

Quaderni del Dipartimento
SAN 4

Gianni Andreottola, Paola Foladori, Giuliano Ziglio

**Dal monitoraggio convenzionale
alla verifica avanzata
del processo a fanghi attivi**



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRENTO

**Dipartimento di Ingegneria Civile
e Ambientale**

Università degli Studi di Trento
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale
Direttore: prof. Alberto Bellin
www.ing.unitn.it/dica

Quaderni del Dipartimento
SAN 4

Coordinatore della serie:
prof. Giuliano Ziglio

ISBN 88-8443-117-4

*Questa Serie è dedicata ad argomenti avanzati
dell'ingegneria sanitaria-ambientale
ed alla loro divulgazione al settore professionale*

*Questa monografia vuole contribuire alle conoscenze
nel campo della progettazione e verifica dei processi a fanghi attivi
negli impianti di depurazione mediante caratterizzazione avanzata
dei reflui e analisi delle cinetiche dei fanghi.
Gli Autori sollecitano suggerimenti ed osservazioni da parte di chi
applicherà i metodi di calcolo proposti, comunicandole
al Laboratorio di Ingegneria Sanitaria-Ambientale (LISA)
al il seguente indirizzo e-mail: lisa@ing.unitn.it*

Al settore dell'indagine avanzata sugli impianti di depurazione hanno contribuito negli ultimi anni a differente titolo, insieme agli Autori e Coautori indicati nei singoli capitoli: *Loris Dallago, Martina Ferrai, Marco Ragazzi, Roberta Villa, oltre a numerosi tesisti.*

Alla redazione di questo volume hanno dato il loro apprezzato contributo: *Roberto Peterlini, Andrea Sandri.*

La stampa del presente volume è stata possibile grazie al supporto finanziario della Provincia Autonoma di Trento, Servizio Opere Igienico-Sanitarie.

Sebbene gli Autori abbiano curato con la massima attenzione la presente monografia, declinano ogni responsabilità per possibili errori od omissioni e per qualunque eventuale danno derivante dall'uso delle informazioni ivi contenute.

INDICE

INDICE	3
PRESENTAZIONE.....	9
1 INTRODUZIONE	13
1.1 DAL MONITORAGGIO CONVENZIONALE	13
1.2 ... AI MODELLI DI SIMULAZIONE AVANZATI	14
1.3 LA DIFFICILE SISTEMATIZZAZIONE DI UN APPROCCIO SEMPLIFICATO PER IL CALCOLO DI PARAMETRI AVANZATI	16
1.4 IL CONTENUTO DELLA MONOGRAFIA.....	17
2 RICHIAMI SULLE CONFIGURAZIONI A FANGHI ATTIVI.....	19
2.1 INTRODUZIONE	19
2.2 CONFIGURAZIONI DI NITRIFICAZIONE E DENITRIFICAZIONE.....	20
PARTE 1 CARATTERIZZAZIONE DELLE ACQUE REFLUE.....	25
3 FRAZIONAMENTO DEL COD NELLE ACQUE REFLUE: METODI E PROCEDURE.....	27
3.1 INTRODUZIONE	27
3.2 LE FRAZIONI DEL COD TOTALE	29
3.3 APPROCCI PER LA DETERMINAZIONE DELLE FRAZIONI DEL COD	34
3.4 FRAZIONI DEL COD DETERMINABILI CON ANALISI CHIMICHE	36
3.4.1 <i>Determinazione del COD totale</i>	36
3.4.2 <i>Determinazione del COD solubile</i>	36
3.4.3 <i>Determinazione del BOD₅</i>	38
3.5 FRAZIONAMENTO COMPLETO DEL COD TOTALE MEDIANTE APPROCCIO RESPIROMETRICO	38
3.5.1 <i>Dal test del BOD ai test respirometrici</i>	38
3.5.2 <i>Esecuzione dei test respirometrici</i>	40
3.5.3 <i>Determinazione del COD solubile biodegradabile (S_s) mediante respirometria</i>	43

3.5.4	Determinazione del COD biodegradabile (S_S+X_S) mediante respirometria	43
3.5.5	Determinazione della biomassa attiva (X_{BH} , X_{BA})	46
3.5.6	Sintesi della procedura avanzata di frazionamento del COD mediante respirometria	48
3.6	FRAZIONAMENTO COMPLETO DEL COD TOTALE MEDIANTE APPROCCIO SEMPLIFICATO BASATO SU ANALISI CONVENZIONALI	48
3.6.1	Determinazione del COD biodegradabile (S_S+X_S) dal valore di BOD_5 ...	49
3.6.2	Determinazione del COD solubile non biodegradabile (S_I).....	54
3.6.3	Sintesi della procedura di frazionamento del COD a partire da dati convenzionali (caso di impianti esistenti).....	57
3.7	EVOLUZIONE NEL FRAZIONAMENTO DEL COD	59
3.8	IL FRAZIONAMENTO DEL COD IN CONDIZIONI ANOSSICHE MEDIANTE TEST DI NUR.....	61
4	FRAZIONAMENTO DEL COD NELLE ACQUE REFLUE: RISULTATI SU IMPIANTI REALI	63
4.1	INTRODUZIONE.....	63
4.2	RISULTATI DEL FRAZIONAMENTO DEL COD NEL REFLUO GREZZO IN INGRESSO..	64
4.3	FRAZIONAMENTO DEL COD IN IMPIANTI PROVVISI DI SEDIMENTAZIONE PRIMARIA	74
4.4	VALORI TIPICI DELLE FRAZIONI DI COD INDICATI NELLA LETTERATURA	76
4.5	CALCOLO DI F_{US} E F_{UP} MEDI PER IL METODO DI PROGETTAZIONE UCT E RAPPORTO COD/ BOD_5	78
5	FRAZIONAMENTO DI N E P NELLE ACQUE REFLUE: METODI E PROCEDURE	81
5.1	INTRODUZIONE.....	81
5.2	LE FRAZIONI DELL'N TOTALE.....	81
5.3	FRAZIONI DETERMINABILI CON ANALISI CHIMICHE.....	85
5.4	FRAZIONAMENTO COMPLETO DELL'N ORGANICO MEDIANTE APPROCCIO SEMPLIFICATO BASATO SU ANALISI CONVENZIONALI	85
5.5	FRAZIONAMENTO COMPLETO DELL'N ORGANICO MEDIANTE ANALISI CONVENZIONALI APPOSITE	86
5.6	LE FRAZIONI DEL P TOTALE	87
6	FRAZIONAMENTO DI N E P NELLE ACQUE REFLUE: RISULTATI SU IMPIANTI REALI	91
6.1	INTRODUZIONE.....	91
6.2	RISULTATI DEL FRAZIONAMENTO DELL'AZOTO NELLE ACQUE REFLUE INFLUENTI IN IMPIANTI DI DEPURAZIONE REALI.....	92
6.3	FRAZIONAMENTO DELL'AZOTO IN IMPIANTI PROVVISI DI SEDIMENTAZIONE PRIMARIA	105
6.4	RISULTATI DEL FRAZIONAMENTO DEL FOSFORO NELLE ACQUE REFLUE INFLUENTI IN IMPIANTI DI DEPURAZIONE REALI.....	106
PARTE 2	BILANCI DI MASSA, CINETICHE E FRAZIONAMENTO DEI FANGHI ATTIVI	109

7	BILANCI DI MASSA SULL'IMPIANTO E CALCOLO DELL'ETÀ DEL FANGO	111
7.1	INTRODUZIONE	111
7.2	BILANCI DI MASSA	115
7.3	SCELTA DEL PERIODO TEMPORALE.....	116
7.4	BILANCIO DELLE PORTATE.....	116
7.5	BILANCIO DEL COD.....	118
7.5.1	<i>Calcolo della massa di COD nei fanghi di supero, $M(COD)_{f,ex}$.....</i>	<i>120</i>
7.5.2	<i>Calcolo della massa di COD nei fanghi di supero, $M(COD)_{f,ex}$ a partire dal fosforo</i>	<i>124</i>
7.5.3	<i>Calcolo del termine $\Delta O_{2,COD}$.....</i>	<i>125</i>
7.6	BILANCIO DELL'AZOTO.....	126
7.6.1	<i>Calcolo della massa di N nei fanghi di supero, $M(N)_{f,ex}$.....</i>	<i>127</i>
7.7	BILANCIO DEL FOSFORO.....	128
7.8	BILANCIO DEI SOLIDI	130
7.9	CALCOLO DELL'ETÀ DEL FANGO (SRT).....	132
7.9.1	<i>Calcolo della massa di SST nei fanghi di supero, $M(SST)_{f,ex}$.....</i>	<i>133</i>
7.9.2	<i>Calcolo della massa di SST nei fanghi di supero, $M(SST)_{f,ex}$ a partire dal fosforo</i>	<i>136</i>
8	PARAMETRI CINETICI E STECHIOMETRICI DEI FANGHI ATTIVI	139
8.1	INTRODUZIONE	139
8.2	PROCESSO DI OSSIDAZIONE DEI SUBSTRATI CARBONIOSI.....	140
8.2.1	<i>Coefficiente di resa cellulare eterotrofa (Y_H)</i>	<i>140</i>
8.2.2	<i>Velocità di crescita della biomassa eterotrofa (μ_H).....</i>	<i>143</i>
8.2.3	<i>Velocità di decadimento cellulare eterotrofo (b_H).....</i>	<i>145</i>
8.2.4	<i>Residuo endogeno della biomassa eterotrofa (f_p).....</i>	<i>152</i>
8.2.5	<i>Velocità di idrolisi</i>	<i>153</i>
8.3	PROCESSO DI NITRIFICAZIONE.....	155
8.3.1	<i>Coefficiente di resa cellulare autotrofa (Y_A).....</i>	<i>156</i>
8.3.2	<i>Velocità di crescita della biomassa nitrificante (μ_A)</i>	<i>156</i>
8.3.3	<i>Velocità di decadimento cellulare dei nitrificanti (b_A).....</i>	<i>158</i>
8.3.4	<i>Velocità di ammonificazione.....</i>	<i>160</i>
8.4	PROCESSO DI DENITRIFICAZIONE.....	160
8.5	OSSERVAZIONI SULLA T MEDIA DA CONSIDERARE NEL CALCOLO DEI PARAMETRI CINETICI MEDI.....	163
9	FRAZIONAMENTO DEI FANGHI ATTIVI.....	167
9.1	INTRODUZIONE	167
9.2	LE FRAZIONI DEL COD PARTICOLATO NEL FANGO ATTIVO	170
9.3	BIOMASSA ETERTROFA (X_{BH}).....	172
9.4	BIOMASSA AUTOTROFA NITRIFICANTE (X_{BA}).....	175
9.4.1	<i>Configurazione di ossidazione/nitrificazione.....</i>	<i>175</i>
9.4.2	<i>Configurazione di nitrificazione + denitrificazione.....</i>	<i>178</i>
9.5	COD ENDOGENO (X_p).....	179
9.6	COD INERTE (X_{II}).....	180
9.7	CALCOLO DEL COD PARTICOLATO E DI SSV NEI FANGHI ATTIVI.....	181

10 STIMA DEI PARAMETRI CINETICI DEL FANGO ATTIVO SU IMPIANTI REALI.....	183
10.1 INTRODUZIONE.....	183
10.2 SCELTA DEI PARAMETRI CINETICI E STECHIOMETRICI.....	183
10.3 RISULTATI DEL CALCOLO DELL'ETÀ DEL FANGO SU IMPIANTI REALI.....	185
10.4 STIMA DELLA VELOCITÀ MASSIMA DI CRESCITA DELLA BIOMASSA NITRIFICANTE ($\mu_{A,MAX}$).....	186
10.4.1 Procedura di calcolo mediante bilanci di massa.....	187
10.4.2 Risultati su impianti a scala reale.....	189
10.4.3 Conversione da $\mu_{max,A}$ alla velocità di nitrificazione convenzionale ($v_{N,max}$).....	192
10.5 STIMA DELLA CINETICA DELLA BIOMASSA ETEROTROFA.....	193
10.5.1 Procedura di calcolo mediante bilanci di massa.....	193
10.5.2 Risultati su impianti a scala reale.....	194
10.6 RISULTATI DEL FRAZIONAMENTO DEL FANGO ATTIVO.....	196
10.6.1 Stima degli SST in vasca.....	198
11 BILANCI DI MASSA DELL'OSSIGENO IN VASCHE A FANGHI ATTIVI..	203
11.1 INTRODUZIONE.....	203
11.2 BILANCIO DI MASSA DELL'OSSIGENO IN VASCHE AERATE: EQUAZIONI FONDAMENTALI.....	204
11.2.1 Equazione generale del bilancio di massa dell'ossigeno.....	204
11.2.2 Il trasferimento dell'ossigeno.....	207
11.3 MODELLI TEORICI PER LA STIMA DEL FABBISOGNO DI OSSIGENO.....	221
11.3.1 Metodo basato sul BOD_5	222
11.3.2 Metodo basato sul frazionamento del COD.....	225
11.3.3 Analisi di sensibilità.....	226
11.3.4 Determinazione sperimentale del fabbisogno di ossigeno per via respirometrica.....	230
12 CASO DI STUDIO: RISULTATI DEI BILANCI DI MASSA APPLICATI AL COMPARTO A FANGHI ATTIVI DI UN IMPIANTO REALE	233
12.1 INTRODUZIONE.....	233
12.2 CONFIGURAZIONE DELL'IMPIANTO E DATI OPERATIVI.....	234
12.3 CARATTERIZZAZIONE DEL REFLUO IN INGRESSO.....	236
12.4 CARATTERIZZAZIONE DEL REFLUO IN USCITA.....	238
12.5 CARATTERIZZAZIONE DEL FANGO DI SUPERO.....	239
12.6 ESECUZIONE DEI BILANCI DI MASSA.....	240
12.6.1 Bilancio del COD.....	240
12.6.2 Bilancio dell'azoto.....	242
12.6.3 Bilancio dei SSNV.....	244
PARTE 3 PRINCIPI ED APPLICAZIONI DI MODELLI AVANZATI PER LA SIMULAZIONE DEL PROCESSO A FANGHI ATTIVI.....	247
13 PRINCIPI DEI MODELLI AVANZATI PER LA SIMULAZIONE DEI SISTEMI A FANGHI ATTIVI.....	249

13.1	INTRODUZIONE	249
13.2	EVOLUZIONE DAL MODELLO ASM NO.1 AL NO.3	250
13.3	STRUTTURA MATRICIALE DEI MODELLI ASM	251
13.4	IL MODELLO ASM NO.1.....	253
	13.4.1 <i>Descrizione dei processi e delle componenti</i>	253
13.5	LE FASI DI APPLICAZIONE DI UN MODELLO NUMERICO AD UN IMPIANTO DI DEPURAZIONE	257
14	CASO DI STUDIO: SIMULAZIONE DI UN GRANDE IMPIANTO DI DEPURAZIONE IN CONDIZIONI STAZIONARIE E DINAMICHE.....	261
14.1	INTRODUZIONE	261
14.2	METODOLOGIA IMPIEGATA PER LA SIMULAZIONE	262
14.3	L'IMPIANTO OGGETTO DELLO STUDIO	263
14.4	CARATTERIZZAZIONE DEL REFLUO IN INGRESSO	264
14.5	CALIBRAZIONE DEL MODELLO DI SIMULAZIONE IN CONDIZIONI STAZIONARIE ..	266
14.6	SIMULAZIONE DELL'IMPIANTO E VALIDAZIONE DEL MODELLO IN CONDIZIONI DINAMICHE	268
14.7	CONCLUSIONI	270
15	CASO DI STUDIO: SIMULAZIONE DI UN IMPIANTO IN CONDIZIONI DINAMICHE PER L'IMPLEMENTAZIONE DELL'AERAZIONE INTERMITTENTE.....	271
15.1	INTRODUZIONE	271
15.2	CONFIGURAZIONE DELL'IMPIANTO DI DEPURAZIONE ESISTENTE.....	273
15.3	FRAZIONAMENTO DEL COD NEL REFLUO GREZZO	274
15.4	MISURA DEI PARAMETRI CINETICI DEL FANGO ATTIVO.....	275
15.5	COMPORTAMENTO IDRODINAMICO DEL REATTORE BIOLOGICO	276
15.6	SIMULAZIONE DEL PROCESSO DI AERAZIONE INTERMITTENTE	277
	15.6.1 <i>Simulazione in condizioni stazionarie</i>	277
	15.6.2 <i>Simulazione in condizioni dinamiche</i>	279
15.7	IMPOSTAZIONE DELL'AERAZIONE INTERMITTENTE	280
15.8	PRESTAZIONI DEL REATTORE CON AERAZIONE INTERMITTENTE.....	281
	15.8.1 <i>Controllo dell'aerazione intermittente mediante fasi temporali predefinite</i>	281
	15.8.2 <i>Controllo dell'aerazione intermittente mediante set-point sulle concentrazioni effluenti di NH₄-N e NO₃-N</i>	282
15.9	CONFRONTO FRA LE DUE LINEE A FANGHI ATTIVI CON DIFFERENTI CONDIZIONI DI AERAZIONE	283
15.10	CONCLUSIONI	284
16	BIBLIOGRAFIA	285
17	SIMBOLOGIA	291

Presentazione

In seguito al recepimento del D.M. 152/99 sono frequenti gli interventi di adeguamento del comparto biologico degli impianti di depurazione esistenti. Tali interventi dovrebbero prevedere inizialmente una verifica del processo biologico per valutarne l'effettiva capacità di trattamento. Acquisite tali conoscenze si potranno quindi progettare gli interventi necessari, che possono consistere in un'ottimizzazione gestionale o in un vero e proprio ampliamento degli stadi di trattamento biologico.

La monografia intende fornire a progettisti, gestori di impianto e responsabili degli Enti di controllo un insieme strutturato di conoscenze e di procedure, rigorose e aggiornate alle più avanzate conoscenze scientifiche, per la verifica avanzata dei processi a fanghi attivi, che sono un importante supporto ai successivi interventi di ottimizzazione e/o di adeguamento.

Le procedure proposte derivano dalla decennale esperienza acquisita dal Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Trento (DICA) nel trattamento biologico delle acque reflue, nell'ambito della collaborazione tecnico-scientifica con il Servizio Opere Igienico-sanitarie (S.O.I.S) della Provincia Autonoma di Trento, che gestisce più di 70 impianti di depurazione.

Si è voluto proporre un approccio che consenta di determinare tutti i parametri stechiometrici e cinetici utili a descrivere il processo a fanghi attivi nel modo più semplice possibile. A tutt'oggi non esiste una guida completa per affrontare tale approccio semplificato, in quanto i metodi disponibili sono distribuiti in una vasta letteratura scientifica internazionale. Ciò rende difficile la ricostruzione autonoma di un percorso ordinato e scientificamente corretto alla conoscenza di parametri avanzati.

Queste conoscenze sono la base di partenza anche per l'applicazione di strumenti più avanzati, quali i modelli di simulazione dinamica dei processi a fanghi attivi, che risultano utili strumenti nel caso dello studio di fenomeni transitori e di situazioni impiantistiche e/o gestionali di particolare complessità.

Nella monografia vengono illustrate le procedure per l'esecuzione di bilanci di massa di carbonio, azoto e ossigeno intorno al comparto biologico, le procedure di frazionamento del COD e dell'azoto dei reflui influenti e di determinazione delle cinetiche di processo. Molte di queste procedure sono applicate a impianti di depurazione reali impiegando dati convenzionalmente acquisiti nella pratica gestionale. Vengono quindi descritti casi di specie in cui sono state applicate e validate le metodologie proposte su impianti della Provincia

Autonoma di Trento. Vengono infine illustrate alcune applicazioni di modelli di simulazione (Activated Sludge Model dell'IWA - International Water Association) a casi reali.

Gran parte dei dati utilizzati e riportati derivano dai monitoraggi effettuati dalle ditte di gestione degli impianti di depurazione e da parte del S.O.I.S. Tali dati sono stati integrati con altre informazioni desunte da numerosi monitoraggi e bilanci di massa effettuati da parte del DICA nell'ambito di tesi di laurea e tirocini.

Si ringraziano pertanto la Provincia di Trento, il Raggruppamento di gestione del Bacino Trentino Centrale, nella capogruppo Trentino Servizi s.p.a, il Raggruppamento di gestione del Bacino Trentino Occidentale nella capogruppo S.E.A. e il Raggruppamento di gestione del Bacino Trentino Orientale, nella Capogruppo C.E.T Ecologia Applicata per avere reso disponibili i propri data-base ed i numerosi studenti e collaboratori del DICA che nel tempo hanno contribuito ad approfondire le conoscenze sugli impianti di depurazione.

Un particolare ringraziamento all'ing. Paolo Nardelli, responsabile del S.O.I.S, cui va riconosciuto il continuo incoraggiamento nello svolgimento della nostra attività di ricerca.

Trento, novembre 2005

Gli Autori