

MONITORAGGIO DELLA QUALITA' DELLE ACQUE DEPURATE CON L'UTILIZZO DI SENSORI INTELLIGENTI LOW-COST

Vincenzo Bonvicini (A.M.G.A. SpA – Via SS. Giacomo e Filippo, 7 - 16122 Genova)
Giovanni Mappa (ANOVA/Sespim – Centro Direzionale Is. E5 – 80143 Napoli)
Paolo Sabatino (I.I.A.S.S. – Via G. Pellegrino, 19 – 84019 Salerno)

Sommario

L'utilizzo di tecnologie informatiche basate su un approccio più vicino all'intelligenza umana e alla conoscenza, piuttosto che a rigide schematizzazioni deterministiche della realtà, possono dimostrarsi di reale ausilio nel controllo di processi caratterizzati dalla competizione di componenti fisiche, chimiche e biologiche, come appunto quelli riguardanti la depurazione.

Viene presentato uno strumento sperimentale per il monitoraggio on-line della qualità delle acque reflue depurate in grado di valutare sia la concentrazione di inquinante organico (BOD, COD) residuo presente nell'effluente, sia il grado di disinfezione ottenuto con sistemi di dosaggio di ipoclorito di sodio, in termini di percentuale di presenza residua di colibatteri.

Lo strumento è stato realizzato mediante l'utilizzo di sensori basati sulla conoscenza (intelligenti), integrati alla tradizionale strumentazione on-line di processo (pH, redox, ossigeno disciolto, torbidità, conducibilità, ecc.). L'importanza della applicazione è subito comprensibile se si considera da una parte che per la misura in laboratorio del BOD₅ sono necessari 5 giorni, e dall'altra che non esistono sul mercato strumenti in grado di valutare on-line l'efficienza di disinfezione finale.

L'obiettivo è quello della messa a punto un sistema low-cost di monitoraggio di processo atto a garantire, al minimo costo, applicazioni completamente integrabili con lo stato di fatto degli impianti di depurazione esistenti sul territorio nazionale e non.

Parole chiavi

Logica Fuzzy, sensori software intelligenti, acque reflue urbane, depurazione biologica, BOD, disinfezione per clorazione

Introduzione

In questi anni vi è un fervente interesse verso le Reti Neurali e la Logica Fuzzy (tecniche denominate nel loro insieme *Soft Computing*), non per l'indubbia rilevanza teorica e scientifica, ma per le possibili applicazioni pratiche in cui possono essere impiegate (ad esempio, nel settore della diagnostica, della sensoristica intelligente, del controllo automatico, dell'ottimizzazione di processo, ecc.), difficilmente realizzabili con le metodologie dell'informatica classica. Una particolare attenzione viene oggi rivolta all'applicazione di queste metodologie al monitoraggio e all'ottimizzazione di processo negli impianti di depurazione delle acque reflue di scarichi urbani e industriali.

Per questo tipo di impianti sussistono problematiche legate sia alle caratteristiche intrinseche del processo depurativo (quasi sempre caratterizzato da un "cuore biologico" difficilmente monitorabile in tempo reale con la tradizionale strumentazione di processo) sia alla complessità di gestione degli impianti che, nella grande maggioranza dei casi, si presentano privi non solo della sensoristica di processo, ma spesso anche della possibilità di operare regolazioni sufficientemente flessibili dei parametri fondamentali della conduzione del processo depurativo.

Pertanto, la principale limitazione nell'applicazione delle Reti Neurali si riscontra a livello di quantità e rappresentatività dei dati storici di funzionamento effettivamente disponibili, e necessari per realizzare un corretto apprendimento del sistema.

L'applicazione della Logica Fuzzy sembra effettivamente più semplice e più vicina al modo di affrontare il *problem solving* degli esperti umani, ma presuppone a sua volta una conoscenza esplicita, sia pure non completa od incerta, delle "regole" che governano l'evoluzione di un determinato processo.

In questo lavoro, l'AMGA S.p.A. (Azienda Mediterranea Gas e Acqua) e l'ANOVA/Sespim, che da tempo si occupa di soluzioni software basate sulla conoscenza a problemi di monitoraggio ambientale, diagnostica e controllo di processi industriali, espongono a grandi linee lo studio rivolto al monitoraggio della qualità delle acque reflue depurate, con particolare riferimento alla stima on line del BOD e della percentuale di colibatteri totali.

Il processo nei depuratori biologici a fanghi attivi

Il comportamento reale degli impianti di depurazione acque e, in particolare, di quelli biologici a fanghi attivi, è difficilmente riconducibile a modelli rigidi e deterministici. Basti pensare soltanto ciò che succede nel "cuore" del processo depurativo, costituito dal reattore biologico e dalla sedimentazione secondaria (Fig. 1):

- nel reattore avvengono i fenomeni di bioflocculazione e di metabolismo batterico che richiedono un giusto e costante equilibrio tra biomassa (*MLSS*), quantità di substrato (*BOD*), ossigeno disciolto (*DO*), spazio (*V*) e tempo (*Q_i*) a disposizione per il completamento delle reazioni biochimiche;
- nel sedimentatore avviene la separazione tra l'acqua chiarificata ed il fango biologico, che viene continuamente rimandato nel reattore e rimiscelato (mixed-liquor) con il liquame influente.

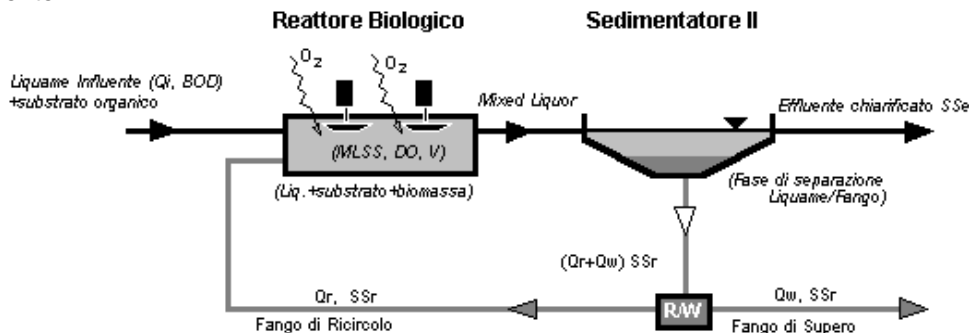


Fig. 1: Reattore Biologico e Sedimentazione Secondaria

L'obiettivo di base nella conduzione operativa dell'impianto è quello di mantenere costantemente elevato il rendimento depurativo, il quale subisce l'influenza principalmente dei seguenti parametri monitorabili che individuano lo stato di funzionamento del reattore biologico:

- 1) i **Solidi Sospesi Totali** presenti nel fango, la cui concentrazione (in *mg/l*) è indicata con **MLSS** (Mixed-Liquor Suspended Solids), costituiti per il 70-80% di sostanza organica e solo dal 5-10% di sostanza inorganica, ed il cui contenuto effettivo di *biomassa attiva* si aggira sul 10-40% del totale. Risulta un parametro determinante per verificare se il reattore è in grado di digerire il carico di *BOD* influente, e per un'ampia classe di digestori biologici concentrazioni pari a 3000-5000 *mg/l* sono ottimali ai fini di una buona efficienza di depurazione;
- 2) il **Tempo di Ritenzione TR** (o di residenza idraulico) definito come il tempo (in ore) di ritenzione del liquame nella vasca di aerazione, vale a dire:

$$TR [h] = V/Q_i$$

Come è intuitivo, i tempi di ritenzione richiesti per una buona efficienza di depurazione risultano tanto più elevati quanto maggiore è la concentrazione di *BOD* nei liquami in arrivo e quanto minore è la concentrazione del fango nella miscela aerata;

- 3) l'**Ossigeno Disciolto DO** rappresenta la concentrazione (in *mg/l*) di ossigeno molecolare che si trova allo stato di soluzione nell'acqua. Si tratta di un parametro molto importante in quanto condiziona la vita di tutti gli organismi presenti nell'acqua, in particolare di quelli che presiedono ai processi di depurazione biologica. I vari microrganismi dei processi depurativi biologici si sviluppano adeguatamente solo con concentrazioni di ossigeno pari a 1-2 *mg/l*;

- 4) la **Temperatura T** del liquame influenza il processo a livello biochimico e microbiologico: almeno entro certi range (tra i 10 e i 30°C), un aumento della temperatura corrisponde un aumento della velocità delle reazioni biologiche e viceversa. Per temperature inferiori ai 10°C si ha un notevole rallentamento della velocità del processo, mentre dai 10 ai 30°C la velocità metabolica aumenta di circa il doppio per ogni incremento di 10°C.

Nel seguito faremo riferimento anche ad altre importanti parametri. Il **prodotto Tempo-Concentrazione TRS** [*d·KgMLSS/m³*] nella vasca di aerazione esprime l'equilibrio tra la quantità specifica di biomassa ed il tempo necessario per fare avvenire correttamente i processi metabolici e di bioflocculazione tra biomassa e substrato. Pertanto, il parametro Tempo-Concentrazione si scrive:

$$TRS [d \cdot KgMLSS/m^3] = TR \cdot MLSS / 24000$$

Il **rendimento di depurazione η** (o efficienza di rimozione del *BOD*) è legato alla quantità di inquinante rimosso, in termini di *BOD*, e viene espresso come un indice [0, 1]:

$$\eta = (BOD_i - BOD_u) / BOD_i$$

dove *BOD_i* = valore del *BOD* in ingresso alla sezione di trattamento, e *BOD_u* = valore del *BOD* in uscita dalla sezione di trattamento.

Monitoraggio della qualità delle acque reflue depurate

Molte grandezze d'interesse fondamentale nella conduzione di un impianto di depurazione non sono rilevabili in tempo reale da sensori di tipo classico, come quelli per la misura della temperatura, dell'ossigeno disciolto, del pH, della torbidità, del potenziale Redox, ecc.

In generale è necessario ricorrere a prove di laboratorio più o meno automatizzate, che hanno come limite il tempo richiesto per effettuarle. L'alternativa consiste nell'escogitare dei sensori software in grado di valutare parametri come il BOD, il COD, la percentuale di colibatteri totali, ecc., che risulta un'impresa ricca di difficoltà intrinseche, specialmente connesse con l'incapacità di modellare il processo di interazione tra l'ambiente e i fenomeni indagati. La difficoltà incontrata nello sviluppo di sensori per il monitoraggio ambientale può essere in parte aggirata tramite gli strumenti del *soft computing*, nell'ambito della fusione dei dati forniti da sensori e dei loro modelli comportamentali (*sensor data and model fusion*).

L'interesse rivolto al *soft computing* nel campo del trattamento biologico delle acque reflue urbane deriva fondamentalmente da due fatti: il primo connesso alla complessità del processo di trasformazione della materia organica che coinvolge fenomeni di difficile modellazione e di altrettanto complesso controllo, come quelli associati al metabolismo di colonie di microrganismi. Il secondo è in relazione da un lato alla capacità degli strumenti del *soft computing* di rappresentare formalmente informazioni e conoscenze, anche di tipo euristico, facilmente descrivibili in forma linguistica e dall'altro alla capacità di estrarre informazioni e conoscenze utili alla descrizione comportamentale del processo e del suo controllo.

La depurazione degli scarichi civili avviene in impianti detti "biologici", in quanto la depurazione del liquame consiste essenzialmente in un processo biologico aerobico di abbattimento dell'inquinamento organico a mezzo dell'azione metabolica di culture microbiche (biomassa o fango attivo), concentrate in un volume limitato (reattore biologico), dove le sostanze organiche costituiscono il substrato alimentare. La reazione di bioconversione richiede un continuo apporto di ossigeno e di ceppi batterici in grado di metabolizzare il substrato organico. L'energia liberata viene utilizzata dai microrganismi stessi per le proprie funzioni vitali.

Il BOD (Biochemical Oxygen Demand) sta ad indicare proprio la quantità di ossigeno richiesta dai microrganismi aerobi per poter procedere all'assimilazione e alla degradazione delle sostanze organiche biodegradabili presente nei liquami. La "richiesta biochimica di ossigeno" risulta tanto più elevata quanto maggiore è la concentrazione di sostanze organiche presente nei liquami e quanto maggiore è la velocità (funzione della temperatura) con cui queste sono degradate dai microrganismi. Fattori limitanti della reazione sono anche il pH del liquame e la temperatura la cui influenza interessa sia l'attività batterica, sia la solubilità dell'ossigeno nell'acqua, sia infine la cinetica delle reazioni chimiche e biochimiche che avvengono nel sistema.

Il BOD si misura in un campione contenente sostanza organica biodegradabile e, dopo incubazione a 20°C in oscurità, corrisponde all'ossigeno consumato per l'azione batterica in un tempo prestabilito (in genere 5 giorni) e in condizioni controllate di temperatura.

La demolizione delle sostanze organiche, ad una temperatura del liquame di 20°C, può considerarsi completa in 20 giorni; né segue che una misura del BOD è temporalmente inconciliabile con i sistemi analitici on line di monitoraggio. Di norma si utilizza il valore del BOD riferito a 5 giorni (BOD₅), che rappresenta circa i 2/3 della richiesta di ossigeno totale. Di contro il BOD₅, oltre all'elevato lasso di tempo che intercorre fra il campionamento e la lettura del risultato, pone consistenti problemi di riproducibilità che ne compromettono la veridicità e l'affidabilità.

Logica Fuzzy e stima on-line del BOD

Come già sottolineato, la "richiesta biochimica di ossigeno" (BOD), in un intervallo di valori di pH compatibili con la reazione di bioconversione (valori compresi tra 6 e 8), è direttamente proporzionale alla concentrazione di substrato organico da rimuovere, ad una determinata temperatura del liquame:

$$BOD = k \cdot SS_e + c \quad (1)$$

dove SS_e sono i solidi sospesi effluenti all'uscita del depuratore, mentre k , c sono parametri che assumono statisticamente valori $[0.4, 0.8]$, $[0, 14]$. Appare evidente che se il rendimento di depurazione è piccolo il BOD in uscita è molto vicino a quello in ingresso, e viceversa, quindi k assume valori nell'intervallo $[0.4, 0.8]$ al variare del rendimento η . Quest'ultimo risulta una funzione fuzzy della concentrazione della biomassa $MLSS$, della portata influente Q_i , dell'ossigeno disciolto DO e della temperatura di ossidazione T :

$$\eta = f^{fuzzy}(MLSS, Q_i, DO, T) \quad (2)$$

Il parametro c invece, che rappresenta il contributo al BOD dei solidi disciolti nel liquame, è una funzione fuzzy dei solidi sospesi SSE e del valore della costante k :

$$c = f_{fuzzy}(SSE, k) \quad (3)$$

Il lavoro più impegnativo è individuare le regole fuzzy che descrivono le funzioni (2) e (3), le quali possano effettivamente esprimere una tendenza reale dei fenomeni biochimici che esse nascondono.

Tab. 1: Concentraz. biomassa

MLSS	Min [mg/l]	Max [mg/l]
B	0	3000
M	3000	5000
A	5000	10000

Tab. 2: Tempo di ritenzione

TR	Min [h]	Max [h]
B	1	4
M	4	7
A	7	10

Tab. 3: Rendimento di depurazione

η	TRS[d·Kg/m ³]	TRS[d·Kg/m ³]
B	(0, 0,2)	(5, 8)
MB	(0,2, 0,4)	(3, 5)
M	(0,4, 0,6)	(2, 3)
MA	(0,6, 0,8)	(1,2, 2)
A	(0,8, 1,2)	

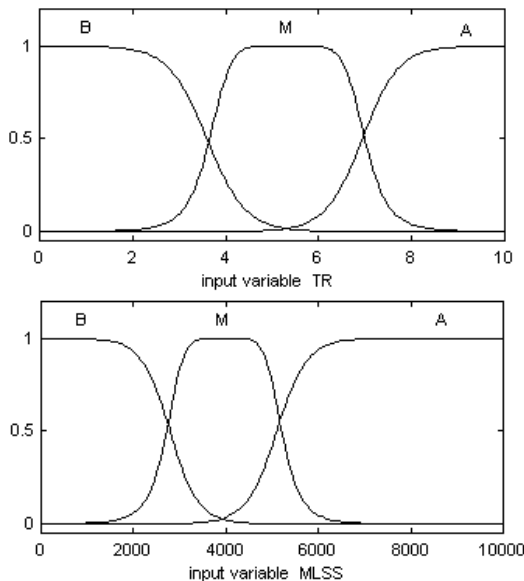


Fig. 2: Variabili di input del FIS.

Il problema della stima del rendimento di depurazione è stato diviso in due sottoproblemi, in quanto tra i quattro parametri della (2) possiamo isolare due coppie che compongono la loro influenza su η . Infatti, come accennato in precedenza, la concentrazione del fango ($MLSS$) e il tempo di ritenzione (V/Q) determinano il prodotto Tempo-Concentrazione (TRS), il cui valore deve essere mantenuto vicino ad un valore costante per avere una buona efficienza del processo. Nelle Tab. 1 e Tab. 2 riportiamo gli intervalli Min/Max di $MLSS$ e TR che definiscono tre classi: B =Basso, M =Medio e A =Alto, dove M deve intendersi intervallo ottimale ai fini del rendimento. Inoltre, questi intervalli sono insiemi fuzzy, come si può osservare dalla Fig. 2, per cui i loro estremi sono i punti di taglio (*crossover points*) delle funzioni di appartenenza di tipo sigmoide e a campana.

Nella Tab. 3 riassumiamo la possibile influenza del parametro TRS sul rendimento, con una serie di cinque classi per η : B , MB =Medio Basso, M , MA =Medio Alto e A , a cui corrispondono almeno un intervallo di valori per il prodotto Tempo-Concentrazione. Queste prime tre tabelle permettono di definire i pesi delle regole (Tab. 5) del **Sistema di Inferenza Fuzzy (FIS)** semplicemente dividendo in proporzione gli intervalli della Tab. 4, nella quale sono ricavati tutti i possibili prodotti, con le nostre ipotesi di influenza della Tab. 3.

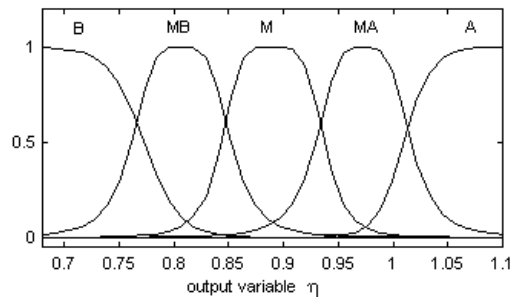


Fig. 3: Variabile di output del FIS.

Tab. 4: Tempo-Concentrazione [d Kg/m³]

TRS	min	max
TR(B) · MLSS(B)	0,00	0,50
TR(B) · MLSS(M)	0,13	0,83
TR(B) · MLSS(A)	0,21	1,67
TR(M) · MLSS(B)	0,02	0,88
TR(M) · MLSS(M)	0,50	1,46
TR(M) · MLSS(A)	0,83	2,92
TR(A) · MLSS(B)	0,03	1,25
TR(A) · MLSS(M)	0,88	2,08
TR(A) · MLSS(A)	1,46	4,17

Tab. 5: Pesi delle regole fuzzy

$\eta(B)$	$\eta(MB)$	$\eta(M)$	$\eta(MA)$	$\eta(A)$
0,395	0,403	0,202		
0,106	0,282	0,282	0,282	0,047
	0,131	0,137	0,457	0,274
0,214	0,233	0,233	0,233	0,087
		0,104	0,479	0,417
		0,440	0,384	0,176
0,140	0,164	0,164	0,205	0,328
		0,069	0,662	0,269
	0,431	0,369	0,200	

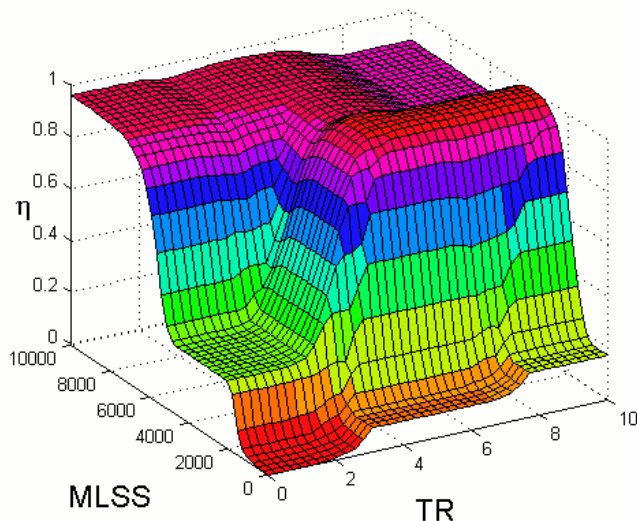


Fig. 4: Superficie di conoscenza.

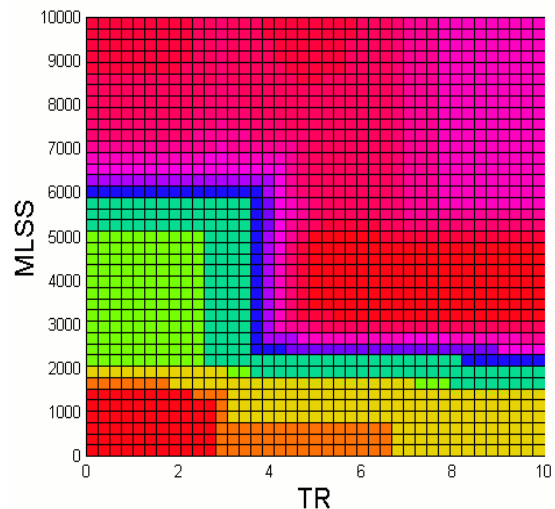


Fig. 5: Proiezione della superficie di Fig. 4.

Il risultato di questa ingegnerizzazione della conoscenza del processo è una superficie nello spazio dei parametri abbastanza articolata (Fig. 4 e Fig. 5), non descrivibile da un semplice modello matematico, e, cosa ancora più importante, tiene conto della “vaghezza” delle informazioni provenienti dal mondo reale tramite la definizione delle funzioni di appartenenza per le variabili di input.

L'efficienza della depurazione è influenzata ancora dagli altri due parametri della (2) che finora non abbiamo tenuto conto: la concentrazione di ossigeno disciolto (*DO*) nella vasca di ossidazione e la temperatura (*T*) del liquame. Il sistema fuzzy che viene implementato è molto più semplice del precedente, anche se resta invariato il numero di classi delle variabili di input e output (Fig. 6 e Fig. 7).

Anche in questo caso, *M* è il valore fuzzy che determina il miglior rendimento del reattore. Ciò avviene quando l'ossigeno disciolto è nell'intervallo 1-3mg/l e la temperatura del liquame è tra i 15 e 25°C (Fig. 6). Valori di ossigeno inferiori non permettono un'efficiente svolgimento delle reazioni di ossidazione, mentre valori superiori comportano soltanto uno spreco energetico (prolungato tempo di accensione dei dispositivi di aerazione). D'altra parte, una temperatura inferiore ai 10°C comporta un rallentamento della velocità del processo, mentre alzando la temperatura al di sopra dei 30°C diminuisce la solubilità dell'ossigeno molecolare in acqua, più difficilmente disciolto nel liquame e più velocemente assorbito dall'aria. In entrambi i casi, comunque, il risultato è un abbassamento del rendimento di depurazione.

Queste considerazioni di carattere bio-fisico permettono di scrivere semplici regole che legano una coppia di valori delle variabili di input con le classi fuzzy delle variabile di output (Fig. 7). Quello che si ottiene utilizzando un sistema di inferenza fuzzy standard è una superficie di conoscenza molto regolare (Fig. 8) in cui possiamo riconoscere le aree in cui l'efficienza del processo è elevata (Fig. 9).

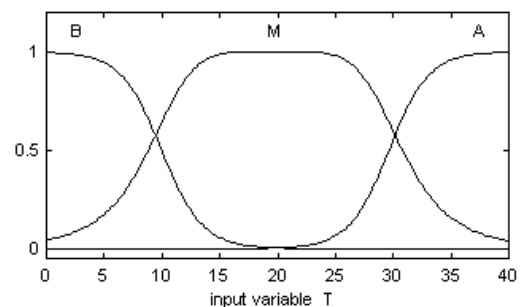
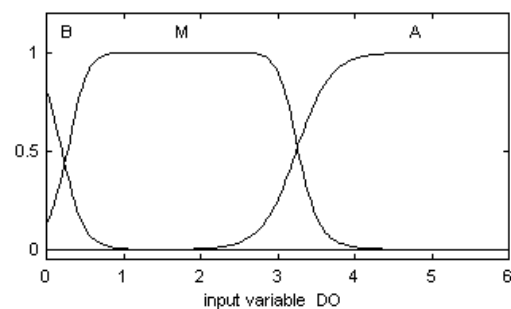


Fig. 6: Variabili di Input del FIS.

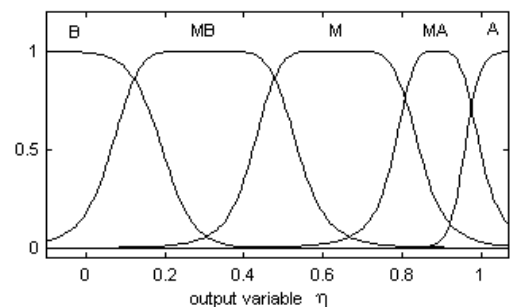


Fig. 7: Variabile di output del FIS.

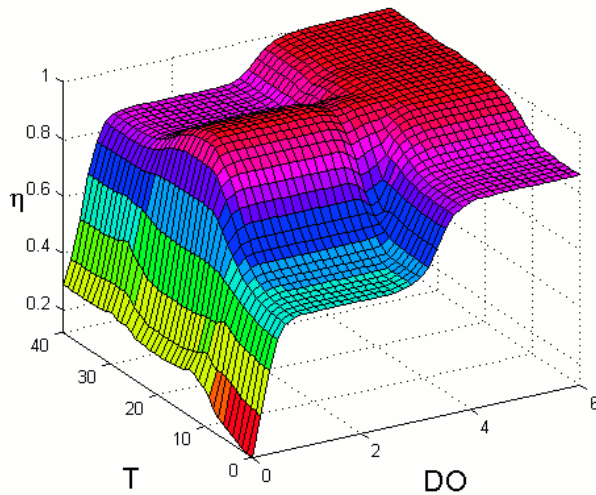


Fig. 8: Superficie di conoscenza.

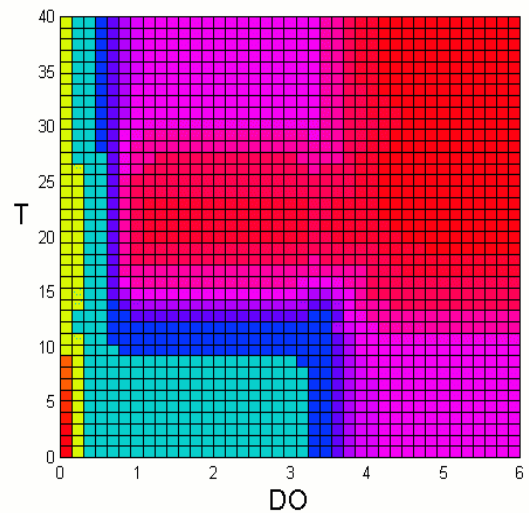


Fig. 9: Proiezione della superficie di Fig. 8.

Le due funzioni fuzzy ottenute per il rendimento vengono composte insieme utilizzando come operatore il prodotto numerico, in quanto l'influenza dei parametri DO e T è soltanto quella di modificare in senso positivo o negativo l'efficienza del processo determinata dagli altri due parametri $MLSS$ e TR . In questo modo abbiamo una forma funzionale (2) che è facilmente adattabile a impianti diversi, semplicemente modificando gli intervalli delle funzioni di appartenenza degli input fuzzy.

Il passo successivo nella stima del BOD è la determinazione della costante c della relazione lineare (1) con i Solidi Sospesi effluenti. Come abbiamo accennato, il parametro c rappresenta il contributo al BOD dei solidi disciolti nel liquame, e dipende in generale da k e SS_e con una legge non nota (3). Quello che possiamo dire sono soltanto indicazioni di massima, "vaghe", sulle due possibili dipendenze funzionali. In particolare, siccome il parametro k è legato al rendimento di depurazione η , quando η è grande k assume valori piccoli in modo da avere un BOD basso, quindi il contributo nella (1) dei solidi disciolti è maggiore. Mentre abbassando l'efficienza del processo il valore di k cresce di conseguenza: i solidi sospesi in uscita (SS_e) aumentano e così anche il BOD, ma la percentuale di solidi disciolti si abbassa.

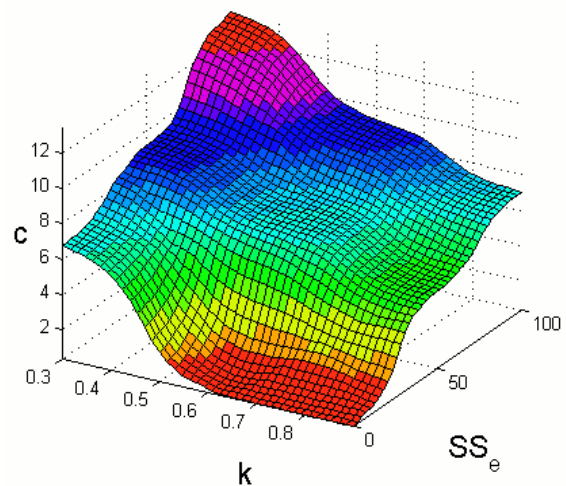


Fig. 10: Superficie di conoscenza.

Questi criteri di *buon senso* e *imprecisi* permettono di scrivere una serie di semplici regole per il sistema di inferenza fuzzy. I parametri k e c variano negli intervalli di valori che la letteratura scientifica ha verificato statisticamente più ricorrenti. La superficie di conoscenza è mostrata in Fig. 10.

La stima del BOD on-line non può prescindere da ulteriori parametri biofisici, oltre quelli già menzionati in precedenza. Il primo di questi è il "ritardo idraulico" imputabile alla caratteristica spaziotemporale intrinseca del processo depurativo rispetto ai punti fisici di monitoraggio dell'impianto: le misure effettuate a valle (SS_e) devono essere collegate con le misure a monte, con riferimento ai parametri che entrano in gioco nel modello (DO , $MLSS$, Q , T). In definitiva, il ritardo idraulico può essere definito come il tempo che un certo campione di liquame, avente definite caratteristiche chimico-fisiche, impiega per effettuare il percorso fisico monte-valle, fino al punto di effettiva misurazione.

Il secondo parametro considera invece, il naturale ritardo della risposta di una biomassa batterica di un reattore (ossidazione) di depurazione biologica, rispetto alle possibili perturbazioni esterne come, ad es., un calo improvviso della fornitura di ossigeno: tra l'istante in cui si manifesta un evento critico e il momento in cui la biomassa manifesta cenni di "sofferenza" con conseguenze tangibili sull'efficienza

di processo, passa un tempo di risposta (*ritardo biologico*) che è importante considerare nel modello di stima del BOD.

La fase di studio del problema è stata seguita da una successiva applicazione sul campo, con l'obiettivo di verificare la validità qualitativa delle conoscenze ingegnerizzate nel modello e di tarare il più possibile accuratamente le superfici di conoscenza dei parametri in gioco per avere anche un riscontro quantitativo.

La sperimentazione è tuttora in corso nell'impianto di depurazione di acque reflue urbane del Comune di Villasimius (CA) e presenteremo i primi risultati significativi.

In primo luogo, la nota correlazione lineare (1) riportata nella letteratura del settore, e che di solito si applica per ricavare una stima del BOD effluente, ha delle lacune fondamentali a cui il BOD "fuzzy" pone rimedio.

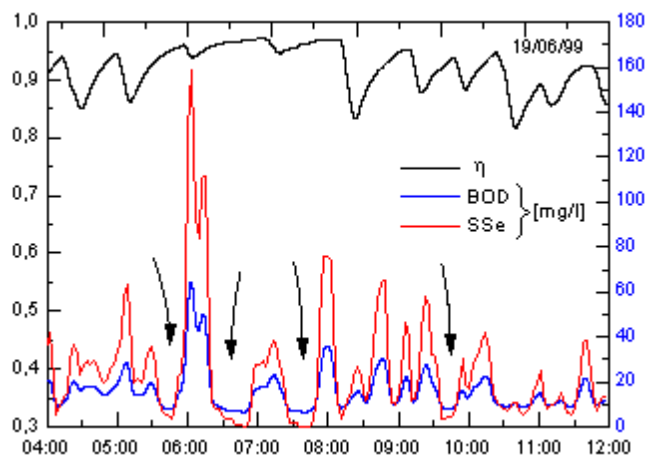


Fig. 11: Grafico sperimentale del rendimento η e del BOD fuzzy confrontato con l'andamento temporale degli SSe: le frecce indicano i punti in cui la componente disciolta dei solidi è predominante.

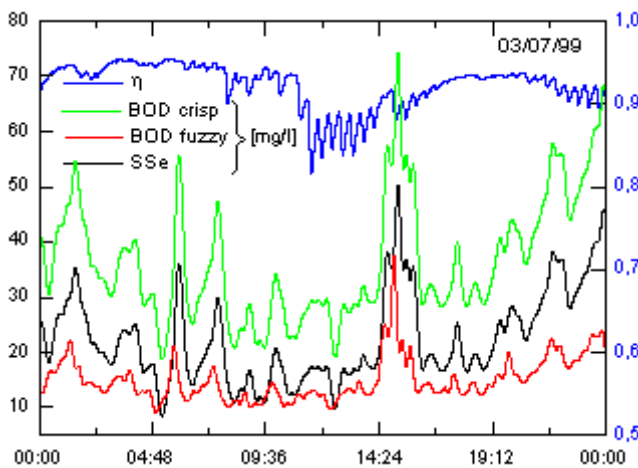


Fig. 12: Andamento sperimentale del BOD crisp e fuzzy al variare dei SS effluenti.

La principale carenza è che non risulta adeguato a prevedere "on-line" la concentrazione di BOD sulla base della sola misura dei SSe, sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo. Infatti, il modello lineare crisp (tratto verde della Fig. 12) insegue soltanto l'andamento dei SSe e non permette in genere di prevedere punti in cui è maggiore la componente disciolta (Fig. 11), che risulta comunque un evento solito nell'andamento del BOD effluente. Si osserva chiaramente un valore di BOD previsto sempre al di sopra dei SSe, mentre il BOD fuzzy ha una concentrazione minore dei solidi sospesi effluenti come è statisticamente verificato nella realtà.

Gli altri punti che il BOD fuzzy corregge con successo sono:

- 1) il modello (1) deve essere tarato su ogni impianto sulla base di un rilevamento statistico, il che comporta una campagna di misura dai costi troppo elevati soprattutto per impianti di piccole dimensioni;
- 2) la correlazione (1) è stata verificata su un campione statistico di centinaia di impianti in condizioni di esercizio regolari (rendimento depurativo nella norma), quindi non da nessuna informazione quando le condizioni di esercizio non sono quelle regolari.

Infatti, nelle normali condizioni di esercizio di un reattore biologico possono verificarsi condizioni in cui il rendimento scende fino al 70% (Fig. 13) e questo comporta un atteso aumento del BOD in uscita, come il nostro modello prevede, mentre la correlazione lineare statistica (1) basata su costanti k e c medie (oppure una rete neurale che non ha mai appreso questa eventualità) continua a seguire l'andamento degli SSe, senza tenere conto dell'abbassamento del rendimento di depurazione.

In alcuni punti della Fig. 13 possiamo apprezzare le caratteristiche di funzionamento del modello fuzzy. Alle ore 18:15 osserviamo un abbassamento eccessivo della concentrazione dell'ossigeno disciolto con una portata di circa 170 mc/h, che viene seguito dopo circa 20 min. (ritardo biologico) da una diminuzione del rendimento fino all'80%. Invece, alle ore 22:50 circa, osserviamo un uguale calo dell'ossigeno con una portata ancora maggiore (240 mc/h), che è seguito dopo il tempo di ritardo biologico da una diminuzione del rendimento più grande del precedente (circa 70%). Tutto questo è coerente con l'andamento del processo biologico.

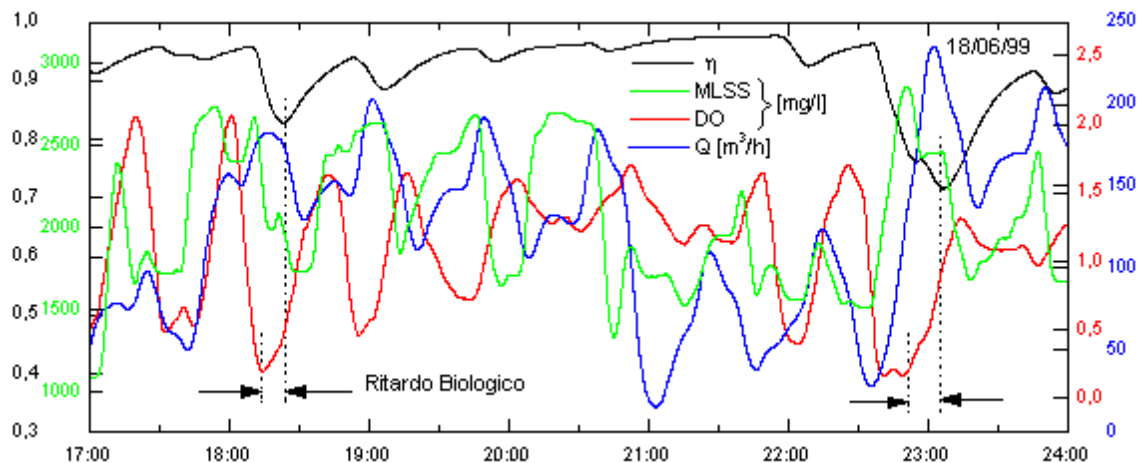


Fig. 13: Influenza dei parametri sull'andamento di η per l'impianto di Villasimius

Sistema fuzzy per la clorazione delle acque depurate

Tra i modelli di comune impiego per i disinfettanti chimici di uso più frequente [19], la relazione più diffusamente applicata è quella di Collins, Selleck, White, che hanno dimostrato sperimentalmente che, nell'effluente di una vasca di sedimentazione primaria sottoposto a clorazione, la riduzione dei batteri coliformi (N/N_0) è data dalle seguente espressione:

$$N/N_0 = (1 + 0.23 \times C_a \cdot t_c)^{-3} \quad (4)$$

dove: N numero di batteri coliformi al tempo t , N_0 il numero iniziale al tempo t_0 , C_a è la concentrazione attiva del disinfettante (mg/l), t_c il tempo di contatto (minuti).

La precedente espressione è specifica per la clorazione di liquami depurati anche parzialmente ed in particolare risulta adatta al caso di effluenti solo parzialmente nitrificati: in tale situazione C_a è ridotta (cloro residuo presente sotto forma prevalentemente combinata) ed i tempi di contatto sono lunghi (dell'ordine di 60 minuti).

Un ulteriore aggiustamento è stato tentato con il modello di Selleck, Saunier, Collins che è un evoluzione della (4), studiata per consentire l'applicazione di altri tipi di disinfettante oltre al cloro, secondo il quale:

$$N/N_0 = (C_a \cdot t_c / b)^n \quad (5)$$

ove (a parte i simboli già noti): b rappresenta il valore di soglia del prodotto $C_a \cdot t_c$, al di sotto del quale non si ha disinfezione mentre n è un coefficiente empirico.

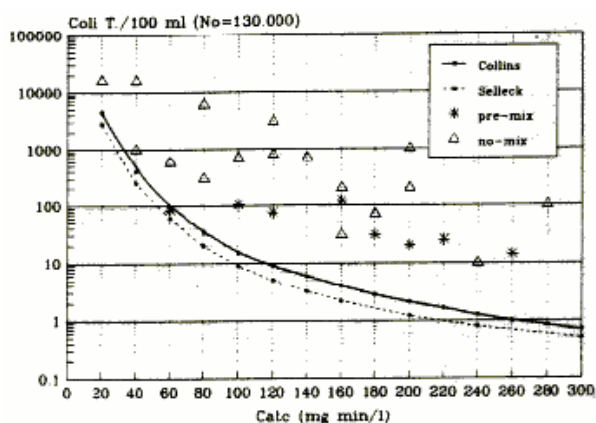


Fig. 14: Rappresentazione dell'andamento dei Coli T. in uscita dalla clorazione ($N_0=130.000$ Coli T./100ml) secondo i modelli: Collins et al. e Selleck et al.; si riportano anche alcuni punti sperimentali derivati da recenti studi pilota su liquami affinati, con o senza pre-miscelazione rapida [19].

Nella Fig. 14 a lato sono mostrati gli andamenti calcolati a partire delle relazioni (4) e (5), nel caso della clorazione con ipoclorito: in ascisse è riportato il prodotto $C_a \cdot t_c$ ed in ordinate il numero residuo di coliformi in uscita dal trattamento. Nel caso in esame la simulazione è stata condotta per $N_0 = 130.000$ Coli T./100ml e sono mostrati anche alcuni valori sperimentali rilevati sull'effluente di un impianto di depurazione solo parzialmente nitrificato. Dagli andamenti della Fig. 14 si può facilmente desumere che i due modelli danno risultati complessivamente piuttosto simili. Inoltre, i risultati sperimentali sono risultati in pratica sempre peggiori di quelli prevedibili sulla base dei modelli e solo quelli denominati pre-mix sono abbastanza vicini a quelli calcolati.

La creazione di un sensore intelligente che possa prevedere l'abbattimento di colibatteri per dosaggio di ipoclorito non può prescindere da questi risultati scientifici. Il sensore software per la stima della percentuale dei colibatteri totali è realizzato con un sistema di inferenza fuzzy simile ai precedenti, le cui variabili di input sono (Fig. 15): il potenziale Redox (*ORP*), legato alla concentrazione di disinfettante, e la portata dei liquami (Q_e), che determina il tempo di ritenzione nella vasca di clorazione.

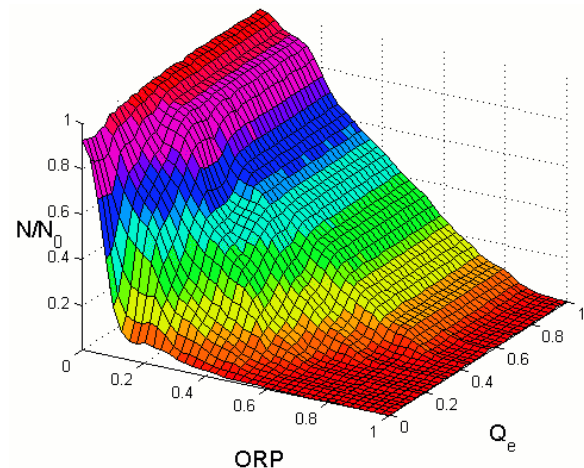


Fig. 15: Superficie di conoscenza.

Le regole di inferenza si basano sul fatto che l'*ORP* cresce all'aumentare della concentrazione di disinfettante, e quindi un potenziale positivo indica una buona azione battericida. Invece, *ORP* negativi significa mancanza di disinfettante e quindi una percentuale di colibatteri totali molto alta. Inoltre, maggiore è il tempo di ritenzione (legato alla portata) dei liquami nella vasca di clorazione, migliore è la disinfezione delle acque chiarificate. Il tipo di dipendenza funzionale di N/N_0 generato dalle regole è però modellato in modo da rispettare le informazioni derivati dai risultati scientifici richiamati precedentemente.

Per realizzare uno strumento piuttosto generale, le variabili di input vengono considerate come grandezze normalizzate all'intervallo di valori consueti (serie storiche) di ogni impianto, cioè l'input è calcolato come $(x-x_{min})/(x_{max}-x_{min})$.

Avendo a disposizione (Fig. 15) una dipendenza di N/N_0 da due parametri usualmente monitorati on-line su ogni impianto di depurazione di acque reflue urbane, possiamo controllare automaticamente la clorazione dei liquami effluenti con una regolazione che tiene conto non solo del potenziale di ossidoriduzione, come avviene di solito, ma anche della portata in uscita dall'impianto.

In questo modo si evita di dosare la stessa quantità di disinfettante per un rigagnolo e per un fiume di acqua depurata.

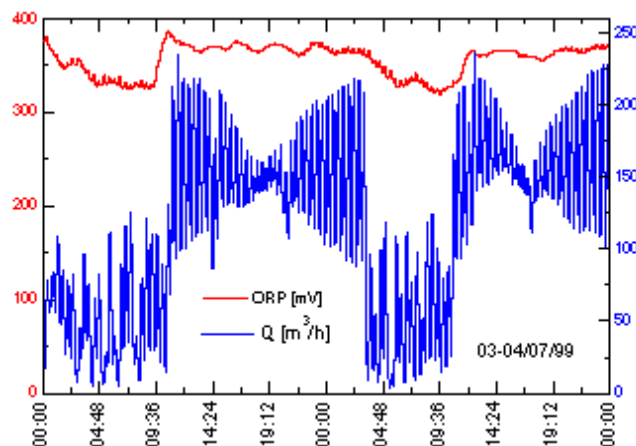


Fig. 16: Grafico sperimentale del ORP in funzione della Q per l'impianto di depurazione di Villasimius regolato dal modello fuzzy

Utilizzando la stima fuzzy della percentuale di colibatteri, abbiamo controllato con successo le pompe di clorazione dell'impianto di Villasimius (Fig. 16), ottenendo un valore di potenziale Redox molto alto (mediamente 350 mV) per valori della portata effluente anche molto diversi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Cammarata, *Reti Neurali*, Collana di Informatica, ed. EtasLibri 1° ediz., 1990.
- [2] A. Boscolo, *La regolazione degli Impianti a Fanghi Attivi* - 3° Convegno di Terra d'Otranto - pp.369-383 - Lecce 25-26 Maggio, 1995.
- [3] B. Fringuelli, *Come Ragionare in Contesti Imprecisi* - Automazione Oggi n.167 - pp.162-167 - Febbraio 1995.
- [4] A. Polese, G.Rotondo, *Reti Neurali per la Gestione degli Impianti di Depurazione* - Scritti in Onore di Girolamo Ippolito - Lacco Ameno, Vol.I - Memorie,16-17 Maggio 1991.
- [5] J.F. Andrews, *Dinamics and Control of Activated Sludge Process* - Water Quality Management Library - Vol.6, 1992.
- [6] Ni-Bin Chang, *Facing Uncertainty in Water Quality Management* - Water Quality International, Nov-Dec 1996
- [7] Y.P. Tsai, C.F. Ouyang, M.Y. Wu e W.L. Chiang - *Fuzzy Control of a Dynamic Activated Sludge Process for the Forecast and Control of Effluent Suspended Solid Concentration* - Water Science and Technology - Pergamon, Vol.28, n.11-12, pp.355-367, 1993
- [8] Y.P. Tsai, C.F. Ouyang, M.Y. Wu e W.L. Chiang - *Construction of an on-line Fuzzy Controller for the Dynamic Activated Sludge Process* - Water Science and Technology - Pergamon, Vol.28, n.4, pp.913-921, 1994
- [9] S. Marsili-Libelli, *Deterministic and Fuzzy Control of the Sedimentation Process*, Med. Fac, Landbouww. Univ. Gent, 57/4b. 1992.
- [10] M. Häck and M Köhne, *Estimation of Wastewater Process Parameters using Neural Networks*, Water Science and Technology. vol 33, n 1. pp. 101-115, 1996
- [11] S. Marsili-Libelli, *Fuzzy Clustering of Ecological Data*, Coenoses. vol 2, pp.95-106, 1989
- [12] Bruce Gall and Gilles G.Patry (1989) -*Knowledge-Based System for the Diagnosis of Activated Sludge Plant* - Lewis Publishers, INC., MI 48118. Printed in U.S.A.
- [13] Barnett, G.G. Patry, I. Takacs (1993) - *Activated Sludge Process Bulking and Foaming Based Expert System for Diagnosis and Control* - Pergamon Press - New York, U.S.A.
- [14] D.W. Rolston (1991) - *Sistemi Esperti teoria e sviluppo* -McGraw-Hill Libri Italia srl
- [15] David Jenkins, Michael G. Richard, Glen T. Daigger (1994) - *Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking and Foaming* - 2nd Edition - Lewis Publishers, INC., MI 48118. Printed in U.S.A.
- [16] L. Masotti (1987) - *Depurazione delle Acque* - Tecniche ed impianti per il trattamento delle acque di rifiuto - Ediz. Calderini - Bologna.
- [17] Ichikawa, K. Simizu and K. Iwahori (1993) - *Diagnosis Expert System for the Activated Sludge Process using biota observed by microscopic examination* - Water Science and Technology - Vol.28, No 11-12, pp.231-237.
- [18] M.Häck, M. Köhne (1996) - *Estimation of Wastewater Process Parameters Using Neural Networks* - IAWQ Water Science & Technology - Vol.33 N.1 1996- pagg.101,115.
- [19] C. Nurizzo - *La disinfezione nei liquami depurati: modelli e processi*
- [20] G. Mappa, G. Salvi, R. Tagliaferri, *A Fuzzy Neural Network for the On-Line Detection of the BOD*. Proceedings of WIRN Vietri 95, World Scientific, Singapore, 1995
- [21] G.Mappa, G.Falivene, M.Meneganti, R.Tagliaferri -(1996) -*Fuzzy Neural Networks for Function Approximation* - IIASS -II Workshop Italiano sui Criteri di Valutazione della Efficienza delle Reti Neurali in Campo Industriale - Vietri 10 Dic.96.
- [22] G. Mappa, A. Sciarretta, S. Moroni e M. Allegretti (1993) - *Sistema esperto per la Gestione degli Impianti di Trattamento delle Acque Urbane* - Congresso Biennale ANDIS'93 - Palermo- 21-23 Settembre -Vol.II, pagg. 255-266.
- [23] G. Mappa, C. Di Iaconi (1995) *MICROexpert: un Sistema esperto per il Controllo dei Problemi di Separazione Solido-Liquido nei Depuratori a Fanghi Attivi, basato sulle metodiche di indagine microscopica* - Ingegneria Sanitaria Ambientale (ANDIS) - N.1 Gen-Feb 95 - pagg. 31-39.

- [24] G. Mappa, M.C. Tomei, C Di Iaconi, A.C. Di Pinto, R.Ramadori (1996) - "*Development of an Expert System for Nitrogen Removal Process Control*" -EWPCA European Water Pollution Control - Volume 6, Numero 6, Novembre 1996, pagg.45-50.
- [25] N. Di Biase, G.Mappa, M.Meneganti (1997) - *On-line diagnostic system with intelligent software instrumentation based on neural-fuzzy networks* - SMI'97 International Congress on Plant Maintenance - Bologna, 19-22 Feb. 1997
- [26] V. Bonvicini, M. Indelicato, G. Mappa, F. Guglielmi (1997) - *Piattaforma Integrata di Sistema esperto per il controllo in tempo reale dell'impianto di depurazione "Darsena" di Genova* - L'AMBIENTE - Ranieri Editore, N.1 Gen.-Feb., 1997.
- [27] V. Bonvicini, M. Indelicato, G.Mappa, *Sistema Esperto per il Controllo dei Depuratori Biologici*, ANIPLA Firenze - Giornata di Studio sull'Applicazione del Soft Computing al Controllo di Processo ed Ambiente, 22 aprile,1989
- [28] Volume 33 IAWQ - Water Science & Technology - "Sensors in Wastewater Tecnology" - N.1, 1996
- [29] AMSE-ISIS'97 - INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT SYSTEMS - "On-line Monitoring based on Neural Fuzzy Techniques applied to existing hardware in Wastewater Treatment Plants" G.Mappa, R.Tagliaferri, D.Tortora - September 12, 1997.
- [30] AMSE-ISIS'97 - INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT SYSTEMS - "Intelligent System for the Environment" Tavola Rotonda - G.Mappa - September12, 1997.
- [31] AUTOMAZIONE E STRUMENTAZIONE - APPLICAZIONE DEL SOFT COMPUTING AL CONTROLLO DI PROCESSO ED AMBIENTE -"Sistema Esperto per il Controllo dei Depuratori Biologici" - V. Bonvicini, M. Indelicato, G. Mappa – BIAS Ed. – pgg.119-125, September 1997.