

I.I.A.S.S.
Istituto Internazionale per gli Alti Studi Scientifici
“E. R. Caianiello”

Master in Tecnologie Avanzate dell'Informazione e della
Comunicazione

Sensoristica Intelligente
Sensori software basati sulla conoscenza
applicati al controllo dell'inquinamento
ambientale e industriale

Project work realizzato presso
Anova s.a.s. di Napoli

SUPERVISORE I.I.A.S.S.

Prof. Roberto Tagliaferri

CANDIDATO

Dott. Paolo Sabatino

SUPERVISORE ANOVA s.a.s.

Ing. Giovanni Mappa

Biennio 1997/1999

INDICE

INDICE i

- 1 Significato di Sensori Intelligenti 1**
- 2 Qualità delle acque reflue urbane depurate 2**
 - 2.1 *Introduzione 3*
 - 2.2 *Il processo nei depuratori biologici a fanghi attivi 4*
 - 2.3 *Monitoraggio della qualità delle acque 6*
 - 2.4 *Logica Fuzzy e stima on-line del BOD 7*
 - 2.5 *Risultati sperimentali del BOD on-line 14*
 - 2.6 *Sistema fuzzy per la clorazione delle acque depurate 18*
- 3 Sistema di monitoraggio e gestione del trattamento delle acque cromatiche 21**
 - 3.1 *Introduzione 21*
 - 3.2 *Processo di riduzione da Cr^{6+} a Cr^{3+} 23*
 - 3.3 *Stima fuzzy del carico di cromo esavalente 24*
 - 3.4 *Vantaggi legati all'uso del sistema fuzzy 28*
- 4 Bibliografia 30**

1 Significato di Sensori Intelligenti

Il significato di “Sensori Intelligenti” è oggi in genere legato a modelli di approccio hardware e software non integrato: strumentazione di misura elettronica avanzata di elevate prestazioni e sistemi di valutazione e fusione dati basati sulla conoscenza (KBDF-ES, cioè Knowledge Based Data Fusion – Estimator Systems). Il secondo, KBDF-ES, più legato alle tecnologie dell’Intelligenza Artificiale (AI), in realtà deriva dall’integrazione di vari approcci: fusione dati di multi-sensori (esperienza militare), induzioni basate sulla conoscenza, algoritmi di modellazione e di stima neuro-fuzzy, elaborazione e filtraggio di dati in tempo reale. I KBDF-ES, estraendo informazioni dai dati di sensori e inglobando la conoscenza del modello di processo, sono orientati alle applicazioni di monitoraggio intelligente e di controllo di sistemi complessi. In particolare, l’applicazione dei KBDF-ES ha lo scopo di:

- stimare i parametri di processo complessi
- valutare le variabili “virtuali” di controllo (Sensori Virtuali)
- operare la sorveglianza con avvertimento preventivo (early warning)
- aumentare la riduzione dei dati e la fusione dei dati in tempo reale con sistemi di multi-sensori
- sviluppare un’analisi, una diagnosi, una previsione e un trattamento
- eliminare la necessità di installare molti sensori fisici aggiuntivi.

Questi sono molti degli sforzi fatti sulla strumentazione e il controllo delle acque di scarico. Con i sistemi di acquisizione dati è certamente facile raccogliere una grossa mole di dati. Bisogna ricordare che la ricchezza di dati non è la stessa cosa della ricchezza di informazioni. Il collo di bottiglia dell’informazione on-line, che non permette di raggiungere gli obiettivi proposti, deriva da diverse ragioni:

1) la prima è legata alla complessità, caratteristica della misura di molti parametri di processo delle acque primarie e acque reflue, e alla mancanza di disponibilità di strumentazione on-line economica (cioè, BOD – richiesta biologica di ossigeno, COD – richiesta chimica di ossigeno, ammoniaca NH_4 o nitrati NO_3 , MLSS – concentrazione fango biologico, torbidità, cloro residuo, e così via): analizzatori da campo costosi possono essere acquistati soltanto in grossi impianti. Inoltre, vi è la difficoltà e l’elevato costo per un efficiente posizionamento in luoghi difficilmente raggiungibili dei sensori disponibili per la misurazione.

2) la seconda – che rappresenta l'aspetto innovativo della questione – è legato al fatto che il valore di ogni singola misura ha sia un significato esplicito (cioè, pH basso significa soluzione acida, ecc.) che un contenuto informativo implicito (cioè, possibile cattivo odore, corrosione delle apparecchiature, ecc.) correlate con altre possibili misure on-line nello stesso processo. In questo modo, è possibile stimare complessi parametri di processo dalla fusione di differenti informazioni da campo.

Per questi motivi, abbiamo sviluppato un kit di vari sensori intelligenti per i processi biologici degli impianti di depurazione di acque reflue urbane. Ad esempio sulla base di principi di misurazione indiretta (potenziometrica, elettrochimica, nefelometrica, e così via), possiamo stimare in tempo reale per gli impianti di depurazione:

- carico organico del reattore biologico (BOD, COD)
- efficienza di depurazione biologica nella vasca di aerazione degli impianti di trattamento delle acque di scarico urbane
- efficienza della sezione primaria e secondaria di chiarificazione acque
- qualità delle acque reflue urbane influenti
- qualità dell'effluente chiarificato (ad esempio: cloro residuo, COD, BOD, ammoniaca, nitrati, ecc.)

Nel campo industriale, abbiamo studiato l'applicazione dei sensori intelligenti alla stima della concentrazione di Cromo VI nelle acque di lavaggio delle industrie siderurgiche.

2 Qualità delle acque reflue urbane depurate

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.

2.1 Introduzione

In questi anni vi è un fervente interesse verso le Reti Neurali e la Logica Fuzzy (tecniche denominate nel loro insieme *Soft Computing* [2]-[3]-[4]-[5]-[6]), 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[12]-[13].

L'applicazione della Logica Fuzzy [5]-[6] 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.

2.2 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, riportato a grandi linee in 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.

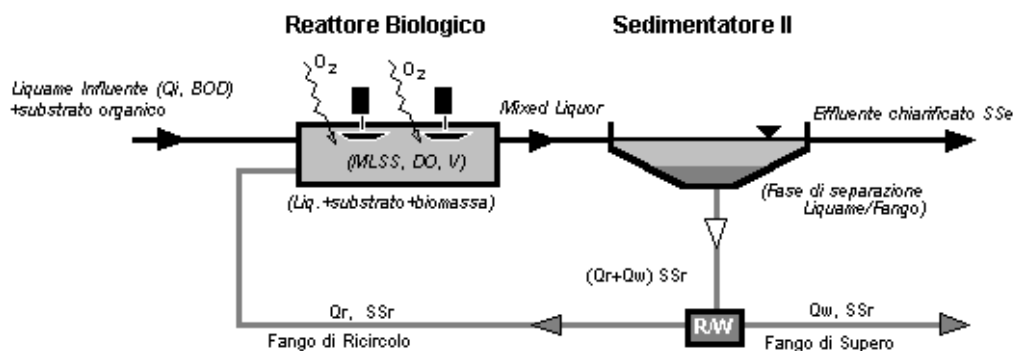


Fig. 1: Reattore Biologico e Sedimentazione Secondaria

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

influyente, 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;

3) 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** [$d \cdot KgMLSS/m^3$] 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 con 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.

2.3 Monitoraggio della qualità delle acque

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.

2.4 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:

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

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 :

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

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.

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_i) 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.

Tab. 1: Concentrazione della 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

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*.

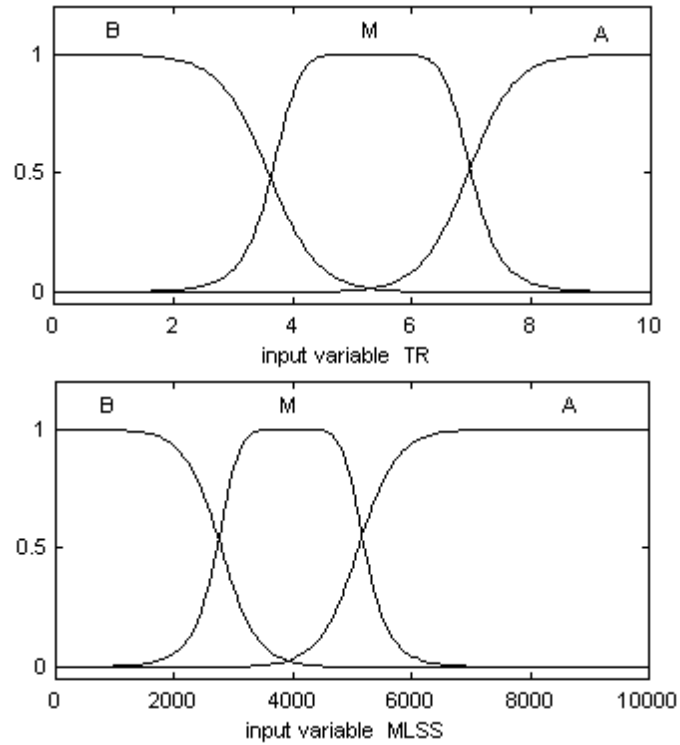


Fig. 2: Variabili di input del FIS.

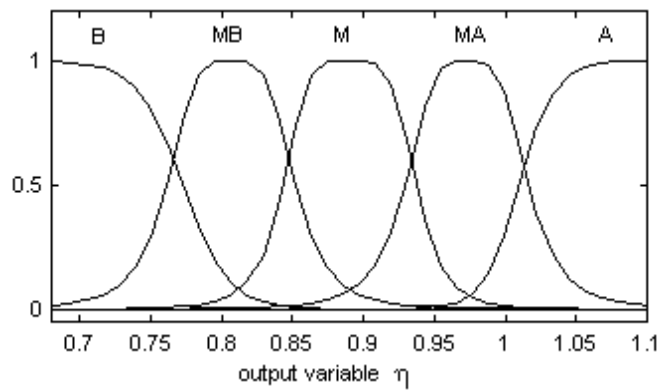


Fig. 3: Variabile di output del FIS.

Invece, il rendimento η viene descritto da una serie di cinque classi: *B*, *MB*=Medio Basso, *M*, *MA*=Medio Alto e *A* (Fig. 3), e il cui il grado di appartenenza dipende dal prodotto Tempo-Concentrazione. I pesi delle regole del **Sistema di Inferenza Fuzzy**

(*FIS*) sono ottenuti in misura proporzionale all'ampiezza degli intervalli del prodotto *TRS* secondo le Tab. 1 e Tab. 2, dalle quali sono ricavati tutti i possibili prodotti.

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.

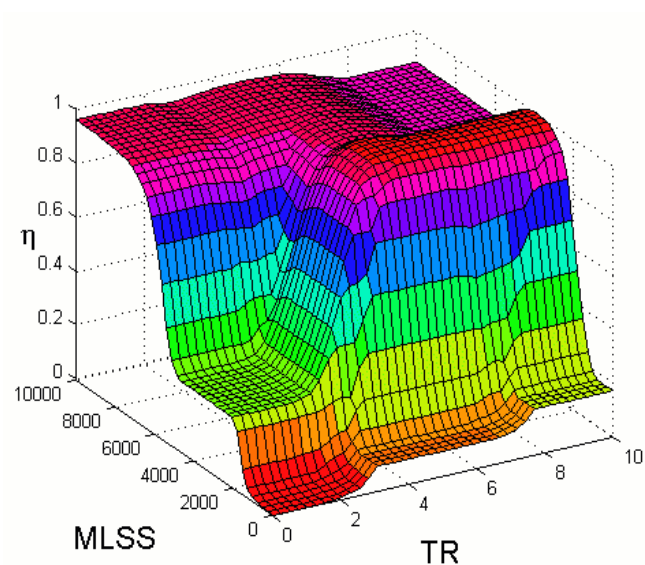


Fig. 4: Superficie di conoscenza η (MLSS,TR).

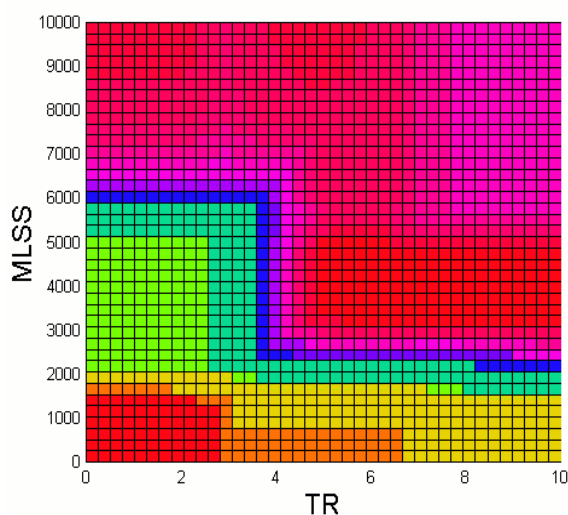


Fig. 5: Proiezione della superficie η (MLSS,TR) di Fig. 4.

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).

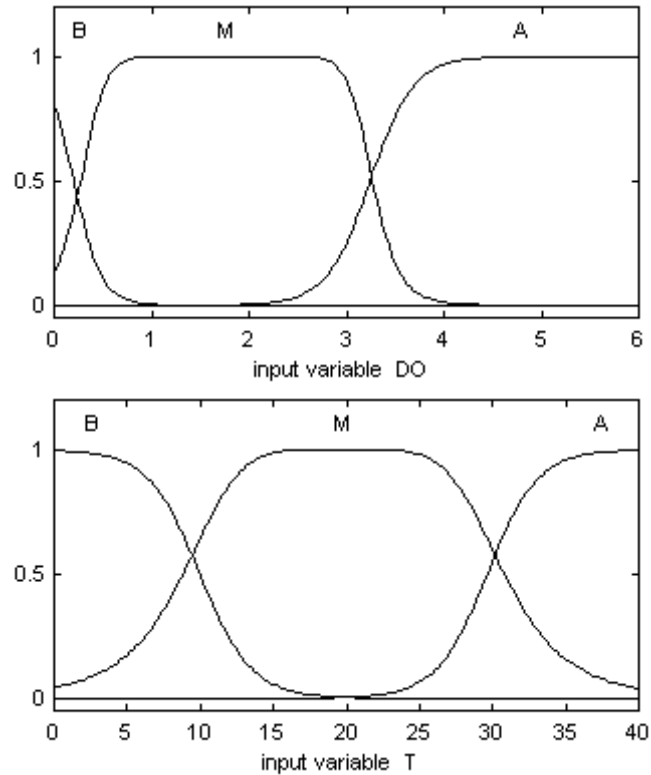


Fig. 6: Variabili di Input del FIS.

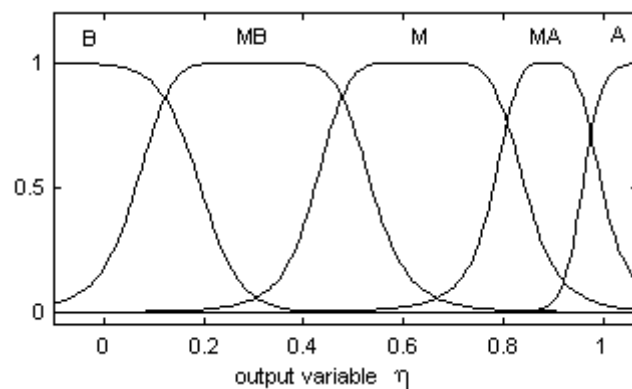


Fig. 7: Variabile di output del FIS.

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 $1-3\text{mg/l}$ 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.

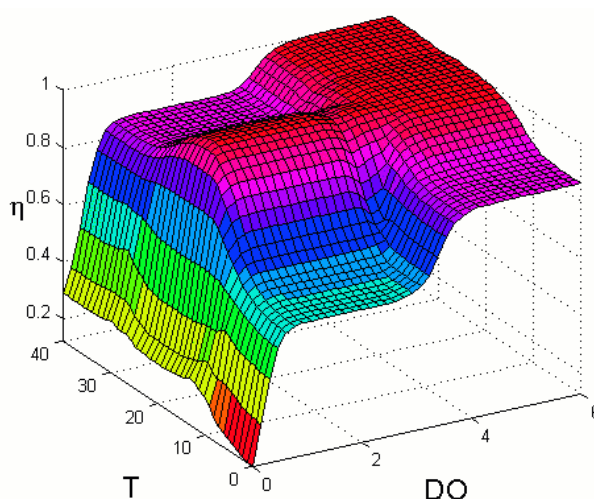


Fig. 8: Superficie di conoscenza $\eta(T,DO)$.

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 variabili 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).

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

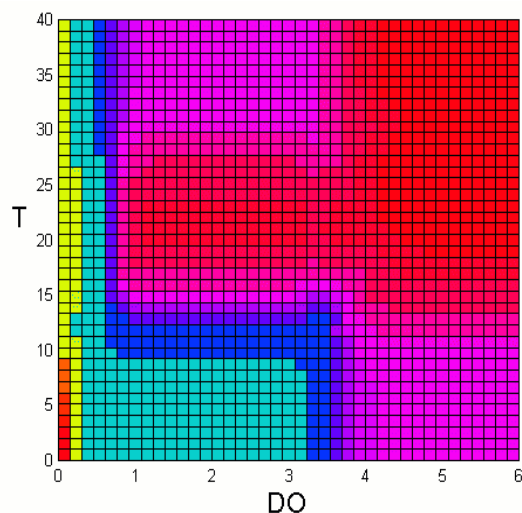


Fig. 9: Proiezione della superficie $\eta(T,DO)$ di Fig. 8.

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.

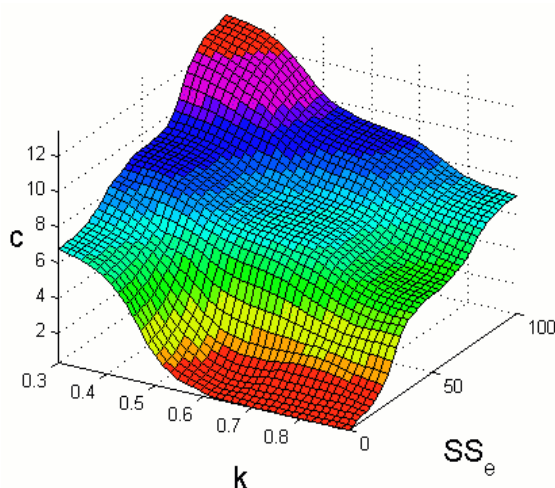


Fig. 10: Superficie di conoscenza $c(k,SS_e)$.

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 (S_{Se}) aumentano e così anche il BOD, ma la percentuale di solidi disciolti si abbassa.

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 spazio-temporale intrinseca del processo depurativo rispetto ai punti fisici di monitoraggio dell'impianto: le misure effettuate a valle (S_{Se}) 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.

2.5 Risultati sperimentali del BOD on-line

La fase di studio è stata seguita da una successiva applicazione sul campo, con l'obiettivo di verificare la validità qualitativa delle conoscenze ingegnerizzate nel modello e con l'arduo compito 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), nota località a vocazione turistica della Sardegna. Il problema di fondo è duplice: la salvaguardia dell'ambiente costiero (inquinamento) e dei boschi (incendi) e la necessità quindi, di riutilizzare una fonte

idrica aggiuntiva, anche per le esigenze stagionali in agricoltura e, in generale, per servizi di pubblica utilità.

L'impianto di depurazione è di tipo modulare ed è fornito di una doppia linea di trattamento biologico, della linea fanghi e di una fase di affinamento terziario basato sulla tecnologia ad ozono, dove viene trattata in parte o in toto l'effluente depurato, inviato poi ad un serbatoio in quota e quindi, alla distribuzione.

L'esigenza di un controllo automatico ed efficace del processo depurativo diventa di importanza strategica anche per l'estrema variabilità stagionale di carico idraulico ed inquinante a cui è sottoposto l'impianto: basti pensare che nel periodo estivo, in relazione all'intenso afflusso turistico, questi carichi si amplificano di un fattore 10 volte rispetto al periodo invernale. Di conseguenza, l'impianto è sottoposto periodicamente a *fasi transitorie di funzionamento*, nelle quali deve necessariamente essere variato l'assetto e il numero di apparecchiature di processo in esercizio.

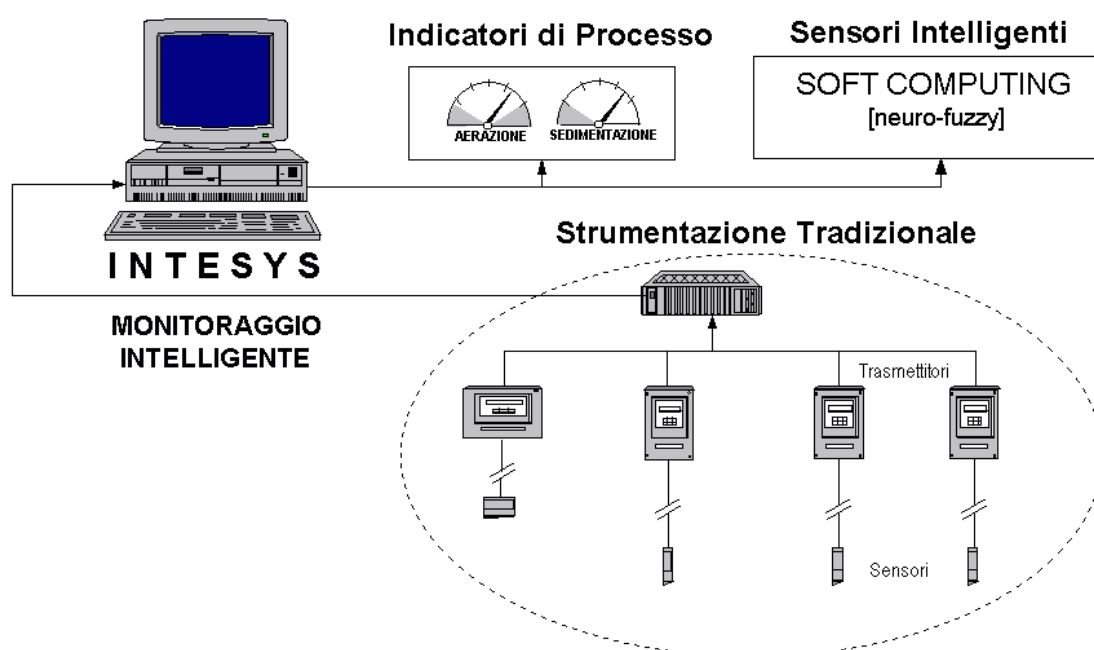


Fig. 11: Schema dell'apparato di monitoraggio e controllo dell'impianto di depurazione di Villasimius (CA) [1].

Presentiamo i primi risultati dell'applicazione del modello all'impianto in esercizio. In primo luogo, la nota correlazione lineare (1), riportata nella letteratura del settore e che è comunemente applicata per ricavare una stima del BOD effluente, ha delle lacune fondamentali a cui il BOD "fuzzy" pone rimedio.

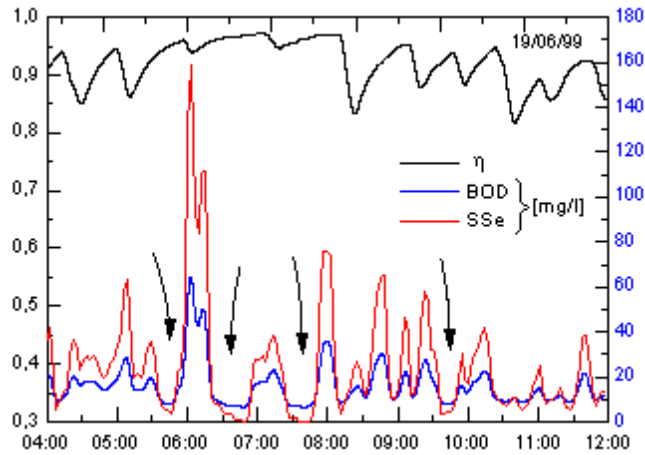


Fig. 12: Grafico sperimentale del rendimento η e del BOD fuzzy confrontato con l'andamento temporale degli SSe: le frecce indicano i punti in cui la componente disciolta dei solidi è predominante.

Una carenza fondamentale 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. 13) insegue soltanto l'andamento dei SSe e non permette in genere di prevedere punti in cui è maggiore la componente disciolta (Fig. 12), che risulta comunque un evento solito nell'andamento del BOD effluente.

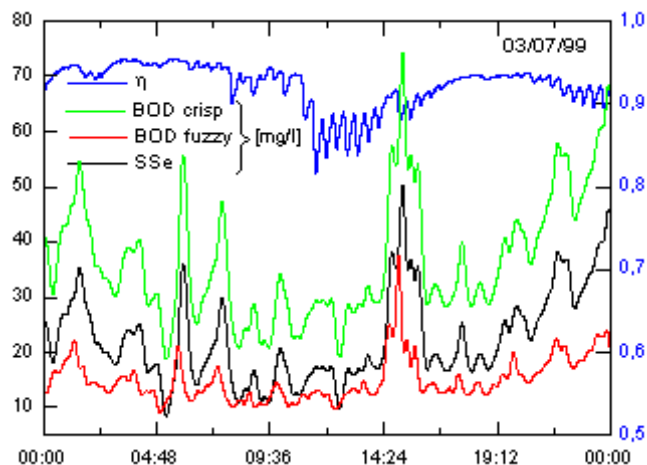


Fig. 13: Andamento sperimentale del BOD crisp e fuzzy al variare dei SSe.

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. 14) 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.

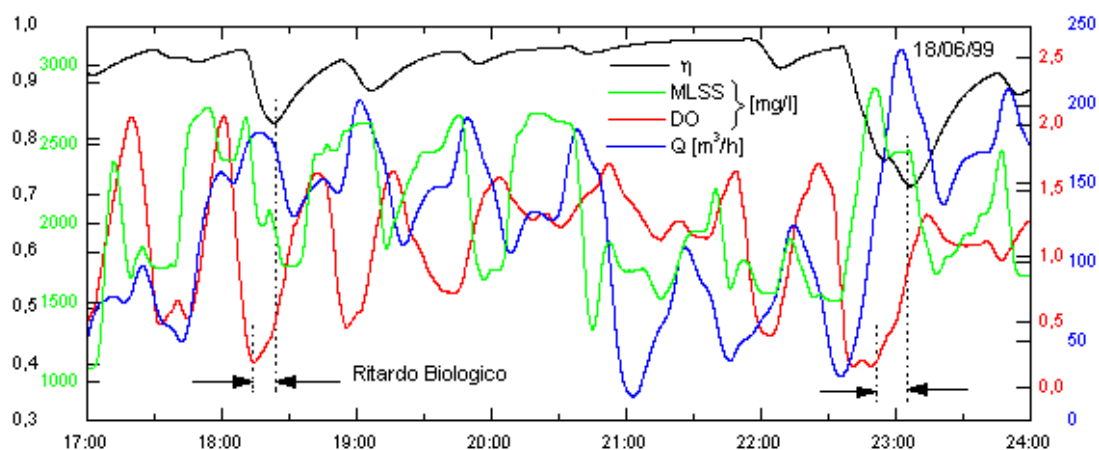


Fig. 14: Influenza dei parametri sull'andamento di η per l'impianto di Villasilimus

In alcuni punti della Fig. 14 sopra 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.

2.6 Sistema fuzzy per la clorazione delle acque depurate

Tra i modelli di comune impiego per i disinfettanti chimici di uso più frequente [11], 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.

Nella Fig. 15, pag.19 sono mostrati gli andamenti calcolati a partire dalle 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 $N_0 = 130.000 \text{ Coli T./100ml}$ e sono mostrati anche alcuni valori sperimentali rilevati sull'effluente di un impianto di depurazione solo parzialmente nitrificato. Dagli andamenti della Fig. 15 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.

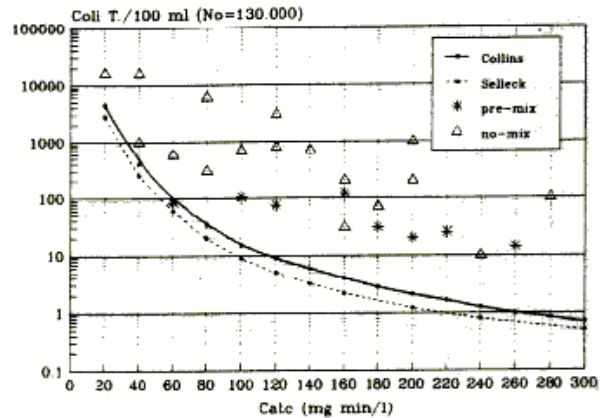


Fig. 15: Rappresentazione dell'andamento dei Coli T. in uscita dalla clorazione ($N_0=130.000$ Coli T./100ml) secondo i modelli: *Collins et al.* e *Selleck et al.*; si riportano anche alcuni punti sperimentali derivati da recenti studi pilota su liquami affinati, con o senza pre-miscelazione rapida [11].

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. 16): 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.

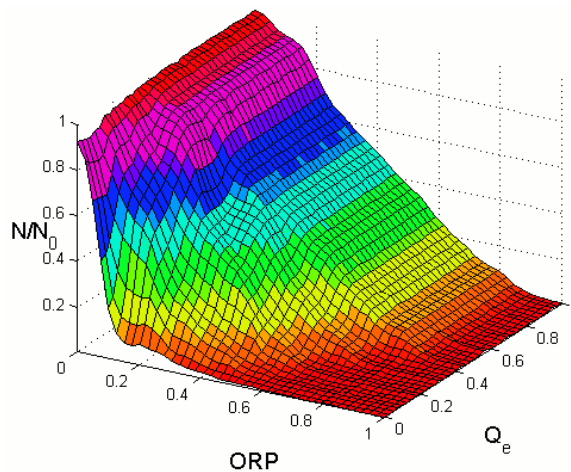


Fig. 16: Superficie di conoscenza.

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_o 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. 16) una dipendenza di N/N_o da due parametri usualmente monitorati on-line su ogni impianto di depurazione di acque reflue urbane, possiamo controllare automaticamente la clorazioni 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.

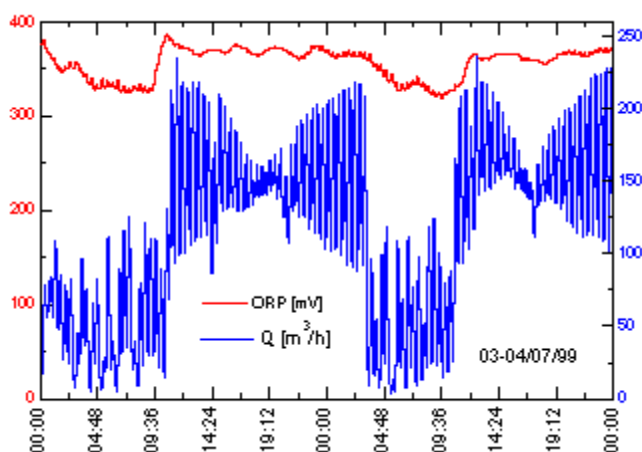


Fig. 17: Grafico sperimentale del ORP in funzione della Q per l'impianto di depurazione di Villasimius regolato dal modello fuzzy

Utilizzando la stima fuzzy della percentuale di colibatteri, abbiamo controllato con successo le pompe di clorazione dell'impianto di Villasimius (Fig. 17), ottenendo un valore di potenziale Redox molto alto (mediamente 350 mV) per valori della portata effluente anche molto diversi.

3 Sistema di monitoraggio e gestione del trattamento delle acque cromatiche

Il Progetto di Ricerca KNOWATER finanziato dalla Comunità Europea Carbone ed Acciaio (ECSC Project 7210 - EA/428 – 1996-1999), prevede lo sviluppo di un sistema integrato real-time basato sulla conoscenza, applicato ad un impianto di trattamento delle acque cromatiche provenienti dal processo di laminazione a freddo di acciai speciali.

L'obiettivo dell'applicazione del sistema esperto è l'ottimizzazione dell'abbattimento del contenuto di cromo esavalente (sostanza altamente tossica) presente nelle acque grezze di lavorazione, attraverso la previsione del carico a monte delle sezioni di trattamento e l'ottimizzazione dei dosaggi dei reattivi chimici, al fine di garantire con continuità risultati depurativi soddisfacenti.

Il quadro di riferimento di partenza è un impianto costituito da tre diverse linee di laminazione a freddo, corredato da strumentazione di processo appena sufficiente per una conduzione manuale del processo.

Viene illustrato di seguito, il sistema real-time realizzato con sensori intelligenti fuzzy per la stima del carico di Cromo esavalente – a partire dalle condizioni di esercizio delle linee di laminazione – e per la valutazione dell'efficienza di trattamento dell'impianto.

3.1 Introduzione

La produzione di acciai speciali e, in generale, l'industria siderurgica, genera da sempre sull'ambiente impatti di ogni tipo e di proporzioni smisurate, mentre la sensibilità al controllo dell'inquinamento ha mosso – in questo settore – ancora pochi passi. L'obiettivo è quello di intervenire, senza creare problemi alla continuità della produzione e alla gestione di processo, su impianti che tipicamente non sono stati forniti, fin dall'inizio, di sufficiente strumentazione di misura e di controllo.

Il caso analizzato è quello di uno stabilimento di laminazione a freddo di acciai speciali e, in particolare, ci si riferisce al problema della ottimizzazione dell'efficienza di gestione del processo di abbattimento del cromo esavalente (altamente tossico) dalle acque di scarico.

Non essendo presente strumentazione di misura in campo, né essendo possibile la misura diretta della quantità di cromo presente nelle acque di processo, si è resa necessaria la realizzazione di uno strumento software basato sulla conoscenza in grado

di "*misurare*" la concentrazione del cromo esavalente presente, tenendo conto soltanto del mix dei fattori concomitanti che determinano il rilascio del cromo nelle acque di processo, come il tipo di acciaio lavorato, la larghezza del nastro, la velocità di laminazione, il numero di laminatoi in esercizio.

Il compito del sensore virtuale realizzato, è quello di consentire un tempestivo assessment delle condizioni ottimali di esercizio (ad es.: dosaggio dei reattivi chimici) rispetto al target di effluente richiesto e, di fornire agli operatori, il "problem solving" diagnostico di supporto alle pratiche operative di gestione dell'impianto. Infatti, obiettivo primario è determinare la fattibilità della applicazione di **Sistemi Basati sulla Conoscenza (*Knowledge Based System*)** al trattamento delle acque cromatiche derivanti dalla produzione dell'acciaio. Il sistema fuzzy sulla base di informazioni e dati sui parametri critici delle acque effluenti e dei trattamenti, permette di:

1. migliorare le performance dell'impianto di trattamento di acque cromatiche in termini di rendimento, sicurezza, affidabilità ed ottimizzazione dei costi;
2. produrre volumi minori di acque trattate con concentrazioni più basse delle sostanze contaminanti, riducendo, in tal modo l'impatto con l'ambiente.

Il progetto è stato sviluppato in diverse fasi. La prima fase è stata contraddistinta dallo studio del trattamento e dall'analisi delle condizioni di lavoro dell'impianto; in tal modo sono stati determinati i parametri fondamentali del sistema, i quali sono direttamente collegati ad eventi che provocano un peggioramento delle performance del trattamento. I risultati di tale fase di analisi mostrano che è possibile rilevare e monitorare le anomalie che riguardano il processo di trattamento delle acque cromatiche utilizzando come semplici parametri il pH, il potenziale redox ed il flusso in ingresso. In alcuni casi il riscontro di segnali deboli consente di prevenire le condizioni di anomalie che potrebbero diminuire il rendimento dell'intero trattamento delle acque. In altri casi non è possibile anticipare il verificarsi di un evento, in tali condizioni, però, si è in grado di diagnosticare cosa ha causato il problema e proporre una guida di intervento per la risoluzione dello stesso. La seconda fase del progetto è coincisa con lo sviluppo di un software nel quale è stata inserita sotto forma di regole, modelli matematici, funzioni statistiche e moduli fuzzy, la conoscenza degli esperti dell'impianto e del settore. Successivamente si è proceduto alla validazione del prototipo, attraverso una serie di test con dati reali ottenuti dall'impianto di riferimento, simulando in tal modo la risposta del sistema ad una reale situazione di impianto. In modo da valutare sia la

corrispondenza della conoscenza implementata con i dati reali del campo, che l'effettivo vantaggio economico derivante dall'uso del sistema software.

3.2 Processo di riduzione da Cr⁶⁺ a Cr³⁺

La ricottura dell'acciaio, necessaria alla nastro-prensa per laminarlo, genera sulla superficie del nastro uno strato di ossido di cromo. Il decapaggio in una soluzione di *soda fusa* molto calda, chiamata *kolene* (miscela di sali fusi a 400°C contenente NaNO₃ 25%, NaOH 62,5%, NaCl 12,5%), in ambiente basico, permette di ripulire la superficie del nastro dall'ossidazione formando il *cromato di sodio* Na₂CrO₄, che è solubile. Il nastro uscente dal bagno di sali fusi trascina nelle acque di lavaggio kolene e cromato di sodio. Nelle acque di lavaggio il cromo è quindi presente in soluzione sotto forma anionica, come *ione cromato* CrO₄⁻² e *ione bicromato* Cr₂O₇⁻². In questo caso, siccome il pH è alcalino (12-13) al seguito del trascinamento di kolene da parte del nastro, l'anione più presente è lo ione cromato esavalente, che è altamente tossico nei confronti del corpo idrico ricettore, per cui va eliminato. L'eliminazione del cromo esavalente dalle "acque cromatiche" può essere fatta per via fisica trasformandolo prima in sale insolubile e separandolo quindi per sedimentazione sotto forma di solido sospeso. Per fare questo bisogna prima trasformare il Cr⁶⁺ nella forma ridotta Cr³⁺, e poi precipitato come *idrossido di cromo* Cr(OH)₃ mediante l'aggiunta di alcali, in questo caso calce liquida Ca(OH)₂ [17]-[18].

L'impianto di trattamento è costituito da tre vasche: nella prima avviene la riduzione da Cr⁶⁺ a Cr³⁺, nella seconda la precipitazione del Cr³⁺, nella terza la neutralizzazione dell'acqua trattata.

Nella prima vasca di 18m³ viene impiegato il *bisolfito di sodio* NaHSO₃ come riducente, ma tale reazione avviene in maniera rapida e completa a pH≈2. Siccome le acque cromatiche hanno un pH alcalino, è necessario dosare *acido solforico* H₂SO₄ per aumentarne l'acidità e portare il pH intorno a 2. Il dosaggio dell'acido viene regolato da un misuratore di pH, posto nella prima vasca, che apre il rubinetto quando il pH è 2,5 e la chiude quando è 1,1. Il consumo di acido solforico è stimato intorno a 1÷1,5 m³/giorno, mentre la portata del rubinetto è circa 22l/min. Il dosaggio di bisolfito di sodio viene regolato invece da un misuratore di potenziale Redox, posto sempre nella prima vasca, che apre il rubinetto a -5mV e lo chiude a -35mV. Il consumo di bisolfito di sodio è di circa 1,5 m³/giorno, mentre la portata del rubinetto è circa 1,7l/min.

Nella seconda vasca di $48m^3$ avviene la precipitazione del Cr^{3+} a pH circa 8,5-9, mediante l'aggiunta di calce $Ca(OH)_2$. Il dosaggio della calce deve essere tale da raggiungere e mantenere il pH più idoneo alla completa insolubilità dell'idrossido cromico $Cr(OH)_3$ che viene a formarsi nella reazione di precipitazione. L'idrossido cromico è anfotero, ossia tende a solubilizzarsi e quindi a disciogliersi anche in ambiente alcalino. Ad un pH tra 7,5 e 10 il Cr^{3+} disciolto è inferiore a 0,5ppm e la zona di solubilità praticamente nulla è tra 8,5 e 9. Un misuratore di pH apre il rubinetto di calce quando il pH è 9,5 e lo chiude a 8,7 con una portata stimata $500l/min$.

La terza vasca di $48m^3$ serve da omogeneizzazione finale, per permettere di far rientrare le inevitabili punte di pH dovute al dosaggio calce effettuato ad intermittenza. In questo modo si ottiene un pH più costante, evitando le repentine oscillazioni che comporterebbero una solubilizzazione di parte dell'idrossido cromico non completamente precipitato.

Per una nota concentrazione di cromo esavalente presente in campioni di acque cromatiche provenienti dal laminatoio, sono state eseguite una serie di prove di titolazione per stimare le quantità di acido solforico, bisolfito di sodio e calce necessarie per far avvenire la reazione di riduzione e neutralizzazione. I due campioni di $5ml$ di acque cromatiche provenienti da LAF 1-2 sono portati prima a $pH \approx 2$ con l'aggiunta di H_2SO_4 (concentrazione $0,5M$), poi viene aggiunto $NaHSO_3$ (concentrazione $0,1M$) finché il potenziale Redox non scende sotto i $100mV$, e infine si dosa $Ca(OH)_2$ al 5% per riportare il pH sopra 9.

3.3 Stima fuzzy del carico di cromo esavalente

Nella gestione del processo di trattamento delle acque cromatiche di scarico da impianti di laminazione a freddo di acciai speciali, l'obiettivo prefissato è il controllo dell'abbattimento del contenuto di cromo esavalente (sostanza altamente tossica) presente in dette acque, attraverso la corretta gestione del processo di riduzione (a cromo trivalente) e della successiva fase di precipitazione e neutralizzazione del pH [17]-[18].

Per garantire la continuità dell'efficienza e dell'efficacia del trattamento depurativo, è importante però conoscere in anticipo la concentrazione di cromo esavalente da trattare nell'impianto di riduzione.

Il sistema ideato basato sulla conoscenza è in grado di condurre una stima tempestiva delle migliori condizioni di esercizio rispetto al target richiesto (ad es.:

dosaggio dei reattivi chimici) e di fornire agli operatori funzionalità di diagnostica e di supporto alle pratiche operative di gestione dell'impianto.

La stima del carico di cromo esavalente è stata ottenuta senza utilizzare nessun sensore hardware che potesse dare informazioni sulla concentrazione di Cr^{6+} in funzione di qualche altra grandezza misurabile. Al suo posto abbiamo utilizzato regole di buon senso che sono alla base del *Sistema di Inferenza Fuzzy* (FIS) di previsione della concentrazione, e che racchiudono informazioni elementari e inconfutabili del processo di laminazione.

In primo luogo, abbiamo supposto che la concentrazione di Cr^{6+} è una *funzione fuzzy* della larghezza del nastro di acciaio e della velocità di laminazione. Appare evidente che:

- Aumentare la *larghezza* del nastro \Rightarrow aumentare la concentrazione di Cr^{6+} , in quanto maggiore è la superficie di acciaio ricoperto di ossido di cromo che può essere rilasciato come cromato di sodio Na_2CrO_4 nelle acque di lavaggio dopo il decapaggio in soda fusa.
- Aumentare la *velocità* di laminazione \Rightarrow aumentare la concentrazione di Cr^{6+} , perché maggiore è la superficie del nastro che a parità di tempo viene a contatto con la soluzione decapante e quindi maggiore è la quantità di cromato di sodio immessa nelle acque di lavaggio.

Queste sono state le considerazioni di base che hanno permesso di scrivere le regole di inferenza del Sistema Fuzzy. Pertanto, le variabili del processo da “fuzzificare” sono soltanto la larghezza del nastro di acciaio (width) e la velocità di laminazione (speed), e come output prevediamo la concentrazione di inquinante.

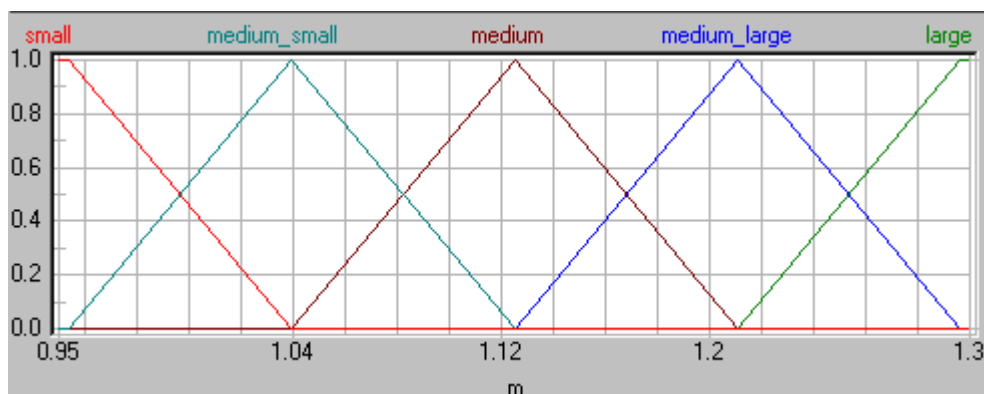


Fig. 18: Funzioni di appartenenza della variabile di input “width”.

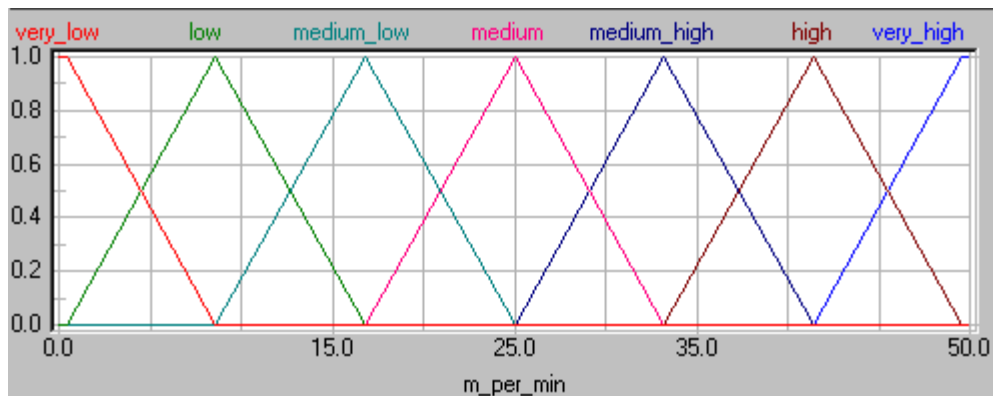


Fig. 19: Funzioni di appartenenza della variabile di input “speed”.

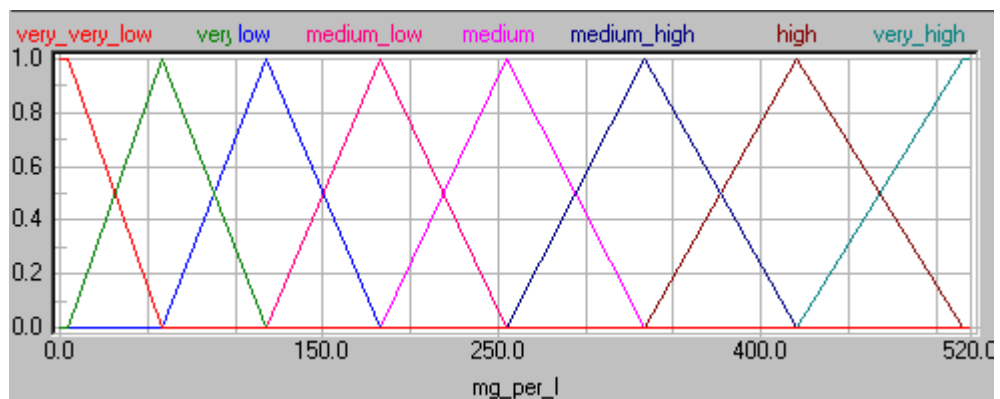


Fig. 20 Funzioni di appartenenza della variabile di output “concentrazione Cr6+”.

I range delle variabili di input e output presi in considerazione sono anche maggiori delle normali condizioni di esercizio del laminatoio, in modo tale da fornire un supporto decisionale per evitare condizioni di fuori norma che pregiudicano la funzionalità dell’impianto di trattamento delle acque cromatiche.

La *superficie di conoscenza* del FIS (Fig. 21) è stata modellata, costruendo le regole e modificando i parametri delle *funzioni di appartenenza*, cercando di adattarla ai due punti sperimentali ottenuti dalla divisione INOX ILVA-TERNI che ha tre linee (LAF 1/2/3) di ricottura-decapaggio di acciaio inossidabile laminato a freddo:

Linea di laminazione	Larghezza (m)	Velocità (m/min)	Concentrazione Cr ⁶⁺ (mg/l)
LAF 2	1	26	100
LAF 1	1,2	32	390

I valori sono per lo stesso tipo di acciaio (serie 300, 19% di Cr). Un tipo diverso di acciaio comporta soltanto uno spostamento della superficie verso l'alto oppure il basso a seconda che la sua percentuale di cromo sia maggiore o minore della serie 300. Quindi, se con una larghezza di $1m$ e una velocità di $26m/min$ prevediamo una concentrazione di cromo esavalente di circa $100mg/l$ per un acciaio con 19% di Cr, in proporzione per un acciaio con 13% di Cr prevediamo una concentrazione di $13/19 \cdot 100mg/l = 68mg/l$. Pertanto, un tipo diverso di acciaio comporta soltanto uno spostamento (proporzionale alla percentuale di cromo nell'acciaio) della superficie verso l'alto oppure il basso a seconda che la sua percentuale di cromo sia maggiore o minore della serie 300.

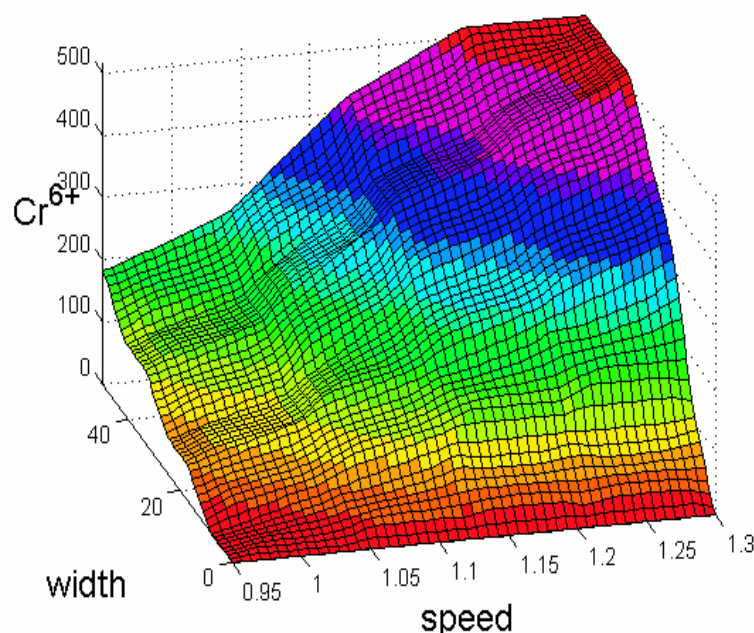


Fig. 21: Superficie di conoscenza Cr6+(larghezza, velocità).

Infine, per ogni linea LAF esiste una pompa che trasporta le acque di lavaggio verso la vasca di riduzione comune, con un portata media di $16m^3/h$ (Fig. 22). Nel prevedere quindi il carico di cromo totale dobbiamo tenere in conto del numero di laminatoi in funzione in un certo momento. La stima della concentrazione di cromo esavalente nella vasca di riduzione viene ricavata come media delle concentrazioni previste per ogni singola linea, pesata dalla rispettiva portata di acqua:

$$Cr_{TOT}^{6+} = \frac{\sum_i Q_i \cdot Cr_i^{6+}}{\sum_i Q_i}$$

Nel nostro sistema, però, la portata media di ogni linea di laminazione è la stessa, perciò la media pesata si riduce ad una media aritmetica.

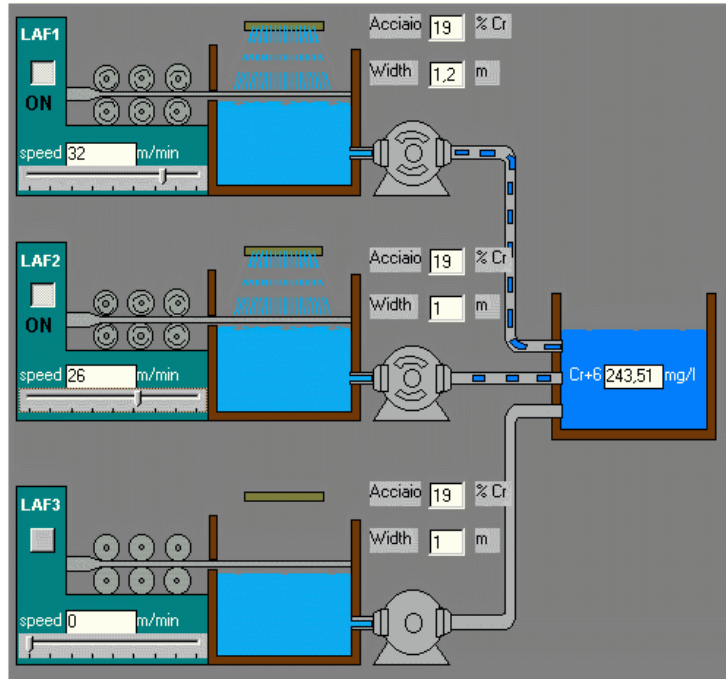


Fig. 22: Diagramma del laminatoio.

Conoscere in anticipo la concentrazione di cromo esavalente da trattare nell'impianto di riduzione significa prevedere le quantità di acido solforico e bisolfito di sodio necessarie nel processo di riduzione a cromo trivalente, e la quantità di calce necessaria nella successiva fase di precipitazione e neutralizzazione del pH.

3.4 Vantaggi legati all'uso del sistema fuzzy

A favore vi è il risparmio in termini di costo di esercizio dell'impianto di trattamento acque cromatiche, sulla base di tre fattori principali:

1. Economia gestionale legata ad un più razionale utilizzo di reattivi freschi (acido solforico + bisolfito di sodio) e un maggiore riutilizzo di acido esausto
2. Un minor "costo ambientale" in quanto garantendo la continuità della qualità della depurazione delle acque di processo si possono evitare le multe o penali per mancato rispetto dei limiti allo scarico
3. Un minor costo di formazione e addestramento del personale addetto alla conduzione dell'impianto di depurazione, disponendo di uno strumento che –

utilizzato off-line – diventa un efficace strumento di training on-the-job, essendo basato sulla capitalizzazione e validazione del know-how di gestione.

La corretta gestione di un processo tecnologico complesso, deve sempre più avvalersi, per sopperire alla mancanza di strumentazione adeguata e di personale specializzato, degli strumenti informatici che l'Intelligenza Artificiale rende disponibili.

In tale ottica, il sistema sviluppato integra i vantaggi di un sistema basato sulla conoscenza alle caratteristiche dei *sensori virtuali* come strumenti automatici atti ad interpretare le misure da campo e a proporre all'operatore una immediata sintesi qualitativa/quantitativa delle stesse.

I sensori virtuali sono la traduzione "in automatico" di un esperto di processo che dalla lettura sinottica dei dati, dalla loro storia, dalle condizioni di lavoro, riesce a capire se il processo evolve in maniera corretta, accettabile o degradata.

Il modulo fuzzy, che stima la quantità di cromo esavalente presente nelle acque cromatiche provenienti dal processo di laminazione a freddo di acciai speciali, permette la valutazione della quantità ottimale di reattivo chimico, assicurando risultati depurativi soddisfacenti ed inutili sprechi.

4 Bibliografia

- [1] G.Mappa - Convegno E+H sulle Tecniche di Misura e Controllo per la Depurazione delle Acque Reflue - Endress+Hauser - *Applicazioni di Sensori Intelligenti e di Sistemi Esperti di telecontrollo nella depurazione delle acque* , Milano 25 Sett. 1996
- [2] S. Cammarata, *Reti Neurali*, Collana di Informatica, ed. EtasLibri 1° ediz., 1990.
- [3] D.W. Rolston (1991) - *Sistemi Esperti teoria e sviluppo* -McGraw-Hill Libri Italia srl.
- [4] B. Fringuelli, *Come Ragionare in Contesti Imprecisi* - Automazione Oggi n.167 - pp.162-167 - Febbraio 1995.
- [5] C.-T. Lin, C.S.G. Lee, *Neural Fuzzy Systems*, Prentice Hall, 1998.
- [6] J.-S.R. Jang, C.-T. Jun, E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice Hall, 1997.
- [7] A. Boscolo, *La regolazione degli Impianti a Fanghi Attivi* - 3° Convegno di Terra d'Otranto - pp.369-383 - Lecce 25-26 Maggio, 1995.
- [8] 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.
- [9] L. Masotti (1987) - *Depurazione delle Acque* - Tecniche ed impianti per il trattamento delle acque di rifiuto - Ediz. Calderini - Bologna.
- [10] Volume 33 IAWQ - Water Science & Technology - "Sensors in Wastewater Technology" - N.1, 1996.
- [11] C. Nurizzo - *La disinfezione nei liquami depurati: modelli e processi*
- [12] 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.
- [13] 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.

- [14] 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,1997.
- [15] 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.
- [16] AI*IA99 - 6° Congresso della Associazione Italiana per l'Intelligenza Artificiale - WORKSHOP: Intelligenza Artificiale per l'Ambiente, *Monitoraggio della qualità delle acque depurate con l'utilizzo di sensori intelligenti low-cost* – V. Bonvicini, G. Mappa, P. Sabatino – Bologna, 17 Sett. 1999.
- [17] Marcel Pourbaix, *Atlas d'equilibres Electrochimiques à 25 °C*, Gauthier - Villars & Co editore, Parigi 1963.
- [18] Wastewater Engineering: treatment, disposal, reuse, third edition, Metcalf & Eddy, McGraw-Hill, INC. 1991