

AI*IA99 – 6° Congresso della Associazione Italiana per l'Intelligenza Artificiale
WORKSHOP: *Intelligenza Artificiale per l'Ambiente*
17 Settembre 1999 - Facoltà di Ingegneria Viale Risorgimento, 2 – BOLOGNA

SISTEMA DI MONITORAGGIO E GESTIONE DEL TRATTAMENTO DELLE ACQUE CROMICHE

Elena Musella (Consorzio SESM) et alii

Sommario

Per le acque cromatiche provenienti dal processo di laminazione a freddo di acciai speciali è stato sviluppato un sistema integrato real-time basato sulla conoscenza, 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 su piattaforma G2/Gensym, integrato 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.

Parole chiave

Sistemi Basati sulla Conoscenza, Logica Fuzzy, sensori virtuali intelligenti, trattamento acque cromatiche

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 esperto 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 al sistema esperto 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, il sistema 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.

Caratteristiche del Sistema Esperto Knowater

Il sistema esperto *Knowater*, è stato sviluppando con un tool on-line real-time, basato sulla conoscenza, per il monitoraggio esperto e la diagnosi precoce, realizzato in ambiente G2[®], la shell per sistema esperti della Gensym.

L'ambiente di sviluppo per un sistema basato sulla conoscenza è costituito da una base di conoscenza ed un motore inferenziale.

La base di conoscenza è l'esperienza del sistema; una sorta di area di memoria che contiene la "conoscenza" dell'esperto dell'impianto e/o del settore sotto forma di regole, procedure, modelli matematici, reti neurali, etc. La base di conoscenza del sistema è facilmente implementabile, infatti è sempre possibile inserire una nuova regola, perché ogni regola è indipendente dalle altre; basterà inserire regole sparse, preoccupandosi solo del fatto che abbiano un senso compiuto di per se e un significato nell'ambito del programma in questione.

La base di conoscenza del sistema esperto *Knowater*, sviluppata attraverso un'analisi approfondita con gli utenti finali e l'esperto del processo – impianto, è composta da una serie di regole, moduli fuzzy e modelli matematici (ricavati attraverso analisi statistica su punti ricavati sperimentalmente nei laboratori del CSM) integrati con sensoristica virtuale a logica fuzzy, che consentono la corretta gestione del processo e la simulazione dell'andamento dell'impianto.

Il motore inferenziale, scandendo in modo opportuno tale base di conoscenza, darà all'utente l'impressione di dialogare con un sistema estremamente ordinato, in cui si segue un filo logico e ogni domanda è pertinente.

Gli aspetti principali del sistema basato sulla conoscenza per il trattamento delle acque cromatiche sono essenzialmente due: il sistema deve essere in grado di rilevare cambiamenti nelle condizioni operative e deve identificare possibili anomalie prima che accadano.

Le caratteristiche principali del sistema sviluppato sono:

- ☑ Diagnosi on-line, per individuare in tempo reale anomalie ed identificare possibili cause attraverso regole diagnostiche.
- ☑ Supporto alla manutenzione che, attraverso l'identificazione delle cause del guasto, guida l'operatore durante le operazioni di manutenzione. L'operatore viene avvisato del guasto, verificatosi, attraverso un segnale acustico ed un messaggio di allarme presente nella interfaccia utente principale. Mediante un bottone, previa selezione del messaggio, è possibile visualizzare

l'interfaccia di diagnosi, nella quale viene mostrato l'albero delle cause, prodotto dinamicamente in base ai dati rilevati dal campo, e le pratiche operative visualizzate anche attraverso un normale browser sotto forma di testo, di messaggio vocale e/o filmato.

- ☑ Semplice aggiornamento del sistema attraverso una interfaccia grafica che consente di aggiornare l'albero delle cause, di cambiare le regole di diagnosi e di modificare le struttura dell'impianto.
- ☑ Monitoraggio continuo dei dati di impianto quali pH, potenziale redox e livello nei serbatoi per controllare l'integrità del processo.
- ☑ Ottimizzazione della gestione dell'intero sistema di trattamento, e della concentrazione finale del Cr^{+6} .
- ☑ Modulo fuzzy che stima la quantità di Cr^{+6} presente nelle acque in ingresso.
- ☑ Produzione di allarmi per le variabili principali di ogni sottoimpianto fuori intervallo di lavoro e loro analisi statistica.
- ☑ Indicatore globale, che valuta l'andamento globale per ogni sottoimpianto.
- ☑ Modelli analitici che valutano il dosaggio ottimo dell'acido, della calce e del bisolfito con l'obiettivo di ottimizzare il trattamento delle acque cromatiche e di minimizzare gli sprechi.

Le funzionalità del sistema

Di seguito sono presentate alcune delle funzionalità principali implementate.

Interfaccia grafica: L'operatore interagisce con il sistema attraverso una interfaccia grafica, facilmente navigabile. L'interfaccia principale di monitoraggio presenta una lista dei sottoimpianti.

Per ogni sottoimpianto di trattamento (Riduzione, Precipitazione e Neutralizzazione) esiste un segnalatore colorato "led", che ne mostra l'andamento globale (verde = condizione buona, rosso = condizione di allarme) (Figura 1). Quando il sistema diagnostica una anomalia, scatta l'allarme acustico che richiama l'attenzione dell'operatore: il sistema genera automaticamente un messaggio che segnala il tipo di anomalia e l'impianto in cui si è verificata, ed il led diventa rosso.

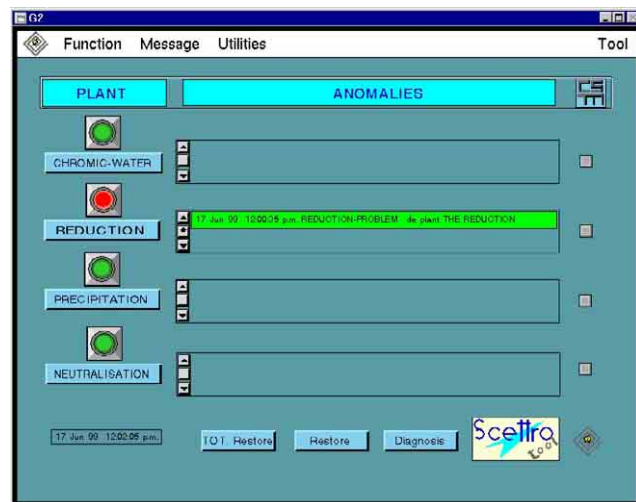


Figura 1: Interfaccia di monitoraggio

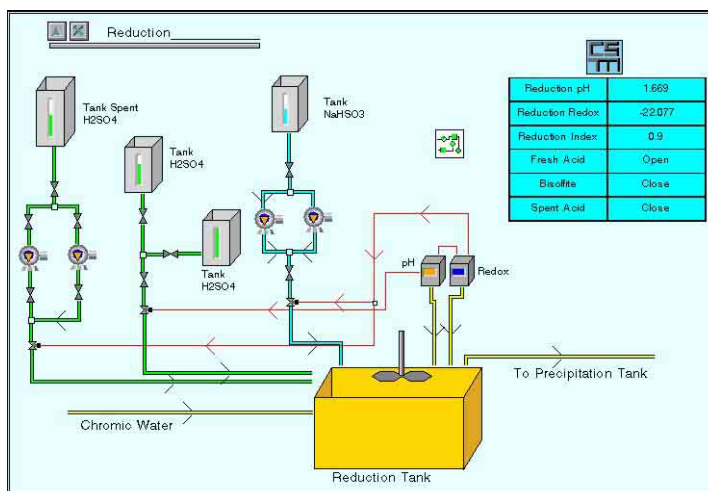


Figura 2: Sinottico impianto di riduzione

Monitoraggio: Il sistema monitorizza in continuo le condizioni del flusso entrante, del pH e del potenziale redox e genera un allarme quando una variabile è fuori dal suo intervallo ottimo di funzionamento; inoltre controlla lo stato di apertura e chiusura delle valvole dell'acido fresco, della calce e del bisolfito.

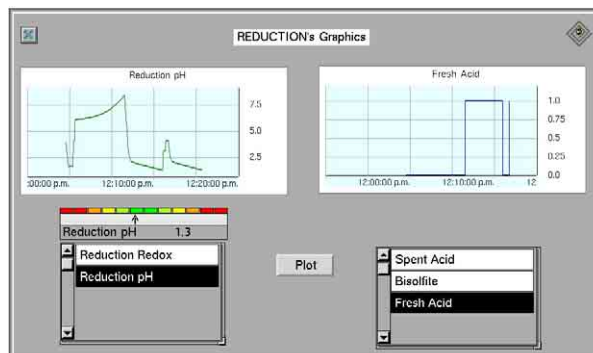


Figura 3: Grafico delle variabili.

Diagnostica: Il sistema diagnostica le anomalie di funzionamento e le loro cause e, suggerisce le pratiche operative o le linee guida per l'operatore.

L'interfaccia di diagnosi (Figura 4) presenterà l'albero di diagnosi per l'anomalia selezionata, individuando il sottoimpianto ed il componente dove si è presentata l'anomalia, e segnalandone la causa più probabile.

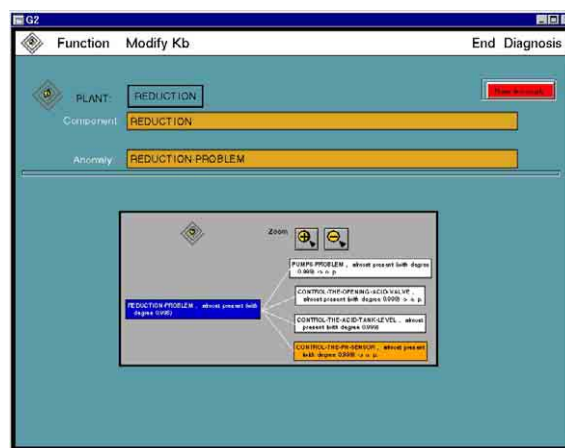


Figura 4: Interfaccia di diagnosi



Figura 5: Procedura operativa multimediale

Stima qualitativa della gestione processo: E' molto importante per l'operatore conoscere l'andamento operativo di ogni sottoimpianto; per questa ragione è stato introdotto un indice (*sensore virtuale*) per ciascun impianto; tale indice I è calcolato attraverso una rete pesata combinatoriale fuzzy degli indici parziali i delle principali variabili del sottoimpianto e tiene conto della distanza del punto di lavoro del sottoimpianto dal punto di lavoro ottimo.

I *pesi* sono coefficienti correttivi che valutano l'importanza della corrispondente variabile sull'andamento globale del processo.

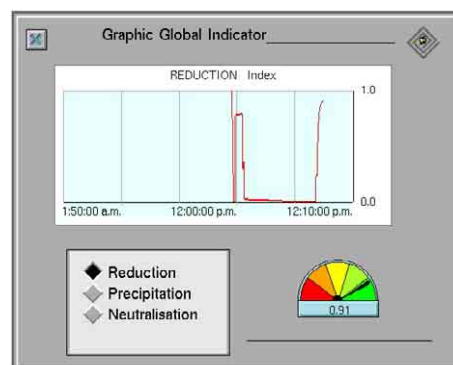


Figura 6: Andamento dell'indice globale

Gli indici parziali i sono calcolati attraverso una funzione gaussiana:

$$i = \exp \frac{(x - \delta)^2}{2\Delta^2}$$

dove δ e Δ sono, rispettivamente, il valore ottimo ed l'intervallo di funzionamento della variabile in esame.

L'indice I e l'indice parziale i hanno valori compresi nell'intervallo $[0,1]$; se i è uguale ad 1 allora significa che la variabile ha un valore che corrisponde al suo valore ottimo. Se l'indice globale I è uguale ad 1 allora ciò significa che tutte gli indici parziali che concorrono al calcolo di I hanno valore alto, e di conseguenza, che tutte le variabili sono prossime al loro valore ottimo. Sia l'indice globale che gli indici parziali sono monitorati e rappresentati graficamente (Fig. 6).

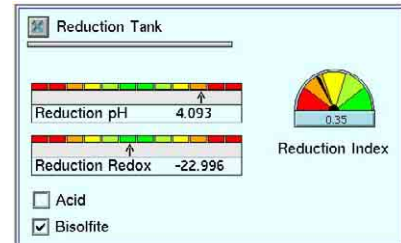


Figura 7: Indici parziali i ed indice globale I

Analisi statistica degli allarmi: Il sistema produce automaticamente un allarme ogni volta che il valore di una variabile è fuori dall'intervallo di funzionamento ottimo; analizzando la distribuzione di questi allarmi è possibile individuare le cause di degrado del processo.

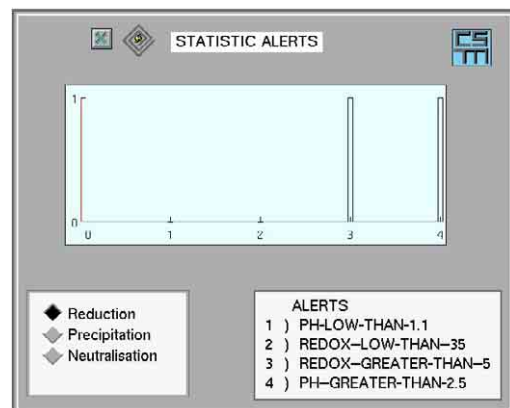


Figura 8: Analisi statistica degli allarmi

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.

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 e la velocità di laminazione, e come output prevediamo la concentrazione di inquinante. 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.

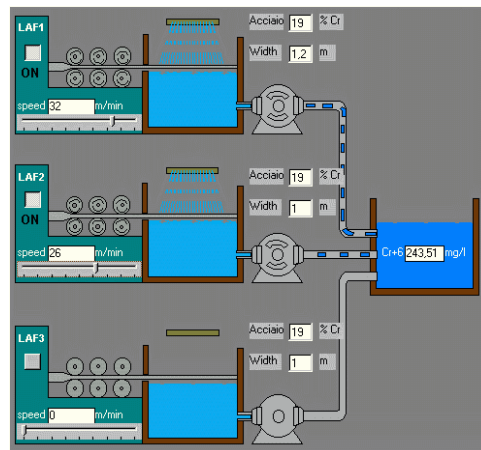


Figura 9: Diagramma del laminatoio.

Infine, per ogni linea LAF esiste una pompa che trasporta le acque di lavaggio verso la vasca di riduzione comune, con una portata media di $16\text{m}^3/\text{h}$ (Figura 9). 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. 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.

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.

Conclusioni

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.

Particolarmente interessante è risultato il modulo fuzzy, che stima la quantità di cromo esavalente presente nelle acque cromatiche provenienti dal processo di laminazione a freddo di acciai speciali. Tale parametro, attraverso un modello matematico-fuzzy, implementato nel sistema esperto, permette la valutazione della quantità ottimale di reattivo chimico, assicurando risultati depurativi soddisfacenti ed inutili sprechi.

Bibliografia

- [1] Marcel Pourbaix, *Atlas d'équilibres Electrochimiques à 25 °C*, Gauthier - Villars & Co editore, Parigi 1963.
- [2] *Wastewater Engineering: treatment, disposal, reuse*, third edition, Metcalf & Eddy, McGraw-Hill, INC. 1991
- [3] G.Mappa, A.Sciarretta, S.Moroni, M.Allegretti - *"Sistema Esperto per la Gestione degli Impianti di Trattamento delle Acque di Rifiuto Urbane"* - ANDIS'93 - Palermo 1993 - Congresso Biennale / Associazione di Ingegneria Sanitaria.
- [4] *"L'Innovazione nella Gestione delle Risorse Idriche"* - TECNOPOLIS - Valenzano (BA) 1994 - Giornata promossa da Ambassade de France n Italie, Ente Autonomo Acquedotto Pugliese, Pole VERSeau Montpellier Technopole, Tecnopolis CSATA Novus Ortus - 19 Maggio. *Presentazione della tecnologia dei Sistemi Esperti realizzati da SESPIM.*
- [5] G.Mappa - *"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 - Marzo 1995 .
- [6] G.Mappa - *"Una Tecnologia dell'Intelligenza Artificiale come Prodotto Servizio nella Telegestione della Depurazione delle Acque"* - ANIDA Flash N.3 Marzo 1995
- [7] M.Marsella, M.Meneganti, R.Tagliaferri - *"Detection of Anomalies with Fuzzy Neural Networks"* - WIRN VIETRI'95 - Vietri s/m (SA) 1995 - VII Italian Workshop on Neural Nets 18-20 Maggio.
- [8] G.Mappa, G. Salvi, R.Tagliaferri - *"A Fuzzy Neural Network for the On-Line Detection of B.O.D."* - WIRN VIETRI'95 - Vietri s/m (SA) 1995 - VII Italian Workshop on Neural Nets 18-20 Maggio.
- [9] G.Mappa - *"La Tecnologia dei Sistemi Esperti nell'Edilizia: Qualità Edilizia e Manutenzione Intelligente"* - EDILMED - Napoli 1995 - Convegno "Tecnologie Post-Industriali trasferibili all'Architettura e all'Edilizia" - Mostra d'Oltremare - 19-21 Maggio
- [10] *"L'Acqua Fattore di Crescita del Territorio: Qualità, Trattamento, Riuso, Gestione"* - 3° CONVEGNO di TERRA D'OTRANTO - Lecce 1995 - 25-26 Maggio.
- [11] G.Mappa *"Identification of Filamentous Microorganisms Causing Bulking and Foaming in Activated Sludge System"* - IAWQ e PROVINCIA di PERUGIA - Perugia 1995
- [12] G.Mappa - *"Un Kit di Sensori ad Intelligenza Artificiale per il Telecontrollo Low-Cost degli Impianti di Depurazione delle Acque"* - NEWS 2/95 -Endress+Hauser
- [13] Marty Weil - *"Water challenges"*- A-B Journal Giugno 1996
- [14] Metcalf & Eddy Inc. (1991). *"Wastewater engineering: treatment / disposal / reuse."* – McGraw-Hill, terza edizione
- [15] Serra, Sánchez, Lafuente, Cortès, Poch - *"A knowledge based tool for wastewater treatment plant"* – Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence 7.
- [16] Ferrante, Lepschy, Viaro – *"Precisione a regime e tipo dei sistemi di controllo"* – Automazione e Strumentazione –Febbraio 1999.
- [17] Cattaneo, Pardini, Tombolini, Grilli, Vallivero, Montanari – *"Monitoraggio ambientale"* - Automazione Oggi–Aprile 1999.
- [18] Rolston- *"I sistemi esperti - teoria e sviluppo"* - McGraw-Hill
- [19] Rich – *"Intelligenza artificiale"* – McGraw-Hill
- [20] Di Biase, Manzo, Meneganti, Violante – *"Un sistema on-line per la diagnosi precoce e la manutenzione predittiva"* - Manutenzione Giugno 1996.
- [21] Costantini, Manetti, Parente – *"Sistemi esperti: applicabilità in campo industriale"* – L'elettrotecnica - Vol.LXXVIII N.5 Maggio 1991
- [22] Zadeh – *"A Fuzzy-Algorithmic Approach to the Definition of Complex or Imprecise Concepts"* -
- [23] F. Manzo. - *"Using G2 to build Real-Time Expert System for Diagnosis in Steel Industry"*. G2 European User Meeting - S. Margherita Ligure Giugno 1992 –
- [24] M. Dubas – *"Expert system in industrial Practice: advantages and drawbacks"* Expert Systems, agosto 1990.

- [25] Committee on technology – *“Use and application of expert systems and artificial intelligence”*;
international iron and steel institute, Techno- 21; Chicago, April 1990
- [26] Kosko, Isaka – *“Logica sfumata”* – Le Scienze, Settembre 1993