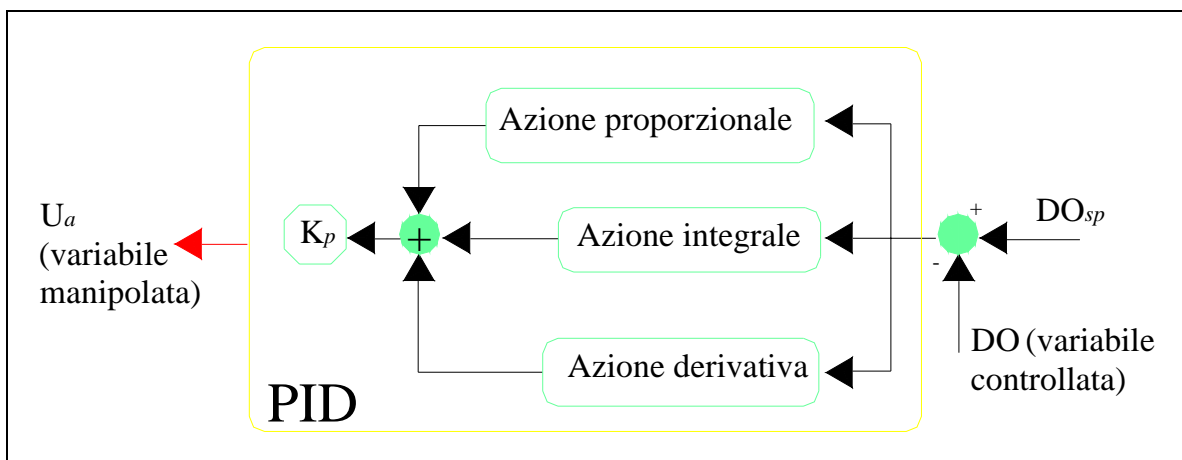


Figura 1. 11 – Schema di un controllo PID sull'ossigeno disciolto.

Nel caso più semplice, il valore di set-point per l'ossigeno disciolto in vasca aerobica viene assunto costante e pari generalmente a 2-3 mg/l. I parametri del regolatore vengono fissati in modo da rendere lo scarto fra il valore di set-point e la concentrazione effettiva di ossigeno il più basso possibile. Per valutare l'efficacia del regolatore, si definisce un funzionale di prestazione *ITAEU*, che calcola la somma pesata degli errori nel tempo (gli errori iniziali hanno importanza minore di quello che si verificano dopo molto tempo):

$$ITAEU = \frac{1}{T} \int_0^T t \cdot |e(t)| \cdot dt$$

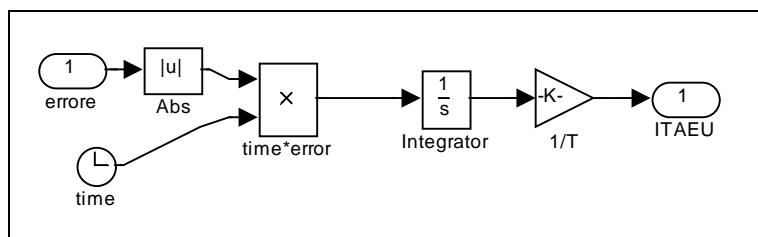


Figura 1. 12- Implementazione in Simulink del calcolo di ITAEU

A partire dai valori $K_p = 10$, $K_I = 10$, $K_{DD} = 100$, sono state effettuate alcune simulazioni di prova per valutare approssimativamente il comportamento del regolatore in funzione dei parametri. Sulla base di quanto osservato in questi tentativi, si è deciso di far variare K_p fra 160 e 250, K_I fra 60 e 110 e K_{DD} fra 200 e 600. Il programma Matlab *Param_PID.m* valuta *ITAEU* per ogni combinazione dei parametri e ad ogni iterazione confronta il valore di *ITAEU* stimato a quel passo con un valore temporaneo che rappresenta il minimo ottenuto fino a quel punto. Alla fine di questa procedura, il valore più basso dell'indice di prestazione è risultato 0.0104, in corrispondenza dei parametri $K_p = 250$, $K_I = 100$ e $K_{DD} = 550$, che pertanto saranno assunti come parametri effettivi del PID. L'andamento dell'ossigeno disciolto derivante è rappresentato nel seguente grafico; è immediato notare come, ad eccezione dei primi due giorni di simulazione, il controllo PID garantisca un'ottima aderenza della concentrazione del DO al set-point fissato.

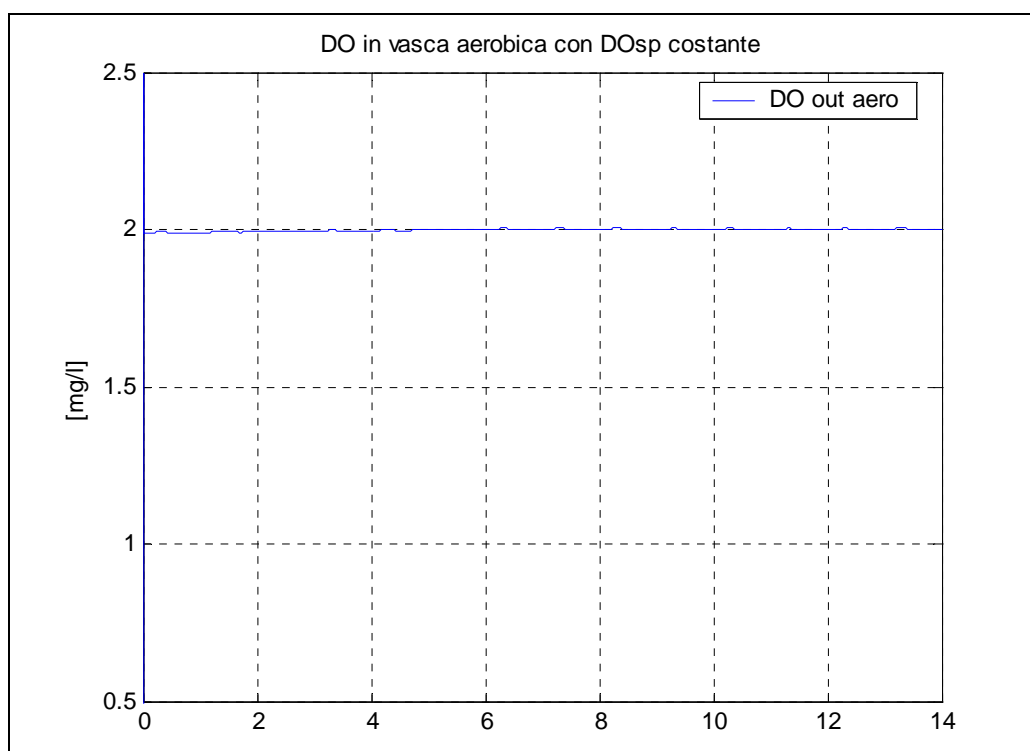


Figura 1. 13 – DO in vasca aerobica con regolatore PID e set-point costante.

Come già detto, l'obiettivo di questo elaborato è quello di valutare gli eventuali vantaggi, in termini di risparmio energetico, derivanti dalla sostituzione di un valore costante di DO_{sp} con valori variabili prodotti da un controllore fuzzy in funzione della concentrazione di ammonio.

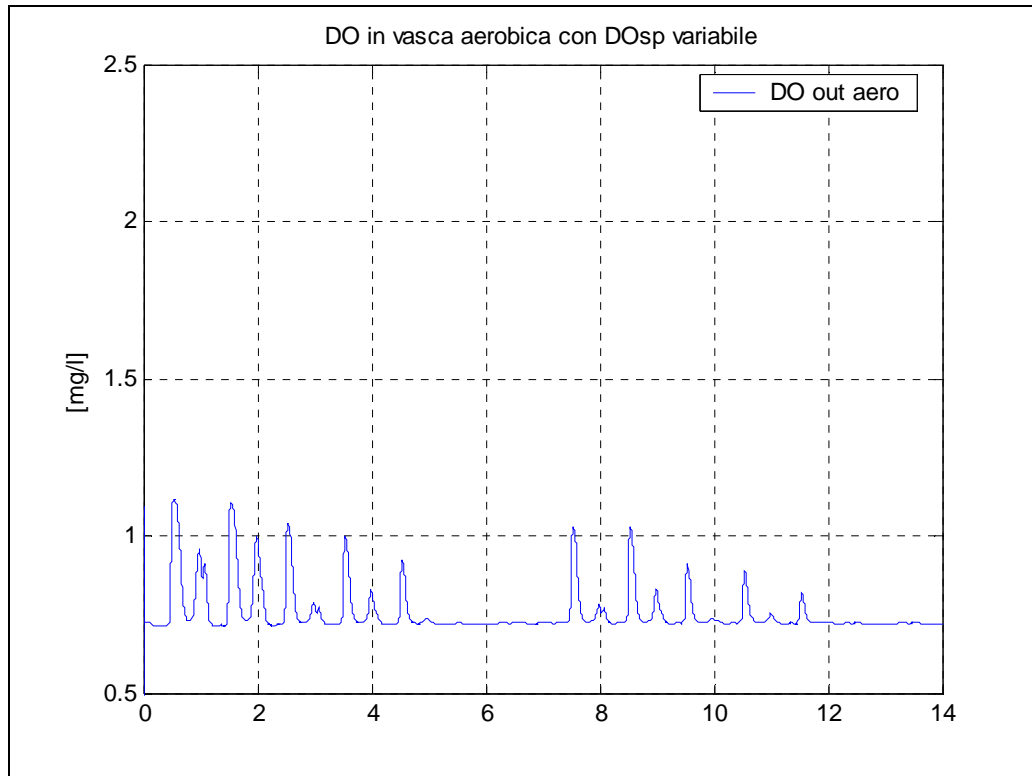


Figura 1. 14– DO in vasca aerobica con regolatore PID e set-point variabile.

La seguente immagine illustra lo schema a blocchi Simulink con i due controllori in cascata:

- il regolatore fuzzy riceve come ingressi la concentrazione di NH_4^+ ($NH4_out_aero1$) nel comparto aerobico e la sua derivata ($DNH4$) e produce in uscita il valore di DO_{sp} ;
- il blocco PID ha come ingresso lo scarto fra DO (DO_out_aero1) e DO_{sp} e restituisce il valore della portata d'aria (U_a) da insufflare nel reattore di nitrificazione;
- il blocco *attuazione degli areatori* modella la dinamica del sistema di areazione;
- il blocco *saturation* fissa i limiti superiore e inferiore per U_a .

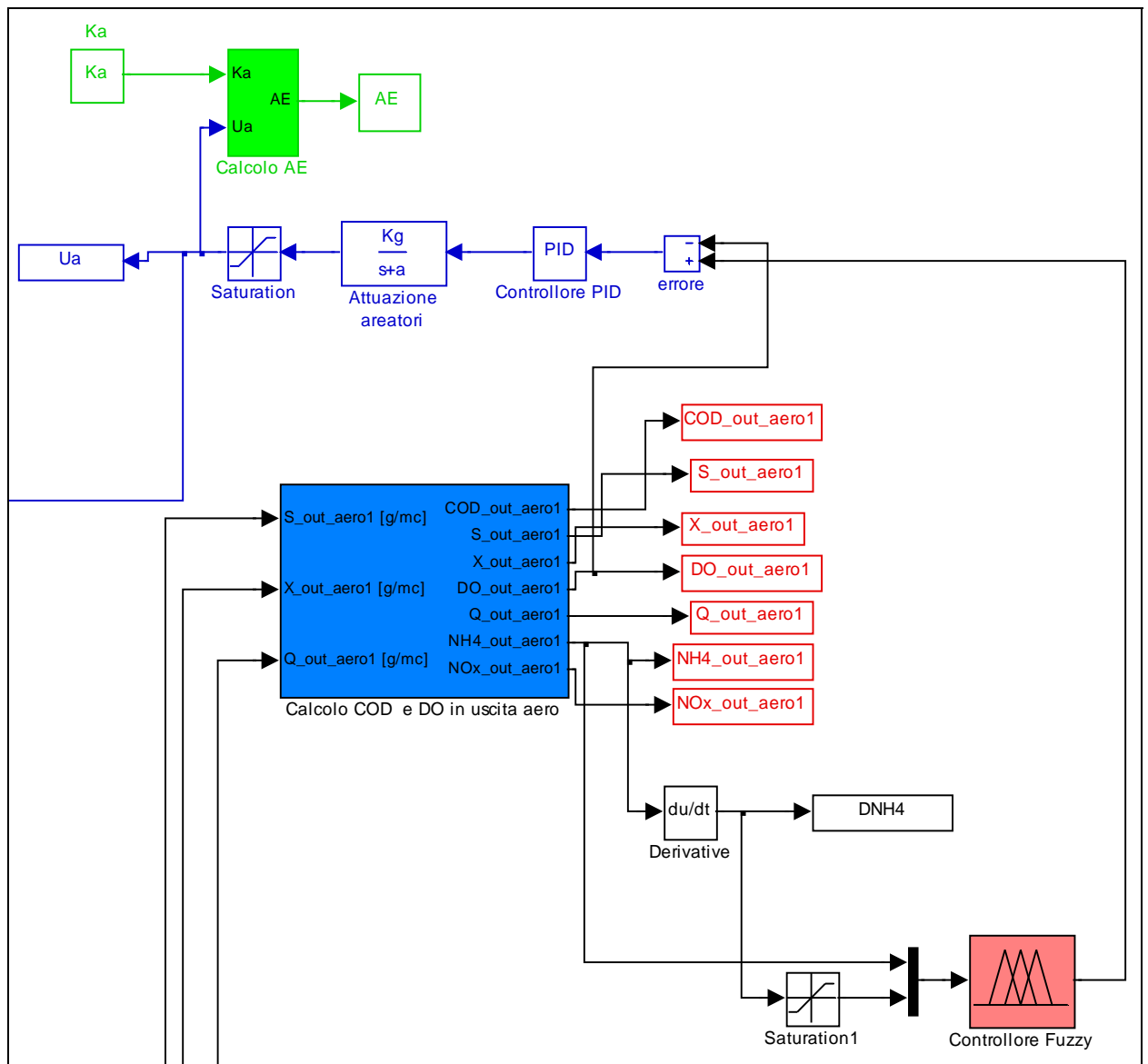


Figura 1. 15 – Implementazione del controllo in Simulink.

CAPITOLO 2

ANALISI DEI RISULTATI

2.1. Risposta del modello in assenza di controllo

Analizziamo innanzitutto la risposta del modello (ASM3_2N) in assenza di alcun tipo di controllo. Il grafico sottostante evidenzia il notevole consumo di carbonio ad opera del processo di denitrificazione; la concentrazione di substrato carbonioso solubile viene, infatti, ridotta da valori intorno ai 20 mg/l a valori inferiori ai 5 mg/l; questo consente di regolare l'areazione nella vasca aerobica in funzione solamente dell'abbattimento dell'ammonio.

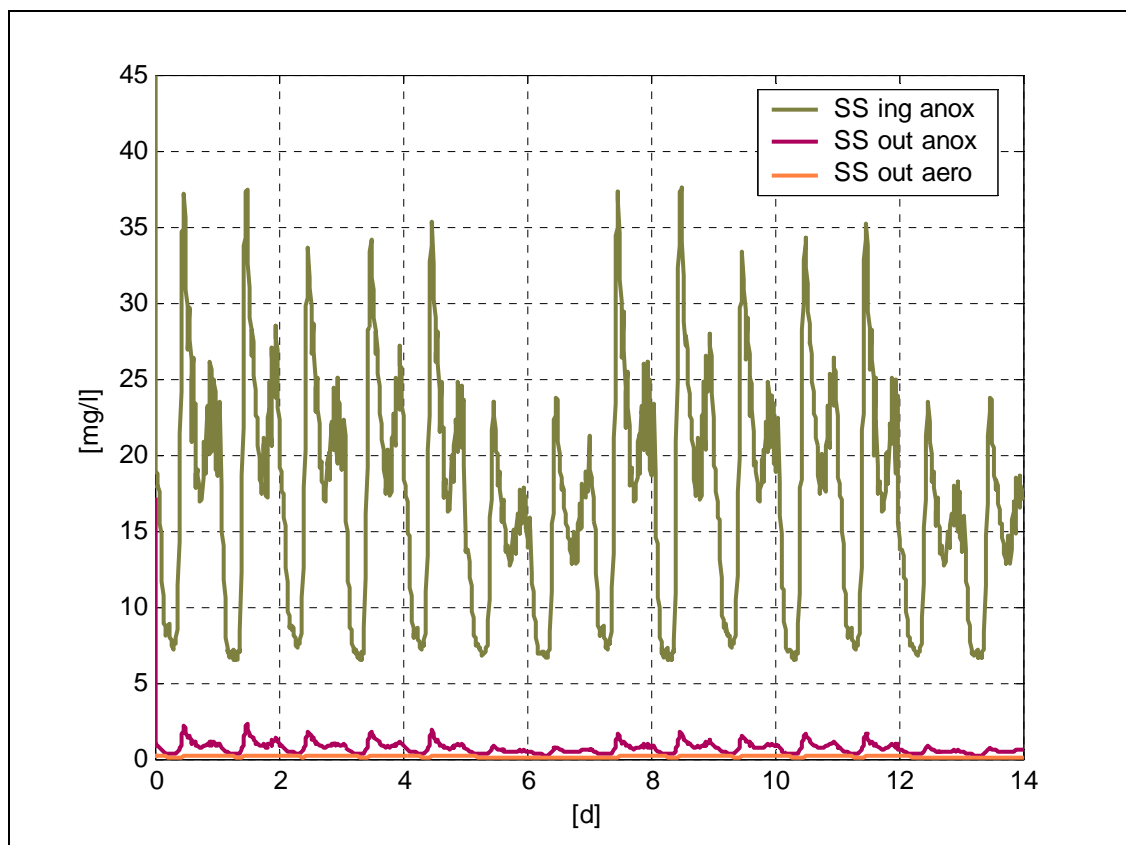


Figura 2. 1 – Confronto fra il substrato carbonioso solubile in ingresso all'impianto e quello uscente dal comparto anossico e da quello aerobico.

Insufflando nel comparto aerobico una portata d'aria costante pari a $3736 \text{ m}^3/\text{d}$, si realizza un consistente abbattimento dell'ammoniaca fino a concentrazioni notevolmente inferiori al limite previsto anche dalla Normativa più attuale (D.Lgs. 152/2006) di 15 mg/l (Fig. 2.2). Si rileva, inoltre, una sostanziale coincidenza fra l'azoto gassoso in uscita dalla denitrificazione e quello in uscita dal trattamento aerobico (Fig. 2.3); ciò fornisce un'ulteriore indicazione dell'abbondanza di ossigeno disciolto (DO), il cui livello risulta essere intorno ai $7\text{-}8 \text{ mg/l}$ (Fig. 2.4); una elevata concentrazione di DO inibisce l'attività di denitrificazione dei batteri eterotrofi facoltativi, impedendo così la possibilità di una riduzione ulteriore degli NO_x anche in vasca aerobica.

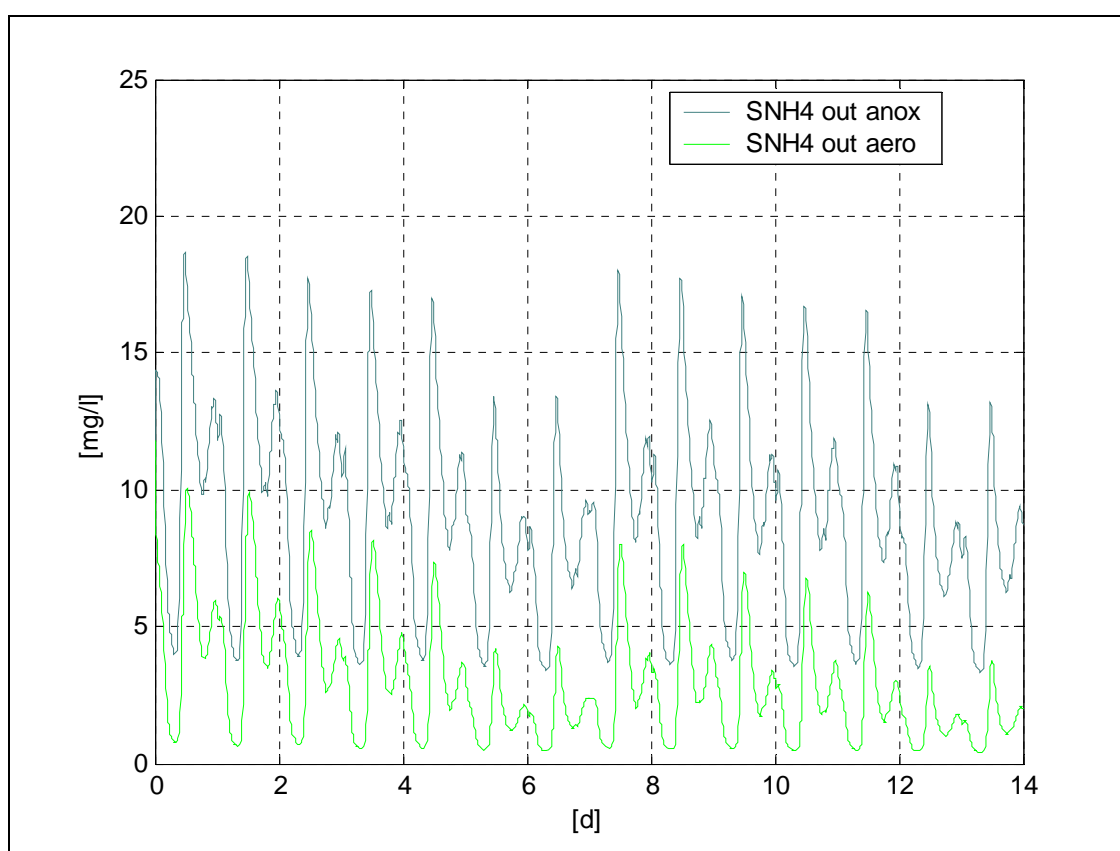


Figura 2. 2 – Abbattimento dell' NH_4 durante il processo di nitrificazione.

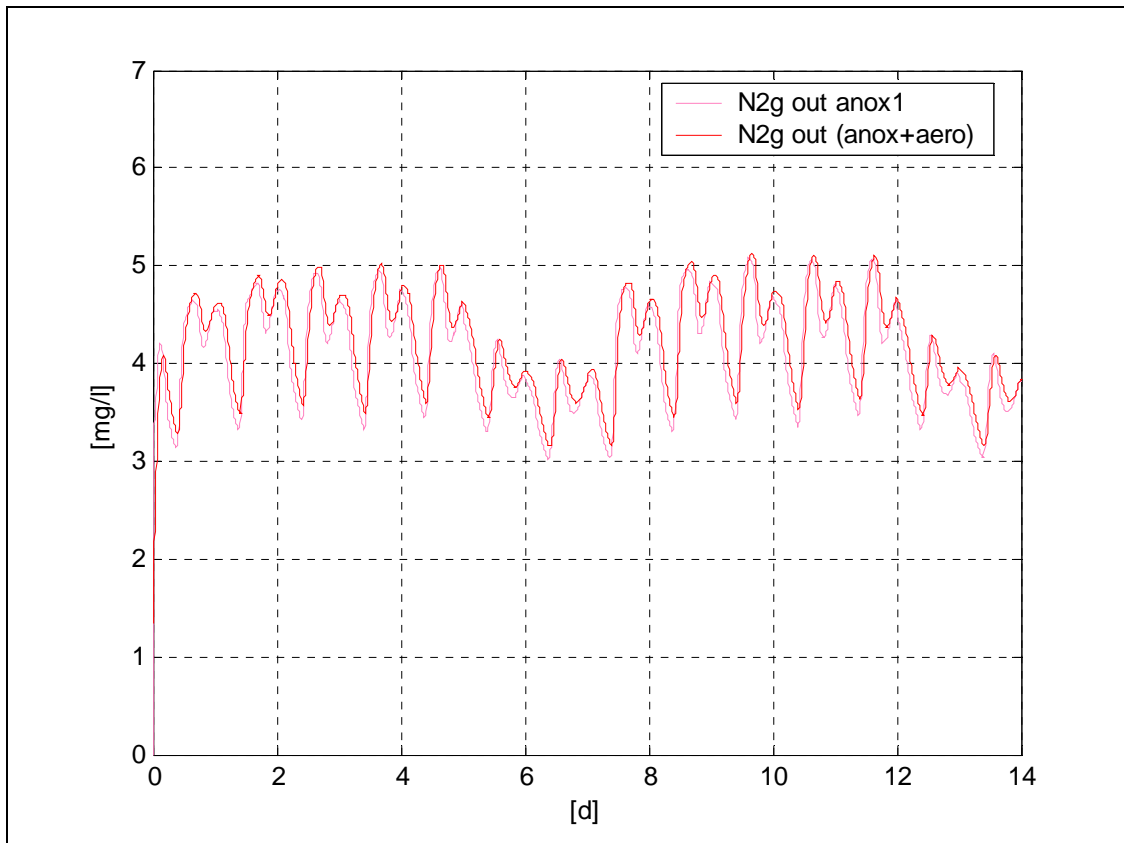


Figura 2. 3– Azoto gassoso in uscita sia dalla vasca anossica che da quella aerobica.

Il seguente grafico ci permette di sottolineare che:

- utilizzando la portata d'aria sopra specificata, il livello di DO è elevato; ciò comporta un notevole abbattimento dell'ammonio;
- la concentrazione degli NOx è abbastanza elevata, sebbene al di sotto dei limiti massimi previsti; è ipotizzabile che la riduzione dei notevoli livelli di ossidi di azoto prodotti in fase aerobica sia limitata dalla scarsa disponibilità di carbonio organico, la cui concentrazione in uscita dalla denitrificazione è inferiore a 2 mg/l (si noti che il rapporto fra il carbonio, consumato per ridurre azoto in forma ossidata ripartito in nitrato, e il nitrato ridotto è pari a $\frac{2.86}{1-Y_{HD}}$, essendo Y_{HD} il rendimento della biomassa eterotrofa denitrificante); per abbattere ulteriormente i valori degli NOx risulta necessario ricorrere ad apporti esterni di carbonio.

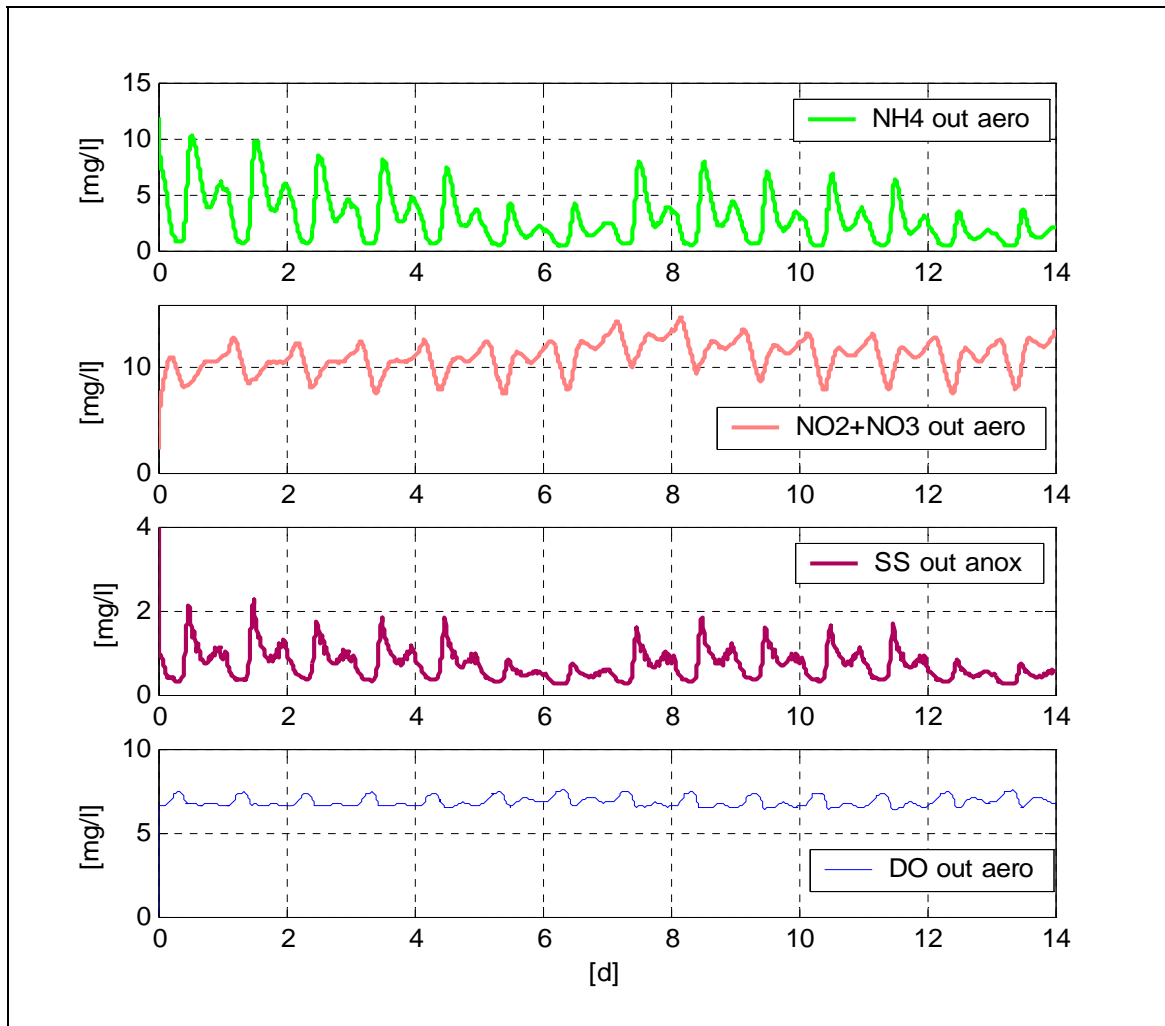


Figura 2. 4 – Andamenti delle grandezze analizzate.

L'energia spesa per l'areazione è elevata: $AE = 9682 \text{ kWh/d.}$

2.2. Risposta del modello con controllo PID sul DO

Il passo successivo consiste nella valutazione del funzionamento dell'impianto dopo l'introduzione del controllo PID sull'ossigeno disciolto, imponendo un valore di set-point pari a 2 mg/l.

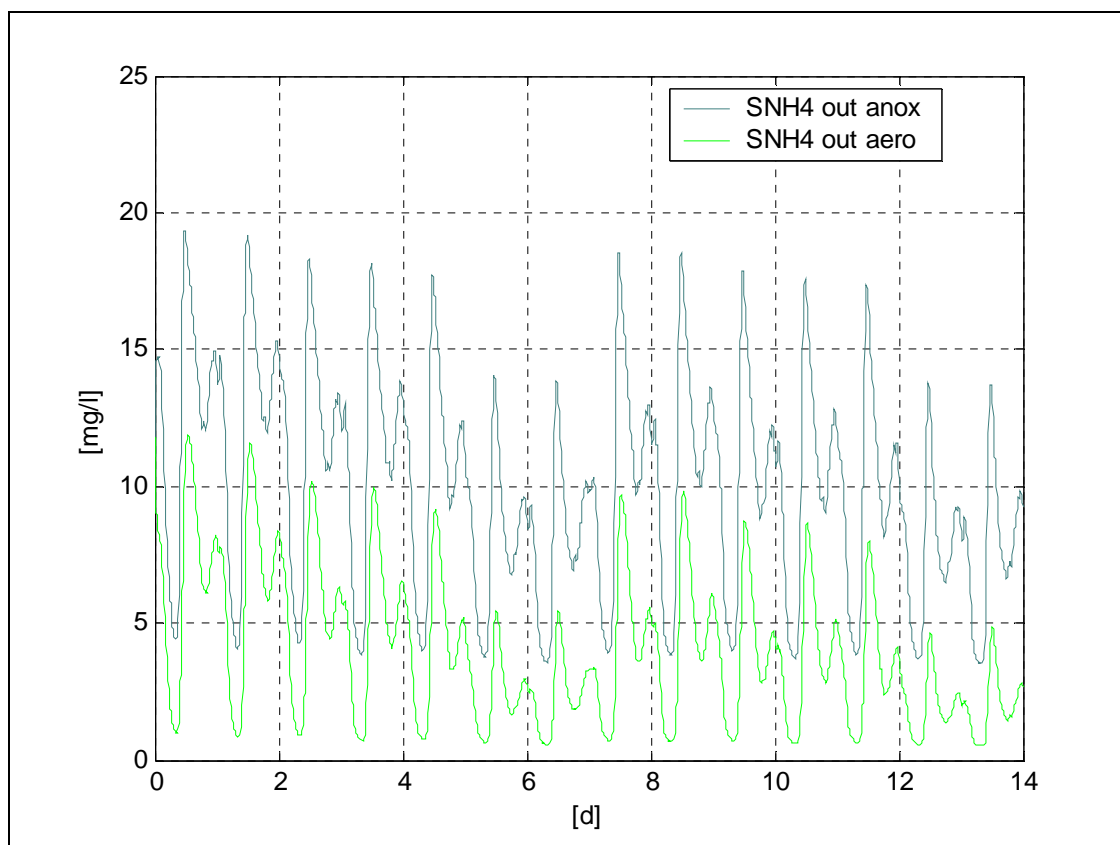


Figura 2.5 - Abbattimento dell' NH_4 durante il processo di nitrificazione (con controllo PID).

Le rese del processo di nitrificazione non vengono sostanzialmente alterate (Fig. 2.5) e si rileva una leggera attività di denitrificazione anche nel settore aerobico (Fig. 2.6). Il mantenimento di un set-point costante per l'ossigeno disciolto consente di ridurre notevolmente la quantità d'aria impiegata, portando ad un considerevole risparmio energetico ($AE = 1658 \text{ kWh/d}$), senza un deterioramento della qualità dell'effluente.

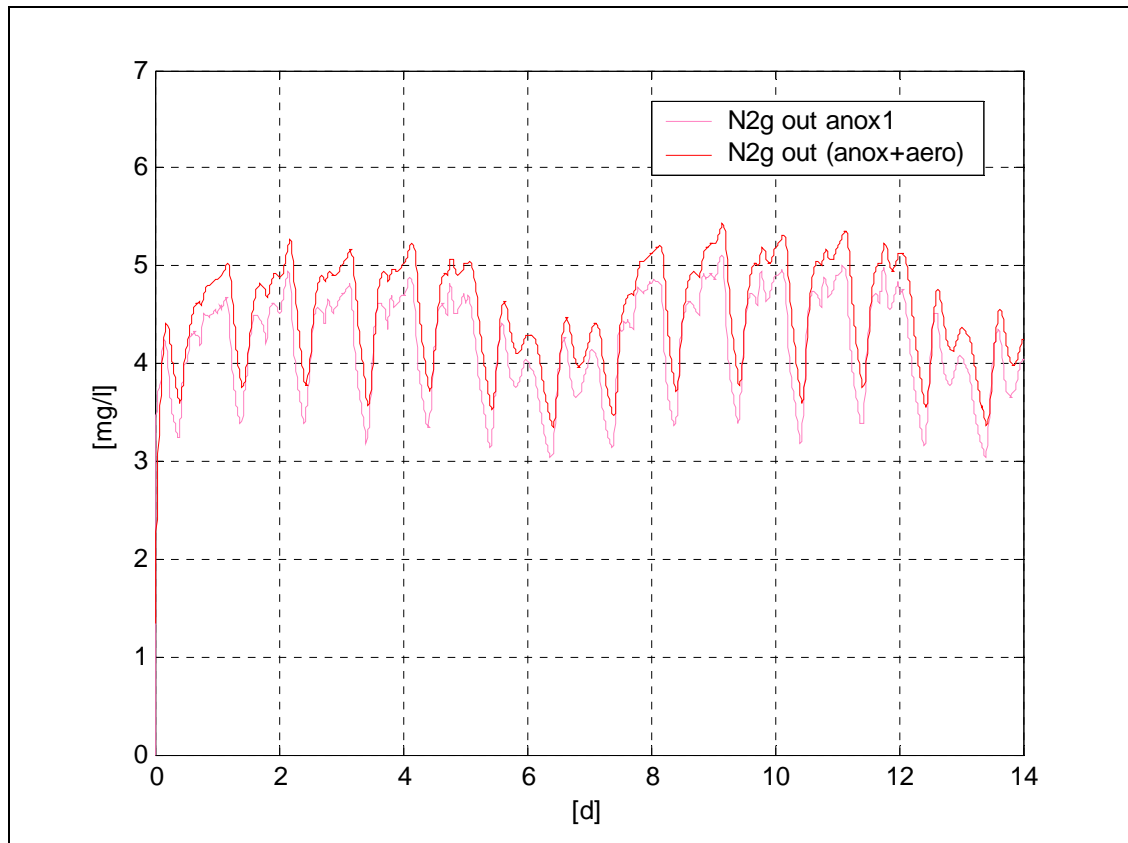


Figura 2. 6 - Azoto gassoso in uscita sia dalla vasca anossica che da quella aerobica (con controllo PID).

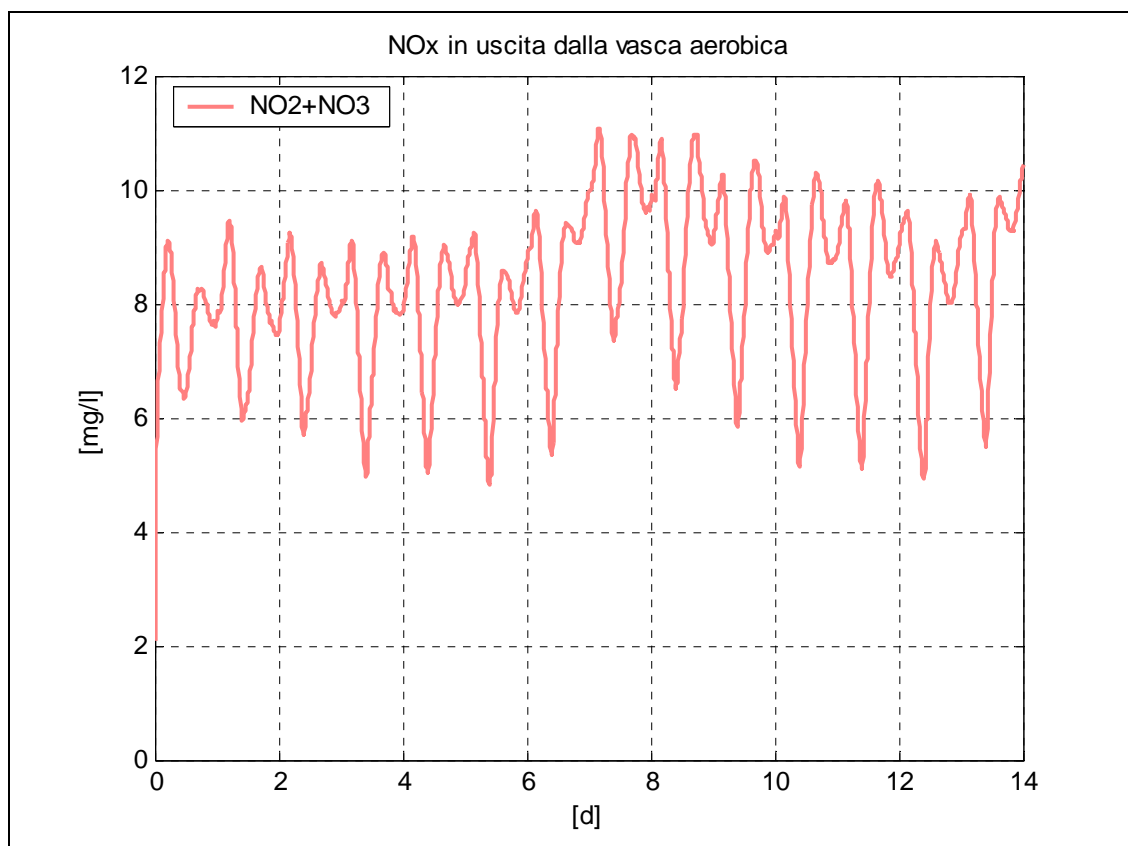


Figura 2. 7 - NO_x in uscita dalla vasca aerobica (con controllo PID).

La minor quantità di aria impiegata comporta una minore ossidazione dell'ammonio e al contempo una riduzione dei nitrati formati ad azoto molecolare (N_2) anche in vasca aerobica: ciò determina sia una diminuzione nella concentrazione degli NO_x in uscita dall'impianto sia un minor consumo di C_{org} in condizioni anossiche. Dal seguente grafico si evince come le maggiori concentrazioni di substrato solubile si verificano in concomitanza con i picchi di ammonio, ovvero siano provocate da una minore quantità di nitriti e nitrati che subiscono il processo di denitrificazione.

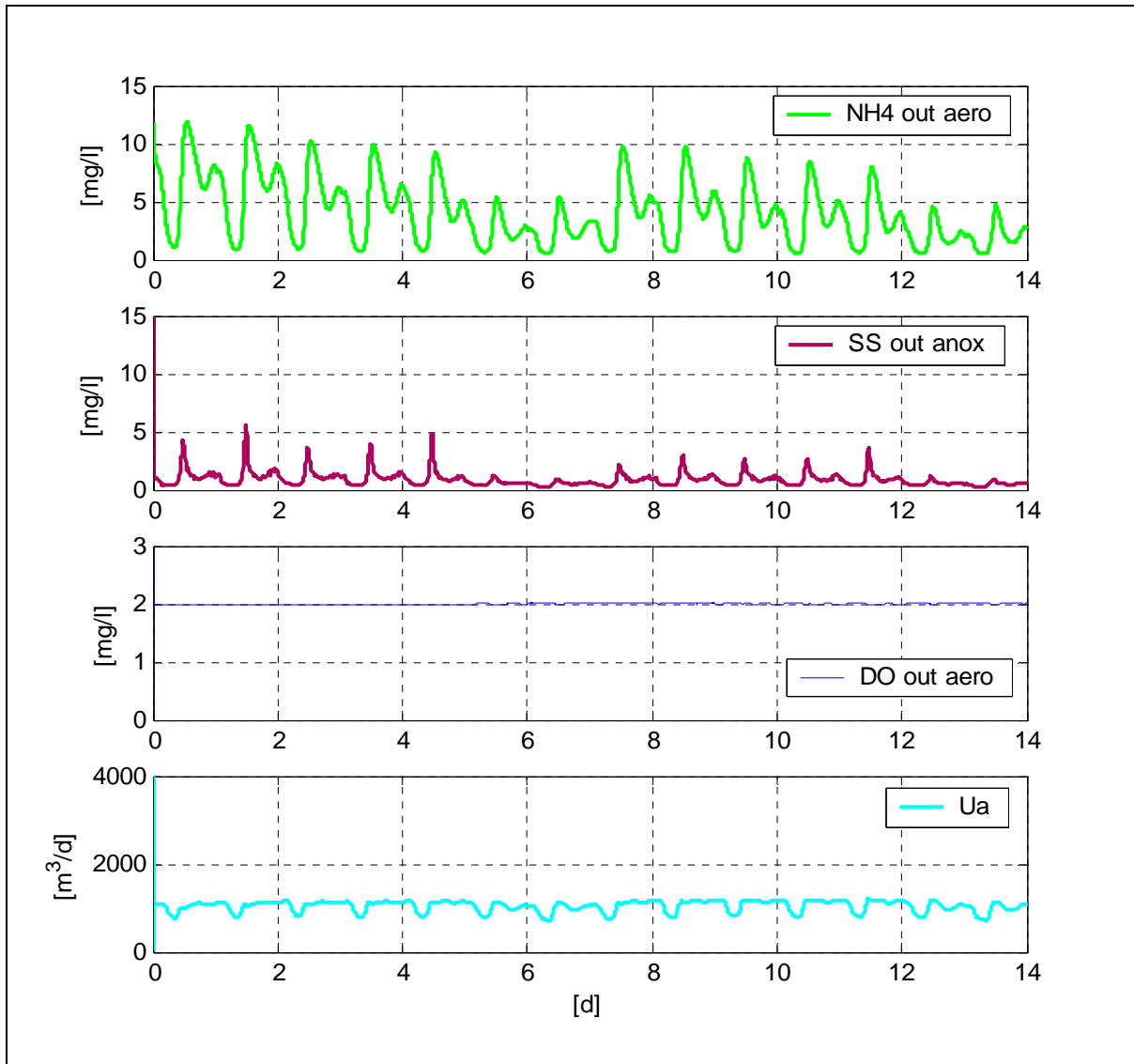


Figura 2. 8 - Andamenti delle grandezze analizzate (con controllo PID).

2.3. Risposta del modello con DO_{sp} variabile

Anziché un valore costante di DO_{sp} , inseriamo un controllo fuzzy che determini la concentrazione di set-point in funzione dell'andamento dell'ammonio. Tale tipo di controllo è finalizzato a fornire solo il quantitativo d'aria strettamente necessario per la nitrificazione.

Un primo controllo, più semplice, sceglie il DO_{sp} utilizzando come input solamente la concentrazione dell' NH_4^+ .

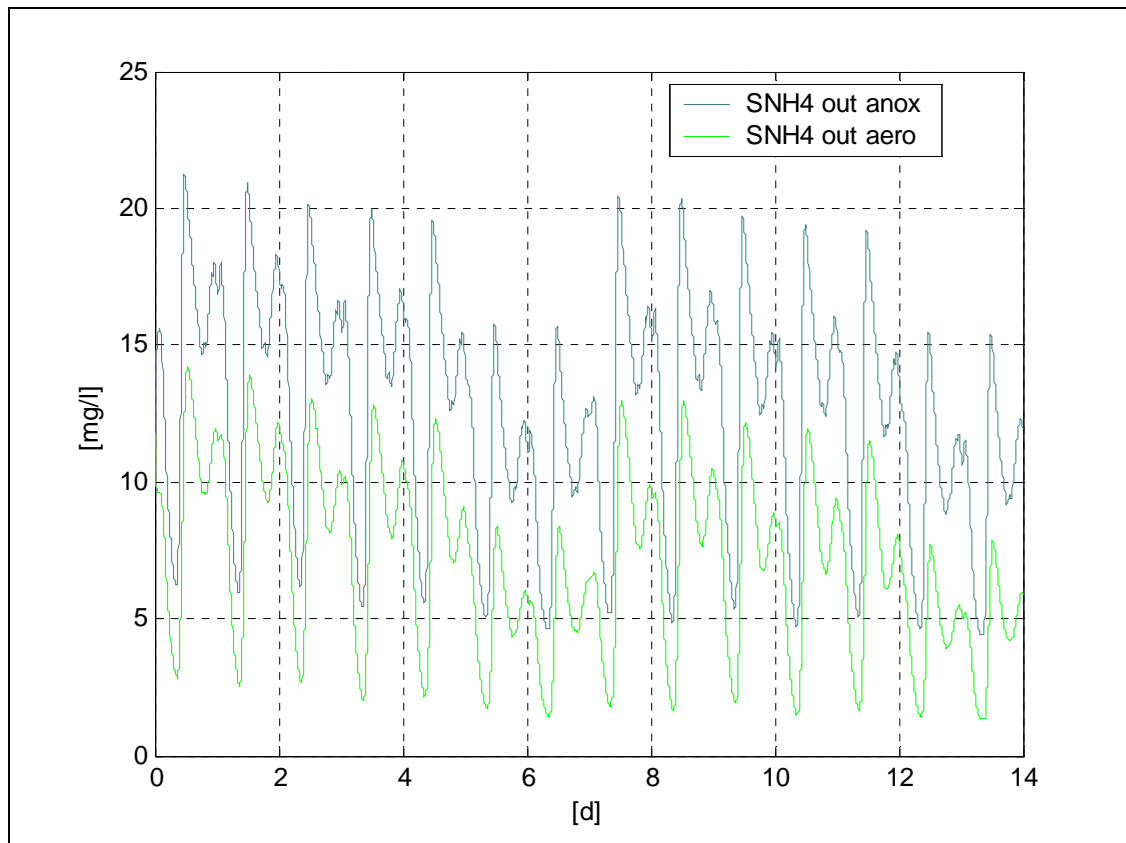


Figura 2. 9 - Abbattimento dell' NH_4 durante il processo di nitrificazione (con controllo PID+fuzzy con 1 solo input).

La regolazione della portata d'aria insufflata in funzione della concentrazione di ammonio consente da un lato di mantenere l'efficacia depurativa (la concentrazione di NH_4^+ è sempre inferiore a quella limite e quella degli ossidi di azoto si discosta solo leggermente dal caso precedente) e dall'altro di ridurre la concentrazione di DO, favorendo così il processo di denitrificazione anche in vasca aerobica (Fig. 2.10).

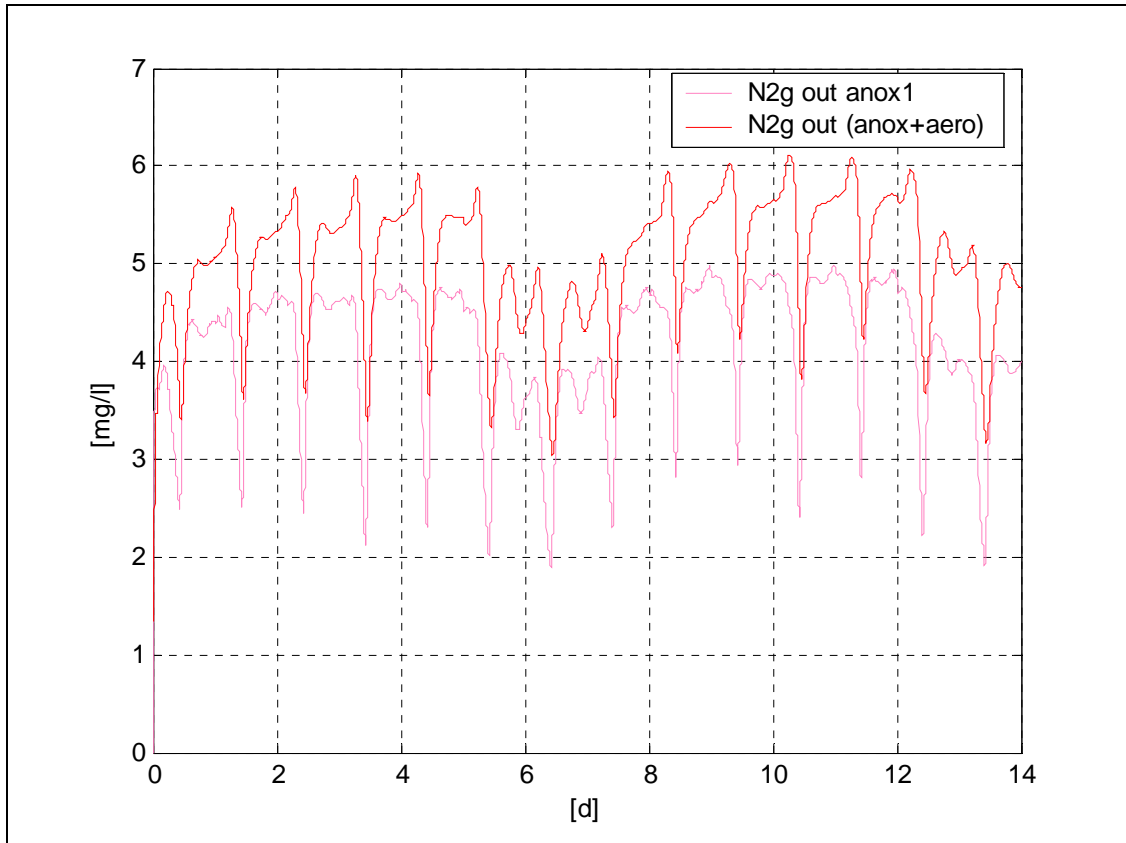


Figura 2. 10 - Azoto gassoso in uscita sia dalla vasca anossica che da quella aerobica (con controllo PID+fuzzy con 1 solo input).

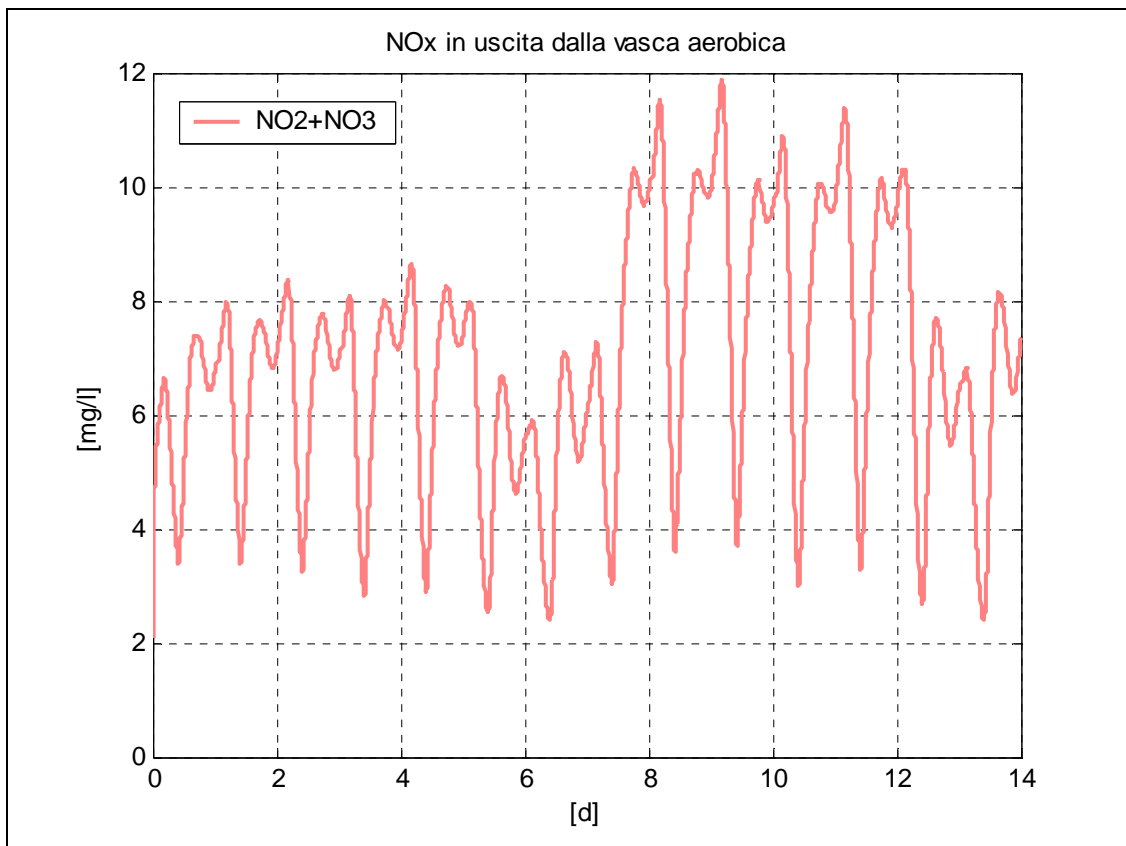


Figura 2. 11 - NO_x in uscita dalla vasca aerobica (con controllo PID+fuzzy con 1 solo input).

Da rilevare l'ulteriore riduzione dei consumi energetici ($AE = 1166.2 \text{ kWh/d}$) e il particolare andamento dell'ossigeno disciolto che segue la concentrazione di ammoniaca e non è più costante.

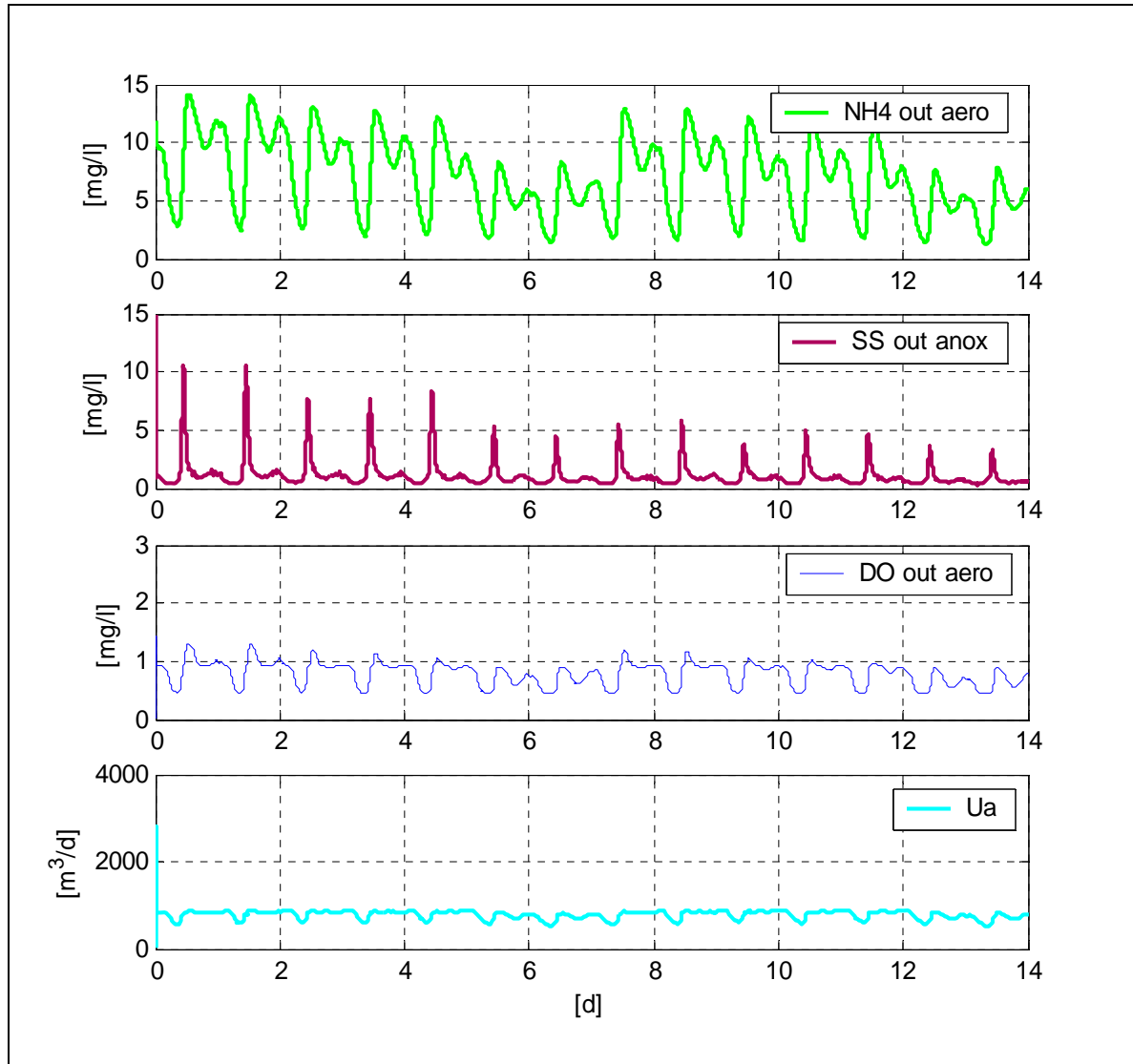


Figura 2.12 - Andamenti delle grandezze analizzate (con controllo PID+fuzzy con 1 solo input).

Per ottenere un controllore ancor più preciso e sensibile, si aggiunge come secondo input la derivata dell'ammonio; in tal modo il DO_{sp} viene stabilito non solo in base al valore di NH_4^+ , ma tenendo anche conto del suo trend. Il nuovo regolatore consente un ulteriore risparmio sull'areazione, in quanto possiamo prevedere valori di set-point per l'ossigeno bassi o comunque intermedi anche quando la concentrazione di ammonio presenta valori abbastanza elevati ma sta decrescendo. Dal confronto fra le figure 2.12 e 2.13, si nota che l'abbattimento dell'ammonio è praticamente lo stesso e che nel secondo caso, il DO si mantiene più costante e mediamente più basso, presentando valori superiori a 1 mg/l solo

quando l'ammonio in ingresso alla vasca aerobica raggiunge i 20 mg/l (Fig. 2.13 vs Fig. 2.14).

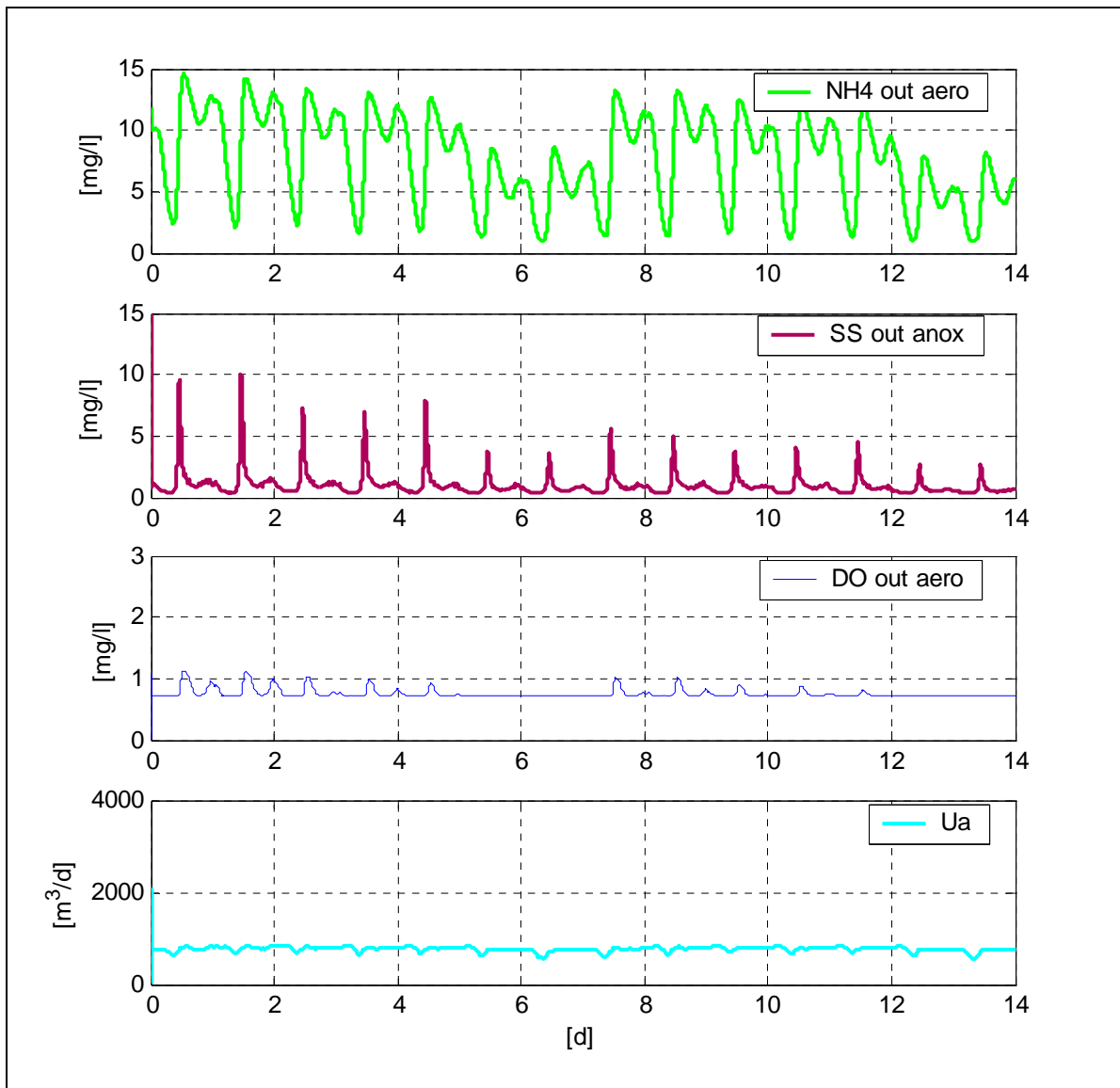


Figura 2. 13 - Andamenti delle grandezze analizzate (con controllo PID+fuzzy con 2 ingressi).

In conclusione quest'ultimo tipo di regolazione garantisce:

- ridotti consumi energetici per l'areazione, che risultano più bassi di oltre il 31% rispetto al caso di controllo PID con DO_{sp} costante: $AE = 1134.4 \text{ kWh/d}$;
- buona efficienza depurativa:
 - l'ammonio rimane costantemente al di sotto di 15 mg/l (Fig. 2.14);
 - gli NOx si mantengono entro i 12 mg/l; si deve sottolineare che, limitando l'insufflazione di aria, si ha una maggior produzione di nitriti che di nitrati e questo porta ad una violazione dei limiti di legge; d'altronde i nitrati nell'effluente sono presenti in quantità talmente ridotta per cui la

concentrazione complessiva di ossidi di azoto supera di nemmeno 1 mg/l quella ottenuta senza alcun tipo di controllo;

- anche le concentrazioni dei costituenti carboniosi dell'effluente, COD e BOD₅, risultano ampiamente inferiori ai limiti di legge pari rispettivamente a 125 mg/l e 25 mg/l (Fig. 2.15).

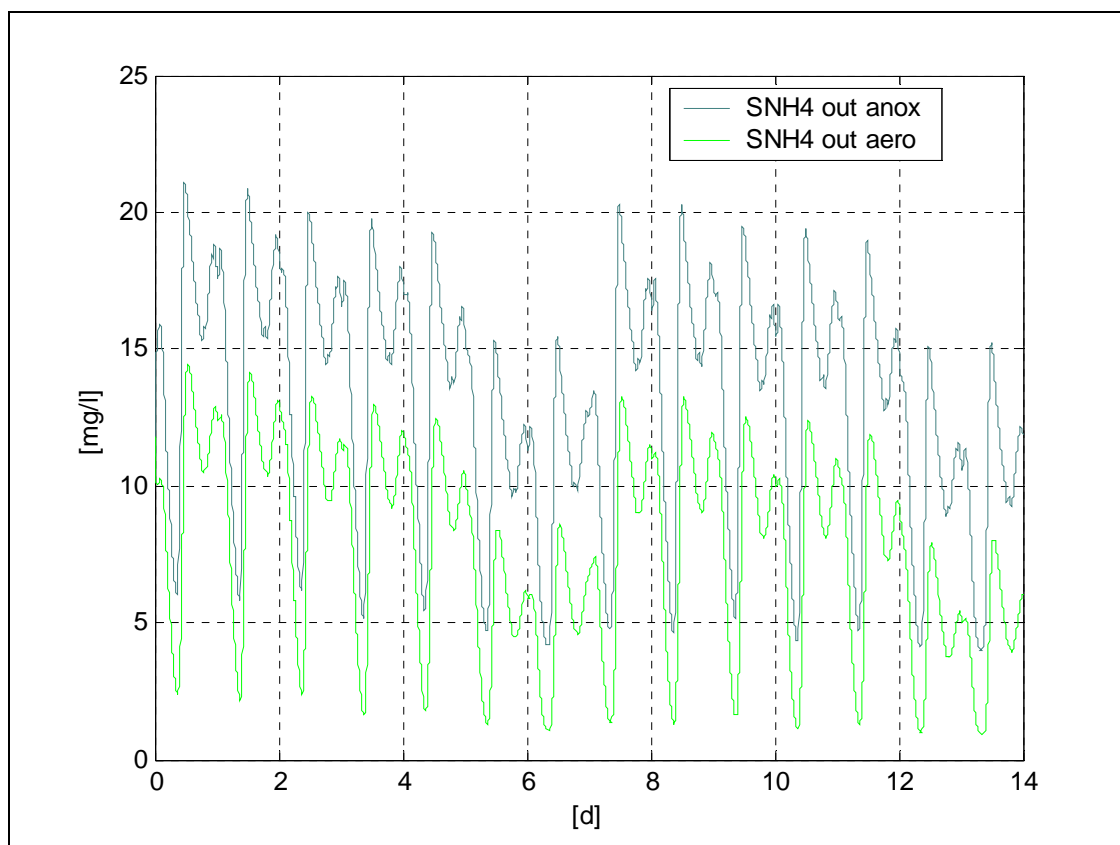


Figura 2. 14 - Abbattimento dell' NH_4 durante il processo di nitrificazione (con controllo PID+fuzzy con 2 ingressi).

La seguente tabella riassume i valori dell'indice di rendimento dell'areazione AE e quelli dell'indice di qualità dell'effluente EQ ottenuti in funzione del tipo di controllo:

<i>Tipo di controllo</i>	<i>Indice AE (kWh/d)</i>	<i>Indice EQ (kg/d)</i>
Nessuno	9682	7433.2
PID con DO_{sp} costante	1658.9	6334.4
PID+fuzzy con DO_{sp} funzione della concentrazione di NH_4^+	1167.2	7561.5
PID+fuzzy con DO_{sp} funzione della concentrazione di NH_4^+ e della sua derivata	1135.8	7775.5

Tabella 2. 1 – Confronto fra l'energia spesa per l'areazione e l'indice di qualità .

Si osservi che l'indice di qualità tende ad aumentare nel caso di DO_{sp} variabile: ciò è imputabile alle maggiori quantità di composti azotati in uscita (sia NO_x che ammonio) rispetto a quelle ottenute nella simulazione con set-point costante. Si deve comunque tener presente che questo non comporta violazioni dei limiti di legge e quindi l'aumento di EQ , in questo caso, non implica un sostanziale deterioramento delle caratteristiche dell'effluente; l'indice EQ , infatti, non rappresenta una misura "assoluta" della qualità dell'effluente, ma un indicatore utile per confrontare situazioni diverse, che preferibilmente deve essere integrato con la valutazione del numero e della durata delle violazioni.

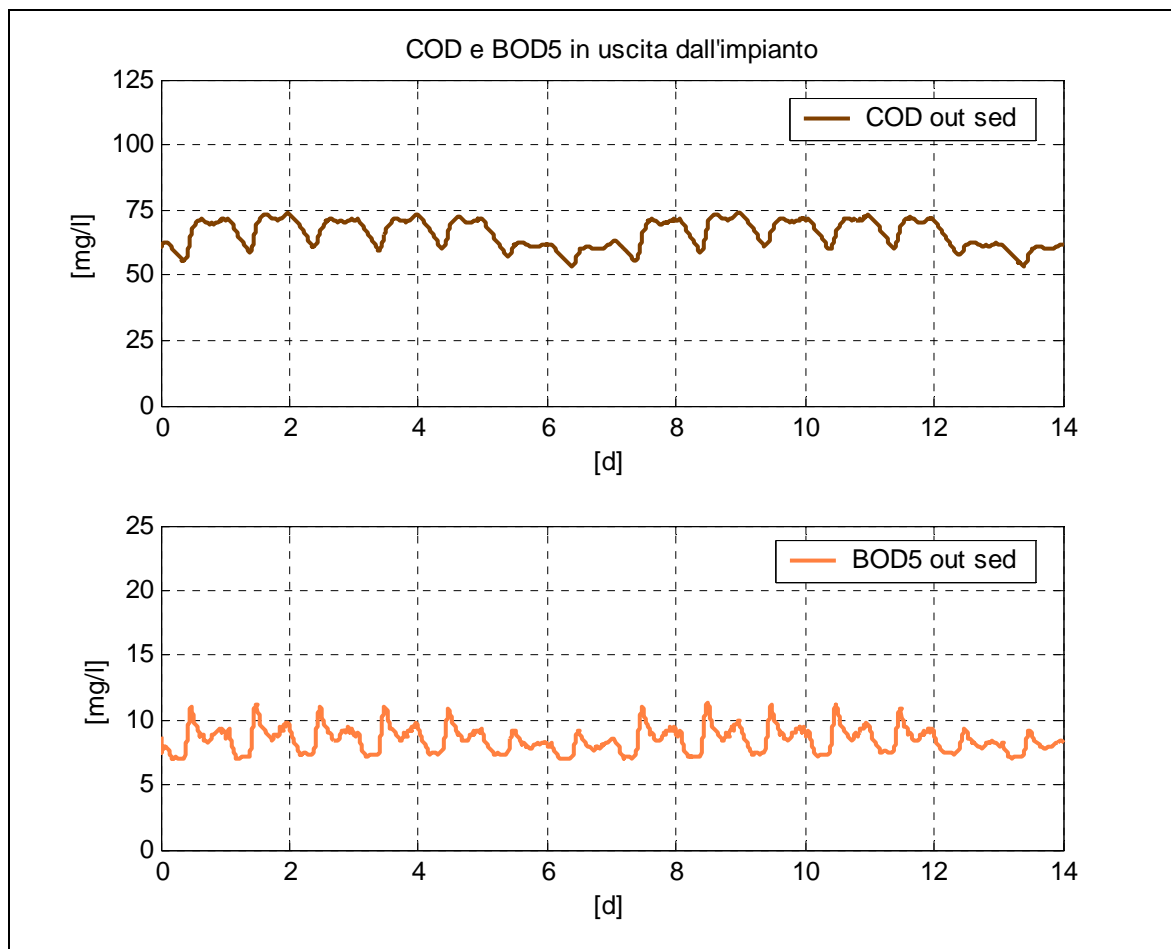


Figura 2. 15- Andamento di COD e BOD in uscita dall'impianto (con controllo PID+fuzzy con 2 ingressi).

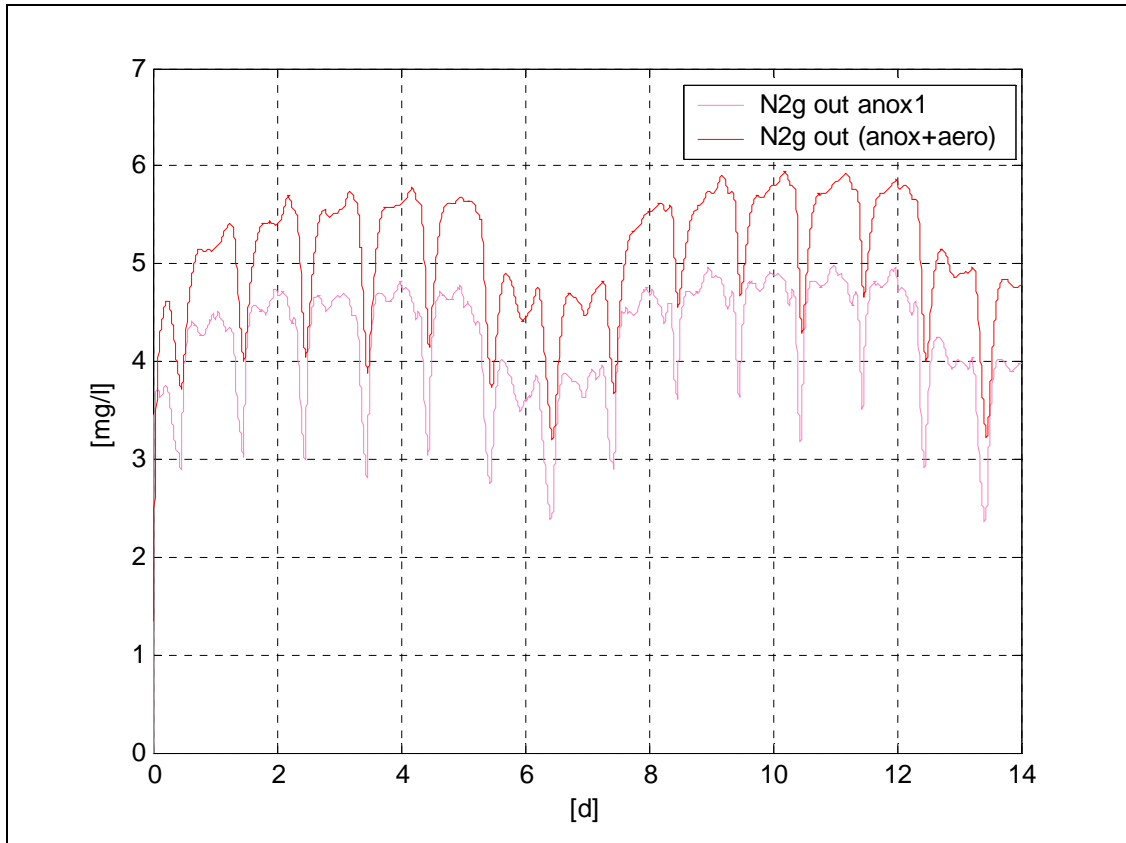


Figura 2. 16 - Azoto gassoso in uscita sia dalla vasca anossica che da quella aerobica (con controllo PID+fuzzy con 2 ingressi).

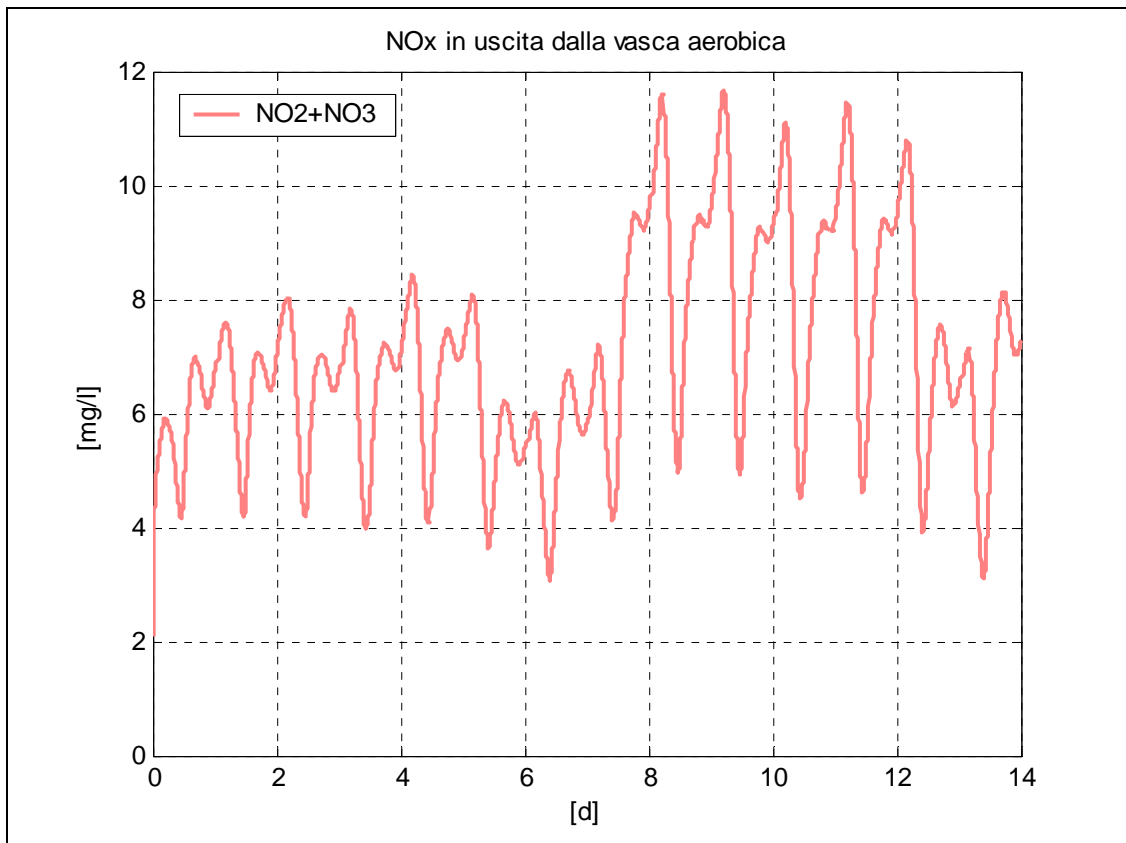


Figura 2. 17 - NO_x in uscita dalla vasca aerobica (con controllo PID+fuzzy con 2 ingressi).

Appendice

Listato del programma di lancio del modello ASM3_2N con controllo dell'ossigeno disciolto in funzione della nitrificazione.

```
% Go_Plant3_2step_2v_PID_fuzzy.m
% File di lancio per la simulazione di un impianto di depurazione biologica a fanghi
% attivi formato da : 1 vasca ANOX + 1 vasca AERO + SEDIMENTATORE
% con modello di processo biologico ASM3_2N e controllo PID dell'areazione con
% DOsp scelto da un controllore fuzzy in funzione della nitrificazione

clear all
close all

%--- Caricamento dei file dati .mat contenenti gli INGRESSI e le CONDIZIONI INIZIALI ---
path(path,'SerieTemporali')

cd SerieTemporali      % La directory corrente diventa la cartella 'Serie Temporali'

a=uiigetfile('*.*mat'); % Carica i dati in ingresso
nomefile=a;
cd ..
eval(['load ',nomefile ]);

NH4_DOsp1=readfis('NH4_DOsp1'); %Caricamento del file.FIS che implementa il
                                %controllore fuzzy con 2 ingressi

t_fine=t_in(length(t_in));
tn=10; % Per eliminare l'errore x sed. già carico nel bilancio di Ntot
load cond_iniz.mat % Carica le delle condizioni iniziali

%--- Caricamento dei file .m contenenti gli altri PARAMETRI da passare alle S-function ---

Param_Cstr3_2step % Inizializza il Cstr3 (modello ASM3_2N)
Param_Sed3_2step % Inizializza il Sedimentatore3 (modello di Takacs)
Param_Plant3_2step % Inizializza i parametri dell'impianto

% Parametri di attuazione degli areatori
Kg=200;
a=0.5;
% Parametri del regolatore PID
Kp=250; %azione proporzionale
Ki=100; %azione integrale
Kdd=550; %azione derivativa
Ua_max=8000;

%--- Lancio della simulazione richiamando lo schema Simulink ---

options=simset('RelTol',1e-1); % RelTol=tolleranza relativa
```

```

tic
[t,x,y]=sim('plant3_2step_base_2v_do_nh4_2',t_fine,options);
toc

max(AE)          % Visualizza il valore dell'indice di rendimento dell'areazione

figure(1)
plot(tsim,S_out_anox1(:,4),'color',[0.251 0.502 0.502])
hold on
plot(tsim,S_out_aero1(:,4),'g')
legend('SNH4 out anox','SNH4 out aero',0),xlabel('[d]'),ylabel('[mg/l]'),grid

figure(2)
plot(tsim,S_out_anox1(:,3),'color',[1.000 0.502 0.753])
hold on
plot(tsim,S_out_aero1(:,3),'r')
legend('N2g out anox1','N2g out (anox+aero)',0),xlabel('[d]'),ylabel('[mg/l]'),grid
%
figure(3)
plot(tsim,NOx_out_aero1,'color',[1.000 0.502 0.502])
legend('NO2+NO3',0),xlabel('[d]'),ylabel('[mg/l]'),grid,title('NOx in uscita dalla vasca
aerobica')
%
figure(4)
subplot(411);
plot(tsim,S_out_aero1(:,4),'g','LineWidth',2)
legend('NH4 out aero',0),ylabel('[mg/l]'),grid,axis([0 14 0 15])
subplot(412);
plot(tsim,S_out_anox1(:,2),'color',[0.686 0.004 0.361],'LineWidth',2)
legend('SS out anox',0),ylabel('[mg/l]'),grid,axis([0 14 0 15])
subplot(413);
plot(tsim,S_out_aero1(:,1),'b')
legend('DO out aero',0),ylabel('[mg/l]'),grid,axis([0 14 0 3])
subplot(414);
plot(tsim,Ua,'c')
legend('Ua',0),xlabel('[d]'),ylabel('[m^3/d]'),grid,axis([0 14 0 4000])
    
```

Programma lancio	Simulink	Controllo	File.Fis
Go_Plant_3_2step_2v_PID_fuzzy	plant3_2step_base_2v_pid	PID	/
Go_Plant_3_2step_2v_PID_fuzzy	plant3_2step_base_2v_do_nh4	PID+fuzzy(solo NH4)	NH4_DOsp
Go_Plant_3_2step_2v_PID_fuzzy	plant3_2step_base_2v_do_nh4_2	PID+fuzzy (NH4+DNH4)	NH4_Dosp1

Tabella 1 – Schema dei programmi di lancio, dei modelli Simulink e dei files.FIS impiegati.

Listato del programma di lancio per la valutazione dei parametri del regolatore PID.

```
%Param_PID.m
%
% File di lancio per la valutazione dei parametri del regolatore PID

clear all
close all

%--- Caricamento dei file dati .mat contenenti gli INGRESSI e le CONDIZIONI INIZIALI ---
path(path,'SerieTemporali')

cd SerieTemporali      % La directory corrente diventa la cartella 'Serie Temporali'

a=uiigetfile('*.*mat'); % Carica i dati in ingresso
nomefile=a;
cd ..
eval(['load ',nomefile ]);

t_fine=t_in(length(t_in));
load cond_iniz.mat     % Carica le delle condizioni iniziali

%--- Caricamento dei file .m contenenti gli altri PARAMETRI da passare alle S-function ---

Param_Cstr3_2step      % Inizializza il Cstr3 (modello ASM3_2N)
Param_Sed3_2step       % Inizializza il Sedimentatore3 (modello di Takacs)
Param_Plant3_2step     % Inizializza i parametri dell'impianto

% Parametri di attuazione degli areatori

Kg=200;
a=0.5;

% Parametri del regolatore PID

DOsp=2;                %set-point del DO necessario per modello con solo
Ua_max=8000;

% Procedura iterativa per la stima dei parametri in funzione di ITAEU

itaeu_tmp = 10;
for Kp = 200:10:250
    for Ki = 70:10:110
        for Kdd = 400:50:600

%--- Lancio della simulazione richiamando lo schema Simulink ---

options=simset('RelTol',1e-1); % RelTol=tolleranza relativa

tic
```

```
[t,x,y]=sim('plant3_2step_base_2v_PID',t_fine,options);  
toc
```

```
% Condizione per la scelta dei parametri
```

```
if max(ITAEU) < itaeu_tmp  
    itaeu_tmp = max(ITAEU);  
    Kp_opt = Kp;  
    Ki_opt = Ki;  
    Kdd_opt = Kdd;  
end  
  
end  
end  
end  
%  
ITAEU_opt = itaeu_tmp;  
[ITAEU_opt,Kp_opt,Ki_opt,Kdd_opt]
```

L'immagine seguente rappresenta lo schema Simulink 'plant3_2step_base_2v_do_nh4_2' che implementa il modello ASM3_2N con controllo dell'areazione e DO_{sp} funzione della concentrazione di ammonio in vasca aerobica e della sua derivata.

