

# **Automazione del controllo per la gestione ottimizzata di un impianto di produzione del compost**

*Vincenzo Romano, Sebastiano Pizzulli, Tommaso Lapiscopeia  
(aseco.cantiere@libero.it)- Aseco SpA, Marina di Ginosa (TA)  
Antonio Biagetti - Università degli Studi di Perugia, Perugia  
Massimiliano Il Grande - Progress Srl, Milano  
Alessandro Baldi - ProEng Srl, Perugia  
Sante Ragone - Geovis Srl, Altamura (BA)*

## **Riassunto**

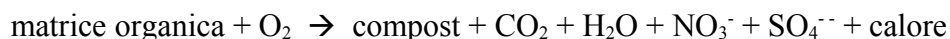
*Il processo di compostaggio delle matrici organiche, seppur relativamente elementare sotto il profilo concettuale, è sostenuto da processi chimici resi ingovernabili per la particolare inerzia di cui è dotato il sistema e per le molteplici variabili operative che ne influenzano l'andamento ed il controllo. Al fine di concretizzare il modello teorico del processo, sono stati individuati i modelli di calcolo che hanno determinato l'ottimizzazione della cinetica del processo mediante l'automazione del sistema di gestione dei controlli. Il sistema di controllo sperimentato ha permesso di ottenere un prodotto che esibisce garanzia di qualità nel rispetto delle prescrizioni imposte dalla normativa, di realizzare un sensibile risparmio economico attribuibile alla maggiore efficienza dei sistemi di insufflaggio e ricircolo dell'aria di processo, di diminuire l'emissione di CO<sub>2</sub> ascrivibile al fabbisogno energetico necessario al completamento del processo.*

## **Summary**

*Organic substances composting process is conceptually quite elementary but it is regulated from unmanageable chemical processes due to inertia of the system and to the multiple operative variables that are conditioning the system and its control. In order to realize the theoretical model of the process, computational models have been characterized; these models optimized process kinetic by the control system automation. The experimental control system provided a quality guaranteed product in respect of normative regulations. Moreover it allowed to obtain an important economical saving thank to an higher air process efficiency and a sensible reduction of CO<sub>2</sub> emissions.*

## **1. Introduzione**

Con il termine compostaggio viene definito il processo di maturazione biologica controllata, in ambiente aerobico, della sostanza organica proveniente da residui animali e vegetali. attraverso il quale si giunge alla formazione di molecole a catena più semplice, stabili, igienizzate, ricche di composti umici, utili, in definitiva, alla concimazione delle colture agrarie e al ripristino della sostanza organica del suolo. Sinteticamente il processo può essere descritto mediante la seguente reazione:



La cinetica delle reazioni chimiche e microbiologiche che si concretizzano durante il processo è fortemente condizionata dalle proprietà fisiche della miscela di partenza e la continuità delle stesse reazioni caratteristiche viene garantita mantenendo il più

possibile i parametri di processo di temperatura, umidità e tenore di ossigeno, all'interno di un intervallo idoneo per il mantenimento di condizioni biotiche ottimali, secondo i seguenti parametri:

- Umidità della miscela superiore al 50%;
- Tenore di ossigeno superiore al 15%;
- Temperatura compresa tra 55°C e 75°C;

## 2. L'impianto di produzione del compost di Marina di Ginosa

L'attuale situazione impiantistica di ASECO S.p.A. presenta il ricorso a strutture di tipo "chiuso" per le lavorazioni ritenute a maggiore impatto:

- ricezione e miscelazione delle matrici in ingresso alla lavorazione;
- biossidazione accelerata della miscela;
- area per il confezionamento dell'ACM, (non utilizzata poiché in attesa delle necessarie autorizzazioni richieste alla Provincia di Taranto).

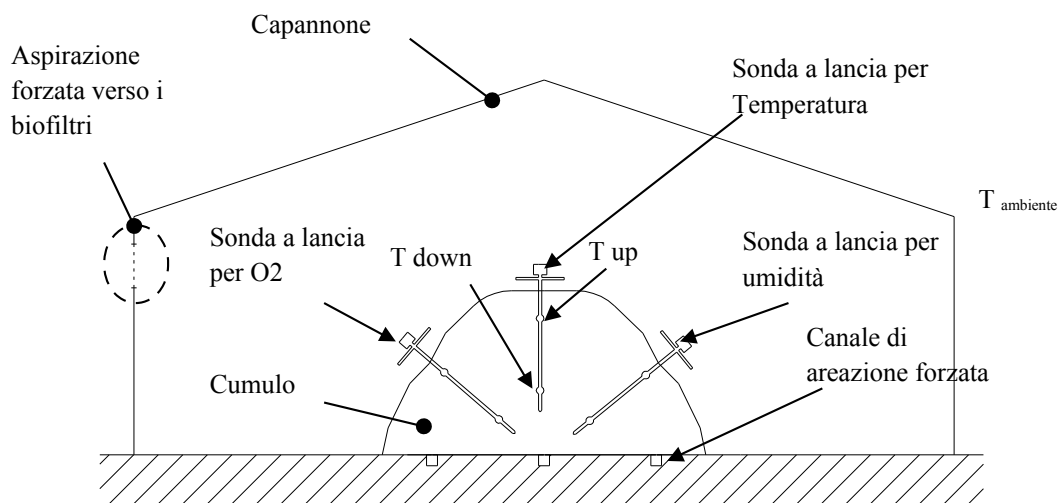
La sezione aperta, su piazzale o sotto tettoia, serve le lavorazioni di seguito elencate:

- conferimento, stoccaggio e triturazione della matrice ligno-cellulosica;
- maturazione e raffinazione della matrice al termine del processo;
- allestimento del cumulo di ammendante compostato misto;
- area per lo stoccaggio del prodotto finito.

L'impianto è stato concepito in modo da presidiare le fasi della lavorazione ritenute a maggior impatto; infatti, risultano ad oggi presidiate la sezione di conferimento e prima lavorazione del rifiuto e la biossidazione accelerata.

All'interno di ogni biocella esistono sistemi per il condizionamento e il monitoraggio dell'ambiente interno durante la fase di processo. I sistemi di condizionamento sono:

- un circuito di aerazione forzata per l'ossigenazione del cumulo;
- un circuito di captazione dell'aria dal volume libero interno al capannone.



**Fig. 1:** Schematizzazione andana e sistemi di condizionamento e monitoraggio

### **3. Modello di simulazione del processo di compostaggio**

#### *3.1 Introduzione*

I risultati emersi da prove analitiche hanno permesso di appurare che l'azione di un sistema di controllo comporta un incremento dell'efficienza del processo di biossidazione in termini economici ma anche qualitativi.

Tutti i campioni prelevati da lotti dotati di controllo automatizzato hanno rivelato, infatti, un IRD potenziale leggermente inferiore rispetto ai campioni prelevati su lotti a lavorazione classica.

Il parametro, invece, che ha presentato maggiore significatività al termine della biossidazione è stata la percentuale di umidità della matrice: tutti i lotti serviti dal sistema di gestione automatico hanno presentato una percentuale di umidità più elevata al termine della biossidazione accelerata.

Questa caratteristica ha determinato condizioni intrinseche del materiale più favorevoli per la successiva fase di maturazione del compost, tanto da migliorarne gli esiti finali emersi con l'IRDP.

In rischio ipotizzato, in presenza di una riduzione dell'apporto di aria legato al sistema automatizzato, era rappresentato dalla possibilità di incorrere in fenomeni fermentativi dovuti alla carenza di ossigeno nella miscela. Questa ipotesi, tuttavia, non ha preso corpo; infatti, le prove analitiche effettuate non hanno portato alla luce presenza significativa di composti ridotti dell'azoto o valori di pH anomali.

Quanto fin qui esposto conferma che l'apporto di aria al cumulo, ove superiore al fabbisogno legato alla richiesta di ossigeno utile per i processi ossidativi, può determinare un eccessivo allontanamento della fase liquida contenuta nella miscela. E' noto, infatti, che la limitata presenza di una fase liquida può pregiudicare la cinetica e la natura stessa dei processi biochimici che i microrganismi aerobici sono chiamati a completare.

In definitiva, l'ottimizzazione del fabbisogno di aria sotto cumulo si è tradotta sia in un concreto risparmio dei consumi elettrici ad opera dei ventilatori che di acqua utile all'umettamento in fase di maturazione.

#### *3.2 Modello di simulazione*

Per poter definire una procedura di gestione ottimizzata e automatizzata del processo di biossidazione è necessario realizzare un modello matematico dinamico che possa descrivere il sistema in modo sufficientemente attendibile.

Tale modello deve poter tenere conto delle condizioni ambientali, delle caratteristiche dell'impianto e degli effetti prodotti dalla biossidazione; di conseguenza, il modello risulta di difficile gestione e modellazione a causa delle molteplici interazioni tra le condizioni operative che ne condizionano l'andamento (temperatura, umidità, ossigeno, omogeneità della matrice, irraggiamento solare, ...) e dalla rilevante inerzia del cumulo dovuta soprattutto alla sua dimensione.

La corretta rispondenza del modello matematico al comportamento reale del cumulo è la base di partenza per la realizzazione di un sistema automatico di gestione del processo, che minimizzi l'utilizzo del circuito di aerazione forzata per l'ossigenazione del cumulo e quindi dei costi dell'energia elettrica, mantenendo comunque i parametri di temperatura, umidità e ossigenazione entro i valori ottimali per il processo di biossidazione.

A tale scopo si procede in due fasi:

1. Analisi dinamica complessiva;
2. Implementazione del modello matematico (funzione di trasferimento).

Nella prima fase viene condotta un'analisi dinamica della matrice organica del cumulo al fine di identificare la funzione di trasferimento del sistema; nella seconda fase, la funzione caratteristica individuata viene implementata, mediante l'utilizzo di strumenti dedicati alla simulazione (Simulink), a completamento delle equazioni dinamiche individuate per descrivere il processo di biossidazione ed ottenere la funzione di controllo definitiva da fornire al sistema di controllo.

### 3.3 *Analisi dinamica complessiva, identificazione della funzione di trasferimento del sistema*

La prima fase di analisi ha lo scopo di identificare alcuni parametri caratteristici (inerzia e costante tempo) propri del sistema costituito dalla matrice organica del cumulo all'interno dell'impianto (Fig. 1), mediante i quali è possibile individuare la funzione di trasferimento necessaria a descrivere l'inerzia con cui le variabili controllate (temperatura e percentuale di ossigeno nel cumulo) variano in funzione delle variabili di controllo (temperatura e quantità di aria immessa nel cumulo).

Allo scopo, quindi, di individuare tale funzione di trasferimento viene definita una campagna sperimentale di caratterizzazione che consiste nel registrare il comportamento del cumulo a determinati e costanti valori delle variabili di controllo, analizzando la risposta dello stesso al raggiungimento della condizione di equilibrio.

La campagna viene eseguita a due diversi valori di prova della temperatura dell'aria di raffreddamento insufflata all'interno del cumulo ( $T_{1, \text{ambiente}} = 15^{\circ}\text{C}$  e  $T_{2, \text{ambiente}} = 30^{\circ}\text{C}$ ).

Per ogni temperatura di prova vengono fornite al cumulo quattro diverse quantità di aria di raffreddamento, pari al 25%, 33%, 50% e 75% della portata massima erogabile dal ventilatore associato all'ossigenazione del cumulo.

Ai fini del raggiungimento della condizione di equilibrio, viene monitorato l'andamento dei valori di ossigeno e temperatura all'interno del cumulo (Fig. 1).

In modo da tenere in considerazione l'eventuale differente comportamento dinamico del sistema, che può manifestarsi lungo le varie fasi del processo di biossidazione, lo schema di prove sopra esposto viene ripetuto in tre diversi momenti di tale processo: ad attivazione stabile del processo di fermentazione, a circa quindici giorni dall'attivazione del processo ed in prossimità della fase finale di stabilizzazione del cumulo prima di terminare la fase di biossidazione accelerata.

I risultati ottenuti (andamento della temperatura e dell'ossigeno) consentono quindi non solo di ottenere in modo molto attendibile l'entità dell'inerzia propria del cumulo a determinate condizioni operative, ma anche di individuare la variabilità della stessa lungo tutta la durata del processo di stabilizzazione del compost, ottenendo informazioni per una più corretta previsione del comportamento del processo di biossidazione accelerata; in altre parole ottenendo una funzione di trasferimento per la descrizione complessiva del sistema.

### 3.4 *Implementazione del modello matematico (funzione di trasferimento)*

Una volta individuata la funzione di trasferimento propria del sistema, la stessa viene implementata in un complesso sistema logico di equazioni al fine di descrivere, nel tempo, l'evoluzione del processo di stabilizzazione del cumulo.

Mediante l'utilizzo di strumenti software dedicati (Simulink), l'implementazione della funzione di trasferimento consente di simulare in modo attendibile il processo di biossidazione della matrice organica legando le variabili di controllo in funzione delle variabili controllate.

Il sistema logico, infatti, acquisendo con una determinata frequenza le informazioni provenienti dalle sonde posizionate all'interno del cumulo e analizzando in aggiunta le variabili ambientali che possono condizionare il sistema, riesce ad ipotizzare, con buona approssimazione, il comportamento che il cumulo avrà allo step temporale immediatamente successivo, individuando, in altri termini, i valori che le variabili di controllo di temperatura ed ossigeno avranno nel cumulo in quelle determinate condizioni.

L'individuazione di tali valori consente al sistema logico, quindi, di ipotizzare l'evoluzione che il cumulo avrà, a parità di condizioni, all'intervallo temporale successivo, eventualmente intervenendo prima che tali condizioni si verifichino o rallentando il verificarsi delle stesse.

Ad esempio, in assenza di un tale tipo di controllo, l'eventuale superamento dei valori ottimali di temperatura ipotizzati per la corretta gestione del processo di biossidazione, non avrebbe alcuna influenza nel controllo dell'insufflaggio di aria, essendo il ventilatore gestito con cicli di accensione e spegnimento costanti nel tempo.

Mediante l'impiego della logica automatizzata, invece, il sistema di controllo è in grado di prevedere l'avvicinamento delle condizioni operative del cumulo verso i valori limite di temperatura, anticipando così l'accensione o lo spegnimento del ventilatore evitando il superamento degli stessi.

*Le simulazioni condotte mediante l'utilizzo di Simulink consentono, in definitiva, di individuare, in base al comportamento di stabilizzazione del cumulo, la tipologia di interventi e controlli da mettere in atto al fine di guidare il processo di compostaggio entro i parametri ottimali di biossidazione, senza alcun intervento da parte dell'operatore.*

## 4 Implementazione del modello di compostaggio e verifica delle prestazioni

### 4.1 Schematizzazione del controllo del processo di compostaggio

Di seguito viene riportata la descrizione sommaria dei componenti hardware utilizzati ai fini del controllo automatizzato dell'impianto, descrivendo la loro interazione (Fig. 2).

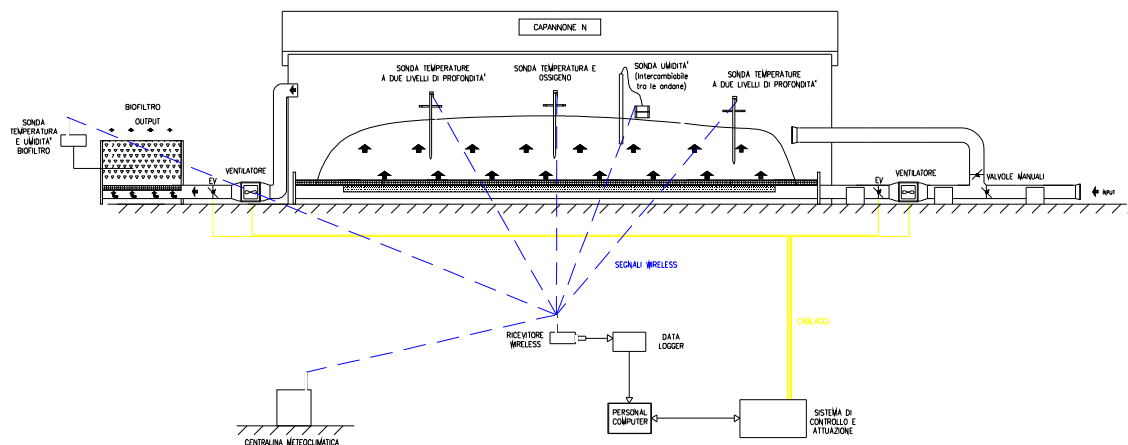


Fig. 2: Schema complessivo dell'impianto (riferito al controllo di un cumulo)

Lungo i cumuli controllati dal sistema automatizzato vengono installate un numero predefinito di sonde, con le seguenti specifiche:

- Sonda T/T, per la misura della temperatura a due profondità;
- Sonda T/O, per la misura di temperatura ed ossigeno;
- Sonda T/U, per la misura della temperatura e del contenuto idrico del materiale.

La configurazione di sonde minima è rappresentata da num. 2 sonde per la misura di temperatura, num. 1 sonda con misura di temperatura ed ossigeno e num. 1 sonda con misura di temperatura e contenuto idrico del materiale.

Un numero superiore di sonde lungo il cumulo aumenta il numero di punti di misura e la conseguente sensibilità sul controllo ottenuto dal sistema automatizzato.

I segnali provenienti dalle sonde posizionate lungo i cumuli vengono captati dal ricevitore ed inviati, con un sistema wireless, al sistema di controllo e supervisione (PLC) al fine di procedere all'elaborazione degli stessi, in base agli algoritmi individuati in fase di programmazione, per ottenere le logiche di attuazione dei componenti presenti nell'impianto per il condizionamento dei cumuli (ventilatori di insufflaggio aria, elettrovalvole di parzializzazione passaggio aria); per l'immissione forzata dell'aria necessaria al processo di biossidazione ogni cumulo, infatti, è provvisto di un ventilatore con portata massima proporzionata alle dimensioni massime del cumulo stesso.

Al fine di mantenere in depressione il capannone contenente i cumuli in fase di biossidazione, è presente un sistema di aspirazione interno che convoglia l'aria parzialmente esausta verso il biofiltro.

All'interno della condotta vengono posizionate due sonde per il controllo della temperatura e dell'umidità dell'aria parzialmente esausta.

Anche i segnali provenienti da queste sonde vengono inviati al sistema di controllo e supervisione (PLC), vengono quindi campionati dal sistema ed elaborati contemporaneamente alle informazioni provenienti dai cumuli al fine di verificare che le informazioni relative allo stato dell'aria interna al capannone siano compatibili con i parametri ottimali per il processo di biossidazione del cumulo.

In determinate condizioni operative, infatti, ai fini dell'insufflaggio di aria nel cumulo, è utile evitare di aspirare solo aria esterna, attivando un circuito che permette di ricircolare l'aria interna agli edifici di biossidazione accelerata opportunamente miscelata con una quota di aria esterna variabile in dipendenza delle condizioni climatiche stagionali (temperatura ed umidità).

Infine, situata in prossimità di una zona appositamente individuata, viene posizionata una stazione di rilevamento delle condizioni atmosferiche, con particolare riferimento alla gestione dei valori di Temperatura ed Umidità relativa ambientale.

Le informazioni relative alle condizioni atmosferiche vengono trasmesse anch'esse al sistema di controllo e supervisione ed utilizzate per l'ottimizzare delle logiche di controllo.

#### *4.2 Controllo e supervisione dell'impianto*

Il modello dinamico individuato per schematizzare l'andamento del processo di biossidazione accelerata della matrice viene implementato all'interno di un controllore logico programmabile (PLC) al fine di permettere la gestione automatizzata

dell'impianto, essendo esso collegato a tutti i sistemi di rilevamento ed attuazione (Fig.2). Tale gestione automatizzata permette di ridurre al minimo gli interventi di un operatore esterno, limitandoli alla sola configurazione del processo ed alla supervisione dell'impianto.

Mediante l'interfaccia software, l'operatore è in grado di monitorare lo stato complessivo dell'impianto relativamente ai valori di temperatura, ossigeno ed umidità caratteristici per ogni cumulo, lo stato di accensione e spegnimento dei ventilatori, le condizioni dell'aria dei capannoni e l'entità delle variabili ambientali.



Fig. 3: Esempio di schermate del sw di controllo e supervisione con PLC

In ogni momento l'operatore viene informato dal sistema circa l'eventuale instaurarsi di condizioni limite, in termini di superamento di valori configurati per temperature ed ossigeno.

#### 4.3 Funzionamento temporizzato vs funzionamento automatizzato

Viene quindi effettuato un confronto tra la logica di gestione temporizzata attualmente utilizzata per il processo e la gestione automatizzata del controllo utilizzando la funzione di trasferimento individuata per descrivere il comportamento del cumulo, al fine di confrontare le prestazioni ottenute, in termini di impiego di energia elettrica durante il periodo di biossificazione accelerata del cumulo (circa 30 giorni) semplicemente confrontando i periodi di utilizzo del circuito di aerazione forzata per l'ossigenazione del cumulo.

Di seguito vengono rappresentate le funzioni che descrivono gli stati fisici ON/OFF del circuito di aerazione forzata per l'ossigenazione nei due diversi casi testati (viene riportata una finestra temporale di 5 ore per motivi di leggibilità grafica).

In Fig. 4 è rappresentato un ciclo prova di accensioni e spegnimenti forniti dal temporizzatore (con frequenza pari a 20 minuti – 10 minuti di On e 10 minuti di OFF), mentre in Fig. 5 vengono riportati i cicli relativi all'applicazione del modello di controllo automatizzato individuato.

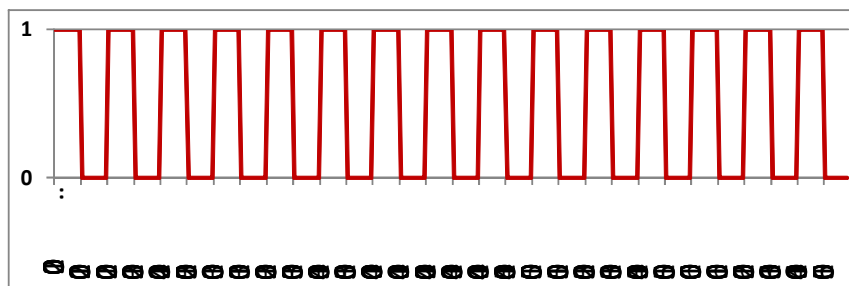


Fig. 4: Andamento ON/OFF ventilatore su funzionamento temporizzato (estratto di 5 ore)

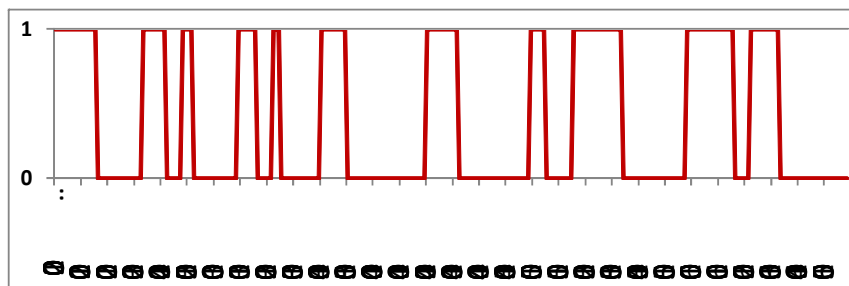


Fig. 5: Andamento ON/OFF ventilatore con applicazione del modello di controllo automatizzato (estratto di 5 ore)

A differenza del funzionamento temporizzato, nel caso in cui il ventilatore viene controllato dal sistema automatizzato si può osservare come non sia possibile identificare una frequenza di cicli accensione/spegnimento costante.

Il sistema automatizzato, infatti, mediante la funzione di controllo impostata, gestisce, autonomamente, in base all'acquisizione delle variabili di processo, la quantità di aria da inviare al cumulo.

Dal confronto tra le due tipologie di funzionamento è possibile evidenziare quanto ricapitolato in tabella seguente:

Tipologia funzionamento	Durata [gg]	Ciclo ventilatore ON [min]	Ciclo ventilatore OFF [min]	Ore complessive ventilatore ON [h]	Potenza ventilatore [kW/h]	Consumo [kW]
Temporizzato	30	10	10	360	7	2520
Automatico (PLC)	30	-	-	270	7	<b>1890</b>

**Tab. 1:** Ricapitolazione confronto tipologie di funzionamento

Dal confronto tra le due tipologie di funzionamento è possibile osservare come nel caso in cui il processo di bioossidazione venga controllato mediante il sistema automatizzato vi sia un risparmio energetico pari a circa il 25% rispetto ai consumi relativi al controllo temporizzato ipotizzato. Tale valore può variare in funzione della stagione e delle caratteristiche dell'impianto.

## 5 Conclusioni

A seguito delle analisi effettuate, la modellazione matematica dell'impianto e l'automazione della gestione del processo di bioossidazione mediante software di controllo, rispetto all'utilizzo con modalità temporizzata delle accensioni e spegnimenti del circuito di aerazione forzata per l'ossigenazione ha evidenziato i seguenti vantaggi:

- Possibilità di verificare il corretto dimensionamento di nuovi impianti in fase progettuale
- Ottenimento di elevati standard qualitativi del prodotto
- Monitoraggio costante del processo di bioossidazione
- Sensibile risparmio energetico che permette in tempi rapidi di recuperare l'investimento per l'implementazione del sistema di controllo automatizzato dell'impianto;
- Riduzione delle emissioni gassose e quindi dell'impatto ambientale

## Bibliografia

- [1] **Adani F., Genevini P.L., Gasperi F., Zorzi G.**, (1997). Organic Matter Evolution Index (OMEI) as a measure of composting efficiency. *Compost Science & Utilization*
- [2] **Genevini P.L., Adani F., Villa C.**, (1997). Rice hull degradation by co-composting with dairy cattle slurry. *Soil science and Plant Nutrition*
- [3] **Scaglia B., Tambone F., Genevini P.L., Adani F.**, (2000). Respiration Index Determination: A Dynamic And Static Approach. *Compost Science & Utilization*
- [4] **R. Chiumenti A. Chiumenti** (2002). "La tecnologia del compostaggio". Regione Veneto (Ass. Politiche per Amb. e Mob.), ARPAV (Osservatorio Regionale Rifiuti)
- [5] **R.T. Haug**, (1986). "Composting process design criteria, part 3". *Biocycle*, Vol. 27, October, pp. 53-57
- [6] **S. Silvestri, P. Nappi, R. Barberis** (1997). "Il processo di compostaggio", *L'informatore agrario (suppl.)*, n. 44/97: pp. 11-14.