

Prefabbricare. Tradurre in economia lo spazio e il tempo.



Unire la conoscenza della realtà e i suoi problemi operativi con la capacità di produrre soluzioni idonee al progettista e al costruttore.

La prefabbricazione può essere considerata la sintesi di questi due punti.

Manufatti prefabbricati in cemento armato normale e precompresso per costruzioni civili, industriali e rurali, scuole, ponti, ...



PREFABBRICATI PRECOMPRESSI VIBRATI IN C.A.

ING. PRUNOTTO S.p.A.

12060 GRINZANE CAVOUR (CN) - PIANA GALLO, 3



IMPRESA COSTRUZIONI

ING. PRUNOTTO S.p.A.

12060 GRINZANE CAVOUR (CN) - PIANA GALLO, 3

La ING. PRUNOTTO S.p.A. realizza e progetta tutto questo, traducendo in realtà pratica e razionale la scelta delle tecnologie più adatte alle esigenze del momento determinate fundamentalmente dall'esperienza.

Ed è sempre l'esperienza, solitamente, la dote che mette in

grado un'impresa di fronteggiare rapidamente ed efficacemente i problemi più difficili ed imprevisti.

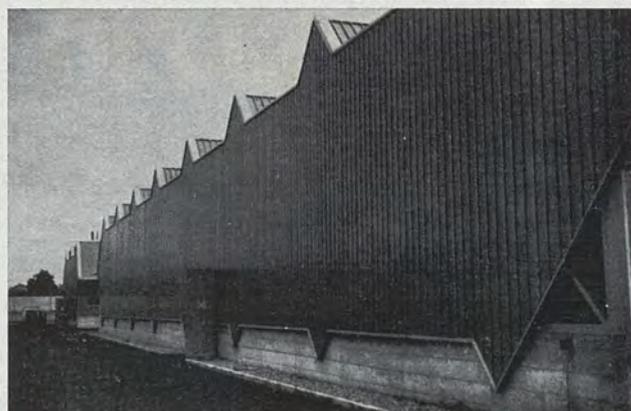
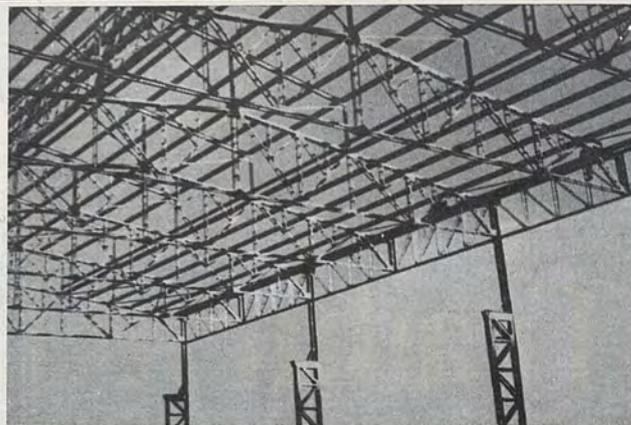
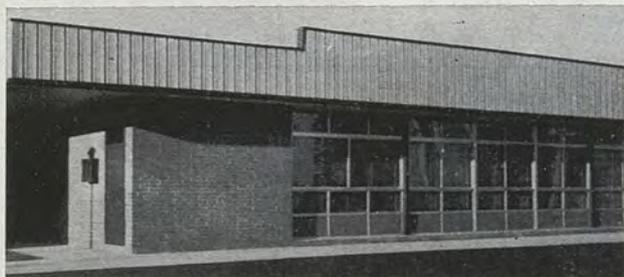
CANDELA

EDIFICI

CIVILI - INDUSTRIALI - AGRICOLI

ORTECO

CARPENTERIA METALLICA



Torino - c. M. D'Azeglio 78 - tel. 688792

SISTEMI TELEFONICI A MISURA D'UTENTE



per: PICCOLE & MEDIE AZIENDE
INDUSTRIE
VILLE
OSPEDALI
BANCHE
PROFESSIONISTI

Telefonica Subalpina

DA 35 ANNI È CONSULENZA, PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE

CORSO DUCA DEGLI ABRUZZI 6 - TORINO - TEL. 535.000





**Quando il trasporto è un "grosso"
problema...**

Gondrand, naturalmente.

Trasporto grandi impianti - Trasporto di materiali radioattivi e di merci pericolose
Montaggi industriali - Noleggio autogrù

GONDRAND

Una holding articolata per tutti i servizi inerenti la movimentazione delle merci.
Presente in 86 località italiane - 227 sedi di gruppo in Europa.

Sede Sociale: Milano - Via Pontaccio, 21 - tel. 874854 - telex 334659
(indirizzi sulle Pagine Gialle alla voce spedizioni aeree, marittime, terrestri).



copri con

Onduline®

scopri che risparmi



IN VENDITA NEI PRINCIPALI MAGAZZINI

Onduline ITALIA SPA

55011 ALTOPASCIO (Lucca) Via Sibolla Tel. (0583) 25611/2/3/4/5 r.a. Telex 500228 ITOFIC - I

10

SOCIETÀ
DEGLI INGEGNERI E DEGLI ARCHITETTI
IN TORINO



12 GEN 1983

ATTI E RASSEGNA TECNICA

Anno 115

XXXVI - 11-12

NOVEMBRE
DICEMBRE 1982

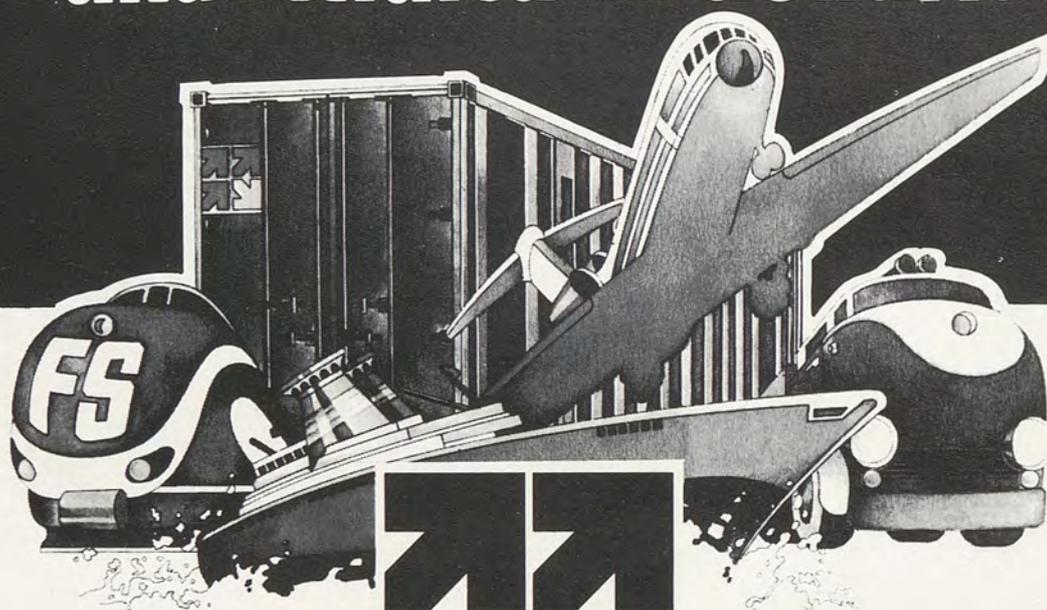
N U O V A S E R I E

**SISTEMI DI PRODUZIONE ED UTILIZZAZIONE
DELL'ENERGIA NELL'AREA PIEMONTESE**

**La fermentazione anaerobica quale mezzo
di valorizzazione energetica di rifiuti organici**

SPEDIZIONE IN ABBONAMENTO POSTALE - GR. III/70 - MENSILE

**Tutti vi promettono
una rendita sicura,
vantaggiosa, comoda.
Solo noi vi offriamo
una rendita in dollari.**



Studio Linea G

FRAGIFIN
DIVISIONE CONTAINERS

CONSULTATECI PRESSO I SEGUENTI INDIRIZZI:

RA. CO

Via Chiappero, 23 (grattacielo) 10064 PINEROLO - Tel. (0121) 77.255

MINIWEEK

Via Saliceto, 5 10137 TORINO - Tel. (011) 355.331 / 399.289

STUDIO 4

Via Vigone, 34 10064 PINEROLO - Tel. (0121) 21.081

Via Fonte Blancio, 16 - 10060 LUSERNA ALTA

Tel. (0121) 909.583

ATTI E RASSEGNA TECNICA

DELLA SOCIETÀ DEGLI INGEGNERI E DEGLI ARCHITETTI IN TORINO

RIVISTA FONDATA A TORINO NEL 1867

NUOVA SERIE . ANNO XXXVI . NUMERO 11-12 . NOV.-DIC. 1982

SOMMARIO

Premessa di E. Lavagno, Direttore della Ricerca . . . pag. 571

E. LAVAGNO, P. RAVETTO, B. RUGGERI - *La fermentazione anaerobica quale mezzo di valorizzazione energetica di rifiuti organici* » 575

Direttore: Mario Federico Roggero.

Vice Direttore: Roberto Gabetti.

Comitato di redazione: Matteo Andriano, Bruno Astori, Guido Barba Navaretti, Claudio Decker, Marco Filippi, Cristiana Lombardi Sertorio, Vera Comoli Mandracci, Francesco Sibilla.

Redattore capo: Elena Tamagno.

Comitato di amministrazione: Francesco Barrera, Giuseppe Fulcheri, Mario Federico Roggero.

Redazione, segreteria, amministrazione: Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino, via Giolitti, 1 - Torino.

ISSN 0004-7287

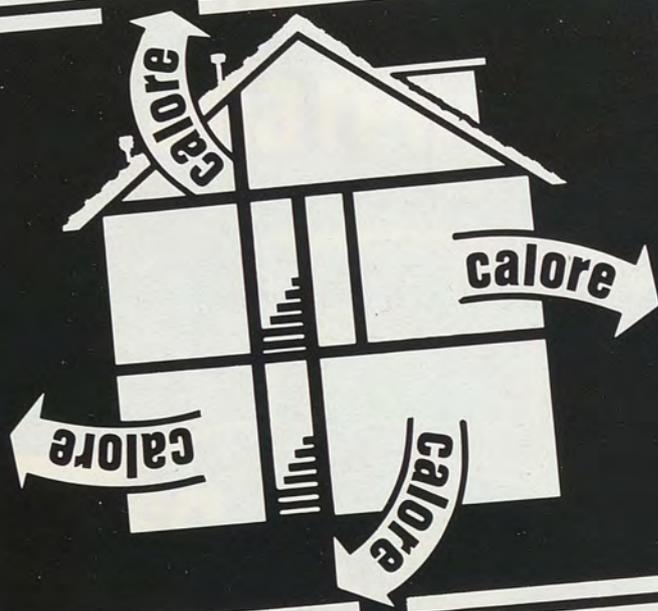
Periodico inviato gratuitamente ai Soci della Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino.

NELLO SCRIVERE AGLI INSERZIONISTI CITARE QUESTA RIVISTA |

ISOLANTI TERMICI



altea



**il calore
costa
risparmiare
isolando**

- **Polistirolo estruso**
- **Polistirolo espanso**
- **Polistirolo espanso stampato per termocompressione**
- **Fibre minerali:** feltri e pannelli in lana di vetro. Feltri e pannelli in lana di roccia.
- **Poliuretani** liquidi da applicare a spruzzo.
- **Poliuretani** in lastre prodotte in continuo.
- **Argilla espansa**
- **Cartongesso** in lastre semplici
- **Cartongesso** in lastre accoppiate con polistirolo espanso ed estruso.
- **Pannelli sandwich** con corteccia in acciaio o in alluminio con anima isolante in poliuretano o in polistirolo estruso.
- **Sughero autoespanso**

STUDI E CONSULENZE SULL'ISOLAMENTO TERMICO SECONDO LA "LEGGE 373"

10129 TORINO - Corso Mediterraneo, 94 - Tel. (011) 596877/599125 - Telex 212051

**SISTEMI DI PRODUZIONE
ED UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA
NELL'AREA PIEMONTESE**

**Convenzione di ricerca fra il Politecnico
di Torino e la Regione Piemonte**

La convenzione di ricerca sui « Sistemi di produzione ed utilizzazione dell'energia nell'area piemontese », stipulata nel febbraio 1980 tra il Politecnico di Torino e la Regione Piemonte, su iniziativa dell'Istituto di Fisica Tecnica e Impianti Nucleari e dell'Assessorato alla Pianificazione del Territorio, e di cui vengono ora presentati i risultati per il primo anno di svolgimento, rappresenta, a nostro avviso, un significativo esempio di come particolari necessità conoscitive ed operative di una fondamentale articolazione del potere locale possano trovare, da parte di una istituzione pubblica di formazione e ricerca, risposte e stimoli su di un tema, quello energetico, che si dimostra sempre più d'importanza strategica per lo sviluppo delle diverse attività sul territorio.

L'attività di ricerca, che ha visto la partecipazione di docenti e ricercatori delle due Facoltà di Ingegneria e Architettura, nonché di ricercatori e di operatori di vari Enti sia pubblici che privati, si è sviluppata, secondo il programma concordato, in tre direzioni distinte anche se complementari: il bilancio energetico regionale, gli studi preliminari di fattibilità, l'informazione scientifica.

Per quanto riguarda il primo obiettivo, è stata avviata la raccolta e l'analisi critica del materiale informativo e dei dati esistenti necessari alla stesura del bilancio energetico regionale. Parte del materiale analizzato è stata utilizzata per redigere il capitolo « L'energia » della Relazione sulla situazione socio-economica del Piemonte per il 1979 redatta dall'IRES nel dicembre 1980; il materiale che viene ora presentato riguarda un'approfondimento dei contenuti e delle voci del bilancio energetico globale ed una ampia serie di dati sui consumi energetici del settore manifatturiero, articolati per tipo di fonte,

per provincia e per gruppo di attività, premessa per la costruzione del bilancio energetico del settore industriale. È stato inoltre dedicato un particolare contributo al problema della produzione combinata di energia elettrica e calore nel settore manifatturiero e alla situazione delle concessioni per uso idroelettrico e forza motrice. Per il settore agricolo si è proceduto ad una analisi accurata e si è pervenuti alla redazione del bilancio energetico completo ed alla formulazione, sulla base dei risultati ottenuti, di valutazioni e proposte in relazione a particolari aspetti del ciclo agro-alimentare.

Il secondo obiettivo programmato consisteva nell'effettuare, in riferimento alla situazione energetica della Regione, alcuni studi preliminari per la formulazione di programmi di ricerca, fattibilità e/o intervento concernenti particolari aspetti del sistema di produzione e utilizzazione dell'energia del territorio.

Questi studi si sono rivolti fondamentalmente ai problemi connessi con la produzione, la distribuzione, l'utilizzazione ed il recupero dell'energia termica, in quanto quest'ultima è l'anello finale di una catena di conversioni che meglio si presta ad interventi di carattere locale e rappresenta una quota cospicua degli usi finali.

Gli studi compiuti hanno avuto come oggetto:

— Una analisi di fattibilità di un intervento di riscaldamento urbano in un'area torinese, i cui risultati costituiscono una esauriente premessa anche per una estensione ad altre parti del territorio. L'area urbana esaminata in dettaglio è la zona sud di Torino con Moncalieri e Nichelino, in riferimento ad un impianto di cogenerazione sito nella centrale AEM di Moncalieri.

La fermentazione anaerobica quale mezzo di valorizzazione energetica di rifiuti organici

— Una analisi di fattibilità di un intervento di riscaldamento urbano con uso di fluidi geotermici (progetto GEOTORINO), a partire da uno studio sulla geotermia e sulla distribuzione delle temperature nel sottosuolo piemontese e da una interpretazione geologica del settore piemontese della pianura padana.

— Una serie coordinata di studi sul problema del contenimento dei consumi energetici nella climatizzazione degli edifici (programma RECE), che comprende la raccolta e l'analisi delle tipologie edilizie e dei relativi consumi energetici in riferimento al patrimonio di edilizia residenziale pubblica di proprietà degli IACP ed agli edifici scolastici, una analisi del problema della determinazione del consumo energetico per usi termici attribuibile a tutto il parco edilizio adibito a residenza ed infine una completa trattazione dei problemi connessi con l'effettuazione della « diagnosi energetica » degli edifici e con l'attuazione dei provvedimenti di rinforzo dell'isolamento termico.

— Uno studio sulla fermentazione anaerobica intesa come mezzo di valorizzazione energetica dei rifiuti organici che, in particolare, analizza gli aspetti tecnici ed economici della produzione di biogas da deiezioni animali per la potenzialità da esse rappresentata nel territorio piemontese ed emersa dallo studio sul bilancio energetico del settore agricolo.

La terza direzione di lavoro programmata ha riguardato la realizzazione di strumenti e di momenti di informazione sui termini, generali e particolari, del problema energetico. Questo terreno di collaborazione ci è sembrato particolarmente importante, sia per la rilevanza del problema che per il ruolo che l'istituzione universitaria deve svolgere nel campo della formazione. L'attività fondamentale sinora

sviluppata ha riguardato la realizzazione, in collaborazione con gli Assessorati alla Pianificazione del Territorio e all'Istruzione e Cultura e con l'Unione Culturale Franco Antonicelli, di una mostra sul tema energetico, articolata in tre sezioni: « Problemi dell'energia nel mondo, in Italia, in Piemonte » e della quale è stato realizzato anche un catalogo completo. La mostra, inaugurata nel maggio 1980, è tuttora utilizzata in varie sedi e, corredata dalle previste integrazioni concernenti le diverse situazioni locali, potrà costituire il supporto per iniziative di diffusione dell'informazione in termini scientifici.

Non mi è qui possibile ringraziare tutti coloro che, pur non facendo parte integrante dei gruppi di ricerca, hanno contribuito con informazioni, suggerimenti e consigli alle attività svolte, ma desidero rivolgere un particolare ringraziamento a tutti i collaboratori che hanno dedicato impegno ed entusiasmo all'iniziativa ed in particolare ai colleghi che hanno coordinato i gruppi di ricerca Giovanni Del Tin, Antonio Di Molfetta, Marco Filippi, Bruno Panella e Piero Ravetto. Un particolare ringraziamento devo rivolgere all'Assessore Luigi Rivalta con il quale è stato avviato il programma di ricerca e all'Assessore Gabriele Salerno con il quale il programma è giunto al termine del primo anno di attività.

EVASIO LAVAGNO (*)
direttore della ricerca

(*) Ingegnere, docente di Trasmissione del calore presso il Politecnico di Torino.

La fermentazione anaerobica quale mezzo di valorizzazione energetica di rifiuti organici

Ricerca svolta da: Evasio Lavagno, Piero Ravetto, Bernardo Ruggeri. Istituto di Fisica Tecnica e Impianti Nucleari, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24 - 10129 Torino.

INDICE

| | Pag. |
|--|------|
| <i>1. Biochimica della fermentazione anaerobica</i> | |
| 1.1. Alcune definizioni | 577 |
| 1.2. Considerazioni generali | 577 |
| 1.3. Batteri metanogeni | 578 |
| 1.4. Stadi della fermentazione anaerobica | 579 |
| 1.5. Aspetti chimici della fermentazione anaerobica | 580 |
| 1.6. Fermentazione anaerobica della cellulosa e della lignina | 582 |
| <i>2. Parametri funzionali</i> | |
| 2.1. Chimici | 583 |
| 2.2. Chimico-fisici: pH, concentrazione, acidi volatili, pressione, temperatura, onogeneità dell'alimentazione | 584 |
| 2.3. Fluido-dinamici: carico organico al digestore, agitazione, forma del digestore | 585 |
| <i>3. Tipologie di impianto</i> | |
| 3.1. Digestore discontinuo | 586 |
| 3.2. Digestore continuo | 586 |
| 3.3. Digestore orizzontale o « plug-flow » | 588 |
| 3.4. Digestore monostadio (high-rate) | 589 |
| 3.5. Digestore a più stadi | 589 |
| 3.6. Digestore a contatto | 590 |
| 3.7. Digestore ad espansione | 590 |
| <i>4. Criteri di conduzione</i> | |
| 4.1. Processo continuo | 590 |
| 4.2. Processo discontinuo | 591 |
| <i>5. Alimentazione</i> | |
| 5.1. Digestione anaerobica nel trattamento delle acque reflue urbane | 592 |
| 5.2. Digestione anaerobica di rifiuti solidi urbani | 593 |
| 5.3. Digestione anaerobica di rifiuti industriali | 593 |
| 5.4. Digestione anaerobica di liquami zootecnici | 594 |
| 5.5. Digestione anaerobica di residui agricoli | 594 |
| <i>6. Prodotti della digestione anaerobica</i> | |
| 6.1. Biogas: caratteristiche | 595 |
| 6.2. Biogas: purificazione | 597 |
| 6.3. Biogas: stoccaggio in gasometro | 598 |
| 6.4. Biogas: compressione in bombole | 599 |
| 6.5. Biogas: combustione | 599 |
| 6.6. Effluenti liquidi e solidi quali fertilizzanti | 599 |
| 6.7. Aspetti patogeni | 600 |
| <i>7. Aspetti economici</i> | |
| 7.1. Considerazioni generali | 600 |
| 7.2. Curva analitica dei costi di investimento | 601 |
| 7.3. Costo di produzione annuo | 601 |
| 7.4. Produzione di biogas da deiezioni suine e bovine | 601 |
| BIBLIOGRAFIA USATA NEL TESTO | 602 |

INTRODUZIONE

L'importanza che vanno acquisendo le fonti energetiche alternative ai combustibili fossili ha stimolato un rinnovato interesse per la fermentazione anaerobica.

L'interesse per questa tecnologia non è dato solo dalla prospettiva di ricavare energia, ma anche dal fatto che in tale modo si consegue una riduzione dell'inquinamento ambientale provocato da residui organici sia agricoli che industriali e nel contempo si ottengono un liquido e un solido che sono suscettibili di essere usati nei campi come fertilizzanti.

La fermentazione anaerobica è quel complesso di reazioni chimico-biologiche, messe in atto da batteri che vivono in assenza di aria, attraverso le quali le molecole organiche complesse vengono trasformate in molecole chimicamente più semplici. Il prodotto delle reazioni è in parte gassoso (*biogas*) e contiene una certa quantità di metano; nella restante parte, si ha un'arricchimento di sali minerali tale da renderla un buon fertilizzante.

Un'altra definizione, senz'altro meno scientifica ma molto ricca di significato per le implicazioni che presuppone, è quella che individua nella fermentazione anaerobica quel processo per cui la sostanza organica considerata di scarto riacquista un suo valore d'uso o, in termini ancora più sintetici, il rifiuto viene trasformato in un bene pregiato.

Il valore, di questo bene ovviamente, dipende dal contenuto tecnologico del processo e viene comunemente quantificato con il costo di valorizzazione.

Vedere nella fermentazione anaerobica solo un mezzo per la produzione di biogas o solo una tecnologia integrativa della depurazione aerobica dei liquami risulta fuorviante; indubbiamente, i due aspetti sopra ricordati sono di estrema importanza, ma non gli unici. L'ulteriore dato importante da cogliere è la produzione di fertilizzanti in quanto esso ha un riferimento immediato in agricoltura. L'acquisizione di tale fatto implica immediatamente la concezione di una diversa agricoltura e di un rapporto strutturale dinamico diverso tra mondo industriale e mondo agricolo.

Questo è il nodo da affrontare per rendere effettivamente « appropriata » la tecnologia della fermentazione anaerobica e valorizzare appieno il contributo che essa può dare ad un diverso rapporto uomo/natura, di cui la crisi energetica è un aspetto.

Il presente lavoro si pone come obiettivo di fornire una conoscenza generale del processo di fermentazione anaerobica, considerando quelli che sono gli aspetti biochimici e chimici di base; in esso, inoltre, è contenuta una panoramica sulle tipologie tecnologiche e sui parametri che influenzano il rendimento del processo fermentativo.

Il testo comprende un capitolo che analizza, in maniera sintetica, le caratteristiche dei rifiuti che

possono essere avviati alla fermentazione anaerobica e valuta le quantità di biogas ottenibili da essi. Un altro capitolo mostra le caratteristiche dei prodotti (gassosi e non) e le difficoltà connesse alla loro utilizzazione.

Infine vi è un capitolo che analizza gli aspetti economici della produzione di biogas da deiezioni bovine e suine, in cui sono riportati i risultati di un'indagine condotta presso ditte nazionali che forniscono impianti di fermentazione anaerobica.

1. BIOCHIMICA DELLA FERMENTAZIONE ANAEROBICA

In questo capitolo vengono esposti i risultati di ricerche biochimiche e chimiche svolte in più Paesi al fine di comprendere la natura della catena delle reazioni che intervengono in un processo di fermentazione anaerobica.

È da rilevare fin da ora, che lo stato della conoscenza di tali problemi è scarso e ciò per una molteplicità di fattori, che vanno dalla complessità delle fasi del processo (diversi substrati, diverse specie batteriche) alla mancanza di strumenti teorici adeguati.

1.1. Alcune definizioni.

Si chiamerà nel seguito *substrato* la materia organica che fornisce « l'alimento » ai microorganismi; con il termine microorganismi o batteri si intendranno quegli organismi viventi che sono capaci di espletare la loro funzione metabolica in assenza di ossigeno, per questo detti anaerobici. Il processo attraverso il quale le sostanze organiche vengono degradate è detto *fermentazione* o *digestione*, aerobica o anaerobica.

L'instaurarsi dell'una o dell'altra dipende dalla presenza o meno di ossigeno nel digestore. Nel seguito, se non verrà specificato diversamente, si intenderà per fermentazione (o digestione) quella anaerobica.

Viene detto digestore o reattore, il recipiente in cui avviene il processo fermentativo.

Con il termine *biogas* si intende il prodotto gassoso della fermentazione anaerobica.

1.2. Considerazioni generali.

I prodotti finali della digestione anaerobica di sostanze organiche (proteine, grassi, cellulosa, ecc.) sono essenzialmente metano (CH_4) e anidride carbonica (CO_2).

Al variare delle condizioni chimico-fisiche in cui avviene la digestione, nel biogas possono essere presenti percentuali variabili di H_2O , ammoniaca NH_3 e acido solfidrico H_2S ; da parte di alcuni ricercatori si è riscontrata la presenza di H_2 , anche se in scarsa quantità.

La sostanza organica (SO) suscettibile di un processo fermentativo è presente nei rifiuti organici. Tali rifiuti possono essere costituiti da: amminoacidi, proteine, urea, grassi, acidi grassi, carboidrati, cellulosa e altre molecole complesse. Ovviamente la composizione percentuale dei rifiuti organici varia a seconda della loro provenienza: civili, agroalimentari, deiezioni animali o altro.

I microorganismi implicati nel processo anaerobico esercitano la loro azione attaccando le molecole del substrato per ricavarne materia ed energia per generare altre cellule viventi e così, trasformare le sostanze complesse in altre più semplici.

È da porre in risalto che in un processo anaerobico, il prodotto metabolico di una specie batterica costituisce il substrato per un'altra specie batterica; si può quindi dire che sono contemporaneamente presenti più gruppi di batteri ognuno dei quali è specializzato nell'attacco di un certo substrato.

Ciò porta ad alcune considerazioni:

- la degradazione di un certo substrato fino a CO_2 e CH_4 , passa attraverso stadi ben definiti e distinti di un cammino biochimico-chimico;
- possono aversi cammini differenti al variare della composizione dell'alimentazione.

L'attacco delle molecole organiche da parte dei microorganismi avviene attraverso processi enzimatici per opera di enzimi generati dalle cellule viventi.

La funzione dell'enzima è quella tipica dei catalizzatori; quella, cioè di abbassare l'energia di attivazione delle reazioni chimiche e/o biochimiche. Non è ancora ben noto se in tali processi gli enzimi abbiano anche la capacità di innescare reazioni che altrimenti non avverrebbero. Gli enzimi presentano una struttura chimica e caratteristiche chimico-fisiche analoghe a quelle delle proteine.

È uso comune chiamare gli enzimi non con il loro nome chimico, ma con il nome della reazione che essi catalizzano. Gli enzimi sono altamente selettivi sia rispetto alla reazione che catalizzano che al composto, anche se vi sono delle eccezioni; ad esempio, dall'acido piruvico, con quattro enzimi diversi, si possono ottenere: acetaldeide e gli acidi: acetico, formico e lattico.

Gli enzimi che un batterio può produrre possono essere di due tipi: extracellulare e intracellulare: i primi servono ad operare una parziale idrolisi del substrato per renderlo atto ad attraversare le pareti cellulari; gli altri a rendere i prodotti dell'idrolisi in grado di passare attraverso le pareti cellulari. L'azione enzimatica è indispensabile per il metabolismo del cibo «preferito» dal batterio. D'altro canto quando tale cibo è scarso, vengono prodotti da parte del batterio degli enzimi al fine di adattare il substrato disponibile ad essere metabolizzato.

Questo semplice concetto, riconduce a quello più generale dell'adattamento dei microorganismi all'ambiente in cui vengono a trovarsi.

È da rilevare che l'adattamento non è solo funzione del cibo, dell'energia disponibile, della temperatura, cioè di quelli che si possono chiamare fattori ambientali, ma altresì dell'interrelazioni tra le diverse specie batteriche presenti. Questo è il fattore deter-

minante nel processo di adattamento, in specie per la fermentazione di rifiuti che presentano diversi substrati, con condizioni microambientali diverse e con crescita di molte speci batteriche.

Le interrelazioni microbiotiche sono molte e poco conosciute; volendo tentare una classificazione, esse si possono distinguere in base al risultato che inducono in una cultura mista di batteri, che può essere: *antagonistico o associativo*.

Rientrano nel primo caso come forme di antagonismo le seguenti:

- competitiva: quando un gruppo batterico riesce ad appropriarsi completamente di un substrato nutritizio a discapito di un altro gruppo che necessita dello stesso;
- inibitiva: quando ad esempio, a causa dell'abbondanza di un dato substrato, il prodotto del metabolismo batterico genera delle condizioni ambientali, intollerabili per altri batteri, es.: la generazione di acidi organici in grossa quantità, abbassa il pH ad un valore letale per altri batteri;
- tossica e antibiotica: particolari forme di inibizione dovute a particolari sostanze generate dai batteri;
- parassitaria: instaurarsi di fenomeni di infestazione di cellule batteriche;
- predativa: fenomeno che tende ad innescarsi quando incomincia a scarseggiare il cibo.

Sono forme associative, in generale, il contrario di quelle antagoniste ad es.:

- bilanciamento: ad es. una specie batterica che rimuove un agente dannoso ad un'altra;
- successiva: quando una specie batterica genera un metabolita che costituisce il substrato vitale per un'altra;
- stimolativa: quando alcune specie stimolano l'assimilazione di certi substrati di altre;
- simbiotica: tale effetti vengono ritenuti estremamente rari.

Processi antagonistici e associativi avvengono in digestioni in cui non sono presenti colture batteriche pure, come ad esempio in quelle di rifiuti organici.

Sostanzialmente le interrelazioni batteriche sono poco conosciute per la difficoltà di isolare la singola interrelazione, anche se da parte di molti ricercatori vi sono sforzi in questa direzione.

Analisi microscopiche hanno permesso di osservare che le specie batteriche attive durante un processo fermentativo, sono diverse.

1.3. Batteri metanogeni.

Fin dal 1936 furono individuate quattro specie batteriche che, come prodotto metabolico, danno metano.

Nel corso dei decenni tale numero non è cresciuto di molto come si può osservare in tab. I dove è riportata una classificazione secondo H.A. Baker [1]. Per completare il quadro, secondo Prevot (1977) [2], alle specie riportate in tab. I ne vanno aggiunte altre due: *methanospirillum* e *methanobacillus*.

Più autori concordano nell'indicare i batteri metanogeni come un gruppo non geneticamente omogeneo e con morfologia variabile, però tutte le specie osservate presentano delle caratteristiche comuni e cioè:

- il loro sviluppo richiede l'utilizzo di agenti riduttivi e propriamente di H_2 ;
- sono fortemente anaerobiche; anche se per alcune la resistenza all'esposizione di O_2 (aria) è maggiore che per altre;
- secondo autori francesi [3] tutte posseggono composti particolari quali il coenzima M (*) il fattore F_{42} e la vitamina B_{12} (cobalamina) che conferirebbe loro la capacità di formare CH_4 a partire da H_2 e CO_2 ;
- necessitano di azoto per la loro crescita.

Rispetto alla temperatura i batteri metanogeni, si dividono in mesofili e termofili, con temperature ottimali di crescita rispettivamente intorno ai 30-35 °C e 65-70 °C.

Rispetto al substrato sul quale agiscono, i batteri metanogeni sono estremamente selettivi, non è però escluso in alcuni casi la presenza benefica di altri substrati.

I substrati sui quali i metanogeni agiscono, sono sostanzialmente acidi organici, quindi è necessario che in un processo fermentativo di SO, altre specie batteriche non metanogene creino, con la loro azione, i substrati acidi su cui possano crescere i primi.

Infine è da rilevare che l'ambiente condiziona molto l'azione dei batteri metanogeni; ad es. il potenziale red-ox deve essere a valori inferiori ai -350 mV, il pH deve essere compreso in un campo di 6,2 ÷ 7,5, inoltre non deve esservi presenza di inibitori sia inorganici: ioni metallici, anioni; che organici: antibiotici ed altri.

Tab. I

| |
|------------------------------|
| Methanobacterium formicicum |
| Methanobacterium omelianskii |
| Methanobacterium propionicum |
| Methanobacterium söhngeni |
| Methanobacterium suboxydans |
| Methanococcus mazei |
| Methanococcus vannielii |
| Methanosarcina methanica |
| Methanosarcina barkerii |

1.4. Stadi della fermentazione anaerobica.

Allo stato attuale, molti ricercatori ritengono che un processo fermentativo anaerobico di sostanze organiche passi attraverso tre stadi ben distinguibili concettualmente tra di loro fig. 1:

- idrolisi — degradazione delle macromolecole costituenti la SO in molecole più piccole ad opera

(*) HS — $CH_2CH_2SO_3$ acido 2-Mercaptoetansolfonico.

di enzimi e/o per idrolisi: es. zuccheri, acidi grassi, alcoli ecc. che si potrebbero chiamare composti intermedi;

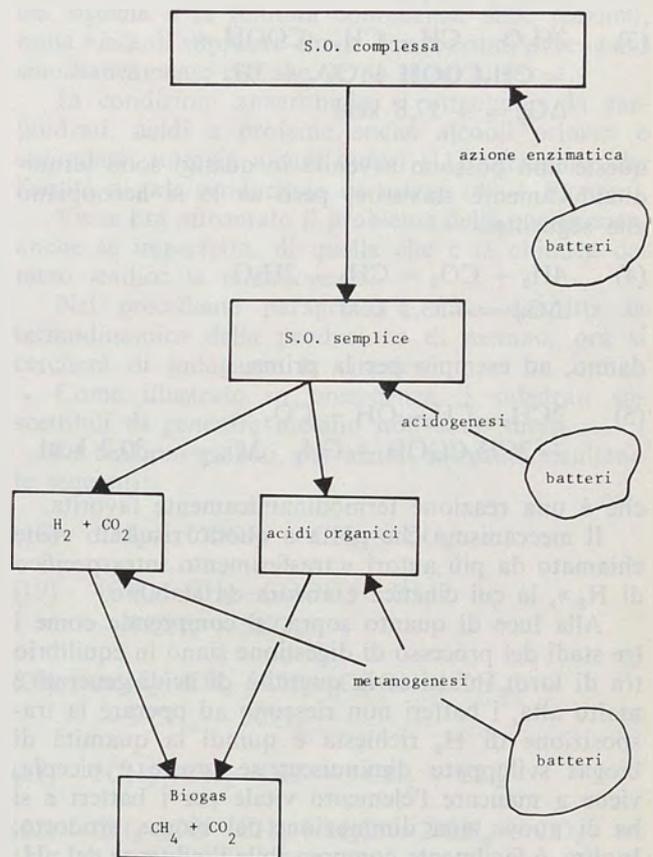


Fig. 1 - Schematizzazione del processo di fermentazione anaerobica per la produzione di biogas.

- acidogenesi — degradazione dei composti intermedi in: acidi organici volatili (VFA) quali: acetico, formico, butirrico; alcool metilico, idrogeno e CO_2 ;
- metanogenesi — formazione di metano dai substrati creati nello stadio precedente.

Si ottengono un prodotto gassoso detto biogas, costituito da CH_4 e CO_2 in proporzione variabile a seconda della composizione dei rifiuti di partenza e delle condizioni di processo, e piccole quantità di H_2S , H_2 , N_2 .

Secondo Zeikus [5] tutte le specie batteriche metanogene utilizzano come substrato H_2 e CO_2 , mentre altre possono utilizzare:

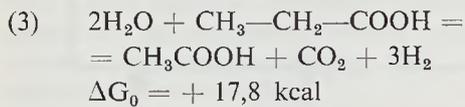
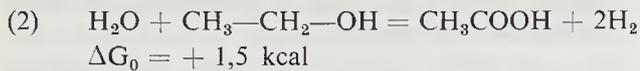
acetato, formiato, metanolo. Per Barker [1] la lista dei substrati include anche: alcoli secondari e gli acidi: propionico, butirrico, capronico, valerianico, e acetone.

L'acido acetico subisce una fermentazione diretta

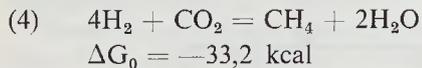


mentre gli altri che si formano nella fase di acidogenesi, per poter essere trasformati in CH_4 , necessitano di una rimozione di H_2 da parte dei batteri;

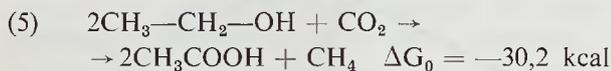
ad es., se si considerano le seguenti due reazioni:



queste non possono avvenire in quanto sono termodinamicamente sfavorite, però se le si accoppiano alla seguente:



danno, ad esempio per la prima,



che è una reazione termodinamicamente favorita.

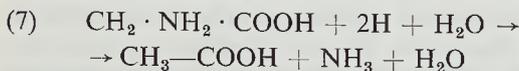
Il meccanismo che porta a questo risultato viene chiamato da più autori «trasferimento intraspecifico di H_2 », la cui cinetica è ancora da stabilire.

Alla luce di quanto sopra, si comprende come i tre stadi del processo di digestione siano in equilibrio tra di loro; infatti se la quantità di acidi generati è molto alta, i batteri non riescono ad operare la trasposizione di H_2 richiesta e quindi la quantità di biogas sviluppato diminuisce; se invece è piccola, viene a mancare l'elemento vitale per i batteri e si ha di nuovo una diminuzione del biogas prodotto. Inoltre, è facilmente comprensibile l'influenza del pH: al di sopra di pH 8 la crescita batterica diminuisce rapidamente, in quanto si abbassa fortemente la concentrazione di CO_2 , mentre al di sotto di pH 6 lo ione H^+ inibisce i fenomeni di trasferimento intraspecifico, probabilmente per l'instaurarsi della seguente reazione:



Si cercherà ora di comprendere la genesi degli altri gas che sono presenti nel biogas.

— L'azoto proviene da urea, proteine e prodotti di degradazione di queste ultime che generano NH_3 in diversi modi, ad esempio:

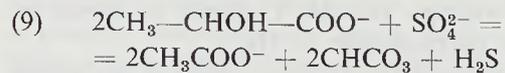


L'azoto ha un ruolo estremamente importante per tutto il processo fermentativo: il suo allontanamento, sotto forma di N_2 allo stato gassoso, è un fattore determinante per l'utilizzo come fertilizzanti dei residui solidi e liquidi della fermentazione. Alcuni autori [6] ritengono fondamentale la presenza dello ione NH_4^+ per la crescita batterica; inoltre l'ammoniaca è un regolatore del pH:



In seguito si vedrà meglio come il rapporto C/N è uno dei parametri fondamentali per il processo di digestione.

— lo zolfo è presente nei seguenti composti: solfati, tiosolfati, tiocianati, tionine, proteine, 2-mercaptoetilammina ecc., i quali per reazione di decomposizione e/o ossidazione, ad esempio secondo la seguente reazione:



portano alla formazione di idrogeno solforato.

Quest'ultimo è importante sotto il profilo tecnologico in quanto è un agente estremamente corrosivo. Inoltre non è da trascurare la corrosione del calcestruzzo causata dall'azione combinata di batteri solfato-riduttivi e altri (T. Thiooxidans, T. Thioporus, T. novelles) che secondo il meccanismo riportato da Parker [7] riescono ad attaccare lo ione SO_4^{2-} contenuto nel cemento.

Lo stadio che controlla il processo di digestione è il terzo, in quanto è ritenuto da molti quello più lento.

In colture pure, si è rilevato [8] che, durante la fase di crescita logaritmica, il tempo di generazione dei batteri metanogeni è di 10 ÷ 17 ore inoltre si è constatato che, con opportune insemminazioni, tale tempo viene notevolmente ridotto.

In conclusione, in un sistema ben equilibrato, le tre fasi della fermentazione si producono simultaneamente generando biogas e distruggendo una certa quantità di SO iniziale; questo però, a condizione che alcuni parametri vengano rispettati per creare condizioni ottimali alla vita batterica. Una migliore definizione e alcune indicazioni sul controllo di questi parametri sarà oggetto di un capitolo successivo.

1.5. Aspetti chimici della fermentazione anaerobica.

La digestione anaerobica è un processo in cui il materiale di partenza (SO) viene liquefatto e/o idrolizzato, mineralizzato e gassificato.

I termini «idrolisi e liquefazione», in questo contesto, sono usati indifferentemente, anche se indicano due processi chimici ben distinti: il primo indica la scissione di una molecola complessa in una più semplice per addizione di H_2O , mentre il secondo non ha una connotazione chimica ben definita, ma indica soltanto il passaggio dallo stato solido a quello liquido nel digestore. Si ritiene che i due processi avvengono nel digestore entrambi, durante la fase di idrolisi. Con il termine «mineralizzazione» si indica quell'insieme di processi attraverso i quali la materia organica di partenza risulta alla fine arricchita in sostanza minerale, per il fatto che parte di quella organica è stata convertita in biogas.

L'idrolisi è attuata ad opera di enzimi extracellulari; essa può avvenire in diversi modi: in fase solida, liquida o colloidale.

L'idrolisi è considerata come fase preliminare di preparazione del «cibo» per le fasi successive, estremamente importante in quanto determinante per l'andamento di tutto il processo.

L'esistenza dell'idrolisi è stata provata sperimentalmente da vari autori [9] che hanno constatato un aumento nel tempo del BOD_5 nella fase liquida

presente nel digestore e questo a riprova che la sostanza biodegradabile aumenta.

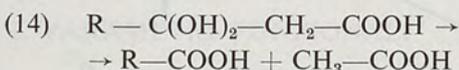
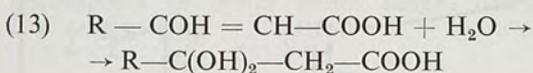
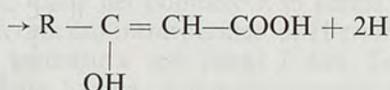
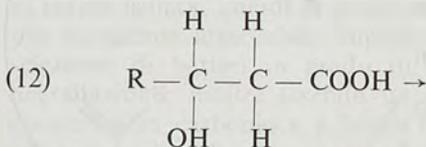
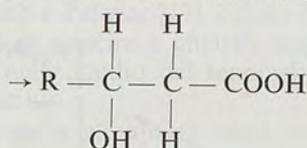
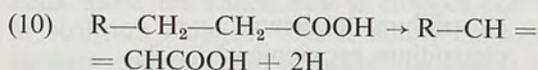
La maggior parte degli enzimi che agiscono nella digestione anaerobica sono extracellulari e sono legati alla membrana cellulare dall'esterno, nello spazio periplasmatico. Questo determina un ruolo importante dell'agitazione nella realizzazione dei digestori.

Durante l'acidogenesi si ha produzione di acidi grassi volatili (VFA) i quali, per degradazione successiva, portano alla formazione di quegli acidi che precedentemente sono stati individuati come substrato per i batteri metanogeni.

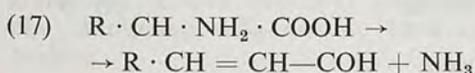
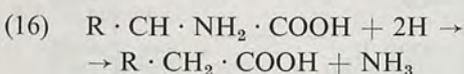
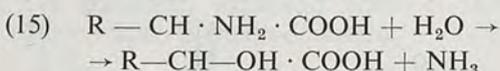
In questa fase si hanno trasformazioni degli acidi grassi liberi sostanzialmente attraverso due gruppi di reazioni:

- idrogenazione parziale di acidi grassi monoinsaturi;
- degradazione degli acidi a lunga catena con un meccanismo di β - ossidazione di Koop, proposto da Neave e Buswell [10].

Questi ultimi propongono un susseguirsi di reazioni combinate di deidrogenazione e somma di H_2O che portano alla formazione di acido acetico:



Gli amminoacidi, che provengono dall'idrolisi delle proteine, per reazioni di deaminazione generano acidi grassi e ammoniaca:



Per azione di alcuni batteri, favoriti da un ambiente acido, si possono verificare anche reazioni di decarbossilazione del gruppo carbossilico con produzione di ammine. Ovviamente, data la complessità del sistema e la limitata conoscenza delle reazioni, nulla vieta di supporre che le due reazioni avvengano simultaneamente e/o che ve ne siano altre.

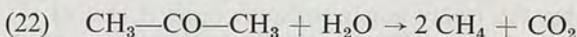
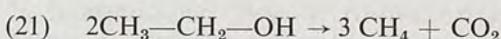
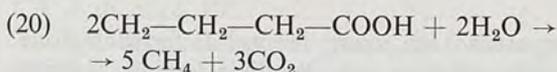
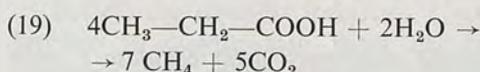
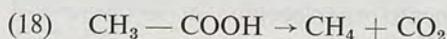
In condizioni anaerobiche si ottengono da carboidrati, acidi e proteine anche alcoli primari e secondari; tuttavia alcuni autori [11] ritengono che l'entità di tale produzione sia esigua ($40 \div 50$ ppm).

Viene ora affrontato il problema della conoscenza, anche se imperfetta, di quella che è la chimica del terzo stadio: la metanogenesi.

Nel precedente paragrafo è stata descritta la termodinamica della produzione di metano, ora si cercherà di indagarne la cinetica.

Come illustrato in precedenza, i substrati suscettibili di generare metano non sono molti.

Le reazioni globali, per alcuni substrati, risultano le seguenti:



Come si vede dalle reazioni, la struttura del substrato non interferisce con i prodotti di reazione se non quantitativamente. La spiegazione della formazione della CO_2 è da imputare, presumibilmente, all'ossidazione completa di parte del substrato, mentre non risulta chiaro il perché ci sia sempre formazione di CH_4 .

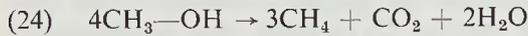
La risposta a tale quesito fu formulata da Van Niel nel 1934 [12], il quale postulò che il substrato venisse ossidato completamente dai batteri con produzione di H_2 e CO_2 che successivamente veniva ridotta a CH_4 .

Tale ipotesi è stata confermata da diversi autori, ed è stata accettata come corretta, anche se non è ancora ben nota la cinetica di riduzione della CO_2 a CH_4 . Il meccanismo è stato confermato facendo uso di CO_2 radioattiva [13] e può essere schematizzato con la seguente reazione globale:



in cui H_2A rappresenta il composto che può essere usato dai batteri metanogeni quale formatore di ossigeno per la riduzione della CO_2 . Inoltre esistono meccanismi secondo i quali almeno due substrati [1] vengono trasformati in metano, senza passare attraverso la CO_2 . Uno è la fermentazione dell'acido acetico che per decarbossilazione diretta, forma CO_2 mentre il restante gruppo metilico genera CH_4 ; questo meccanismo è stato confermato da Stadtman e Pine [14]; il secondo è quello per cui l'alcool metilico

produce metano secondo la seguente reazione, come ritenuto da Schnell [15]:



In definitiva, la produzione di CH_4 , a partire dai substrati idonei per la crescita dei batteri metanogeni, può avvenire in due differenti meccanismi: il primo diretto, valido per acido acetico e alcool metilico e il secondo indiretto che prevede uno stadio di deidrogenazione del substrato e successiva idrogenazione della CO_2 .

Onde evitare equivoci, si vuol ricordare che quelle scritte sono equazioni chimiche che, come tali, esprimono solo bilanci di massa e nulla dicono sulla cinetica delle reazioni stesse; in realtà esse avvengono, ad opera dei microorganismi, con una cinetica che è ancora da comprendere.

Resta da scoprire inoltre un altro gruppo di microorganismi, quelli responsabili della degradazione degli acidi grassi fino ad arrivare ai substrati utilizzabili dai batteri metanogeni e cioè come avviene il trasferimento interspecifico di idrogeno e il sistema ADP/ATP.

1.6. Fermentazione anaerobica della cellulosa e della lignina.

Si riportano ora, come esempi di fermentazione: quello della cellulosa e quello della lignina; il primo

è molto più noto del secondo, ma entrambi sono importanti in quanto tali sostanze sono i costituenti principali dei rifiuti cereoagricoli.

Cellulosa: gli stadi fermentativi di questa sono:

- idrolisi, in cui si ha formazione di zuccheri, acidi grassi ed alcoli;
- acidogenesi, con formazione di acetati, formiati, idrogeno e CO_2 ;
- metanogenesi, con formazione di biogas.

Ad ogni stadio corrisponde un gruppo di microorganismi ben specifico: nel primo, l'enzima responsabile dei processi che avvengono è la cellulasi, prodotta da:

- clostridium cellulosa-fissovens
- clostridium cellulosolvens
- clostridium cellulolyticum

L'azione batterica si esplica in tre fasi:

- nella prima: si passa dal polisaccaride al disaccaride (cellobiosio) e da questo, per azione della cellobiosio, si arriva al glucosio; il prodotto che si ottiene è fortemente dipendente dalle condizioni ambientali: pH, temperatura, potenziale Red-Ox.

I batteri attivi sono:

- clostridium dutylicum
- clostridium propionicum
- micrococcus lactilyticus
- clostridium lacto-acetophilum.

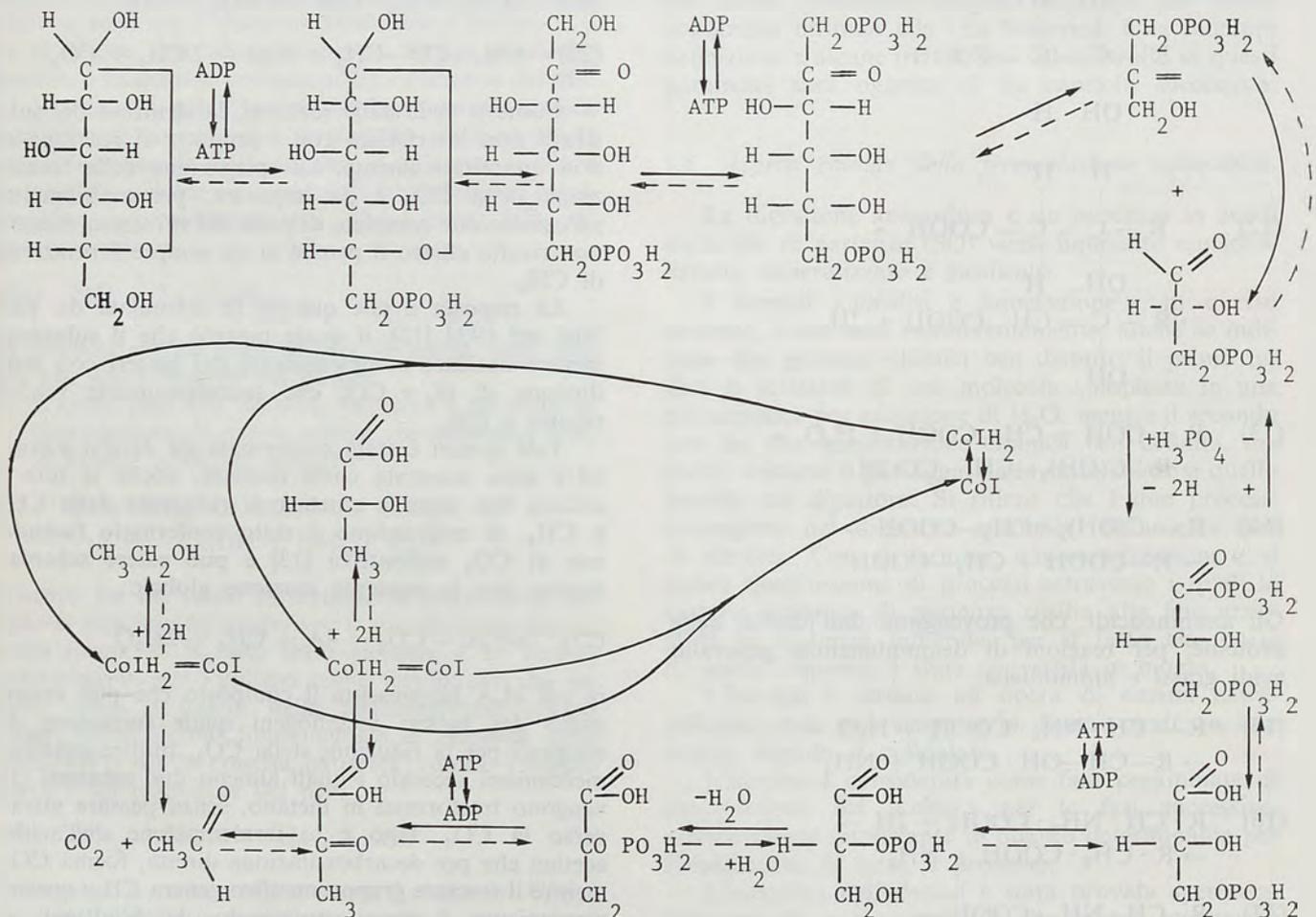


Fig. 2 - Fermentazione anaerobica della cellulosa.

È stato accertato [16] che il prodotto principale è l'acido piruvico, secondo lo schema riportato in fig. 2 che è il risultato del lavoro di più autori i quali pongono in evidenza l'esotermicità di tutto il ciclo fermentativo; ciò significa, grande disponibilità di energia che favorisce sia l'azione dei batteri che la loro crescita. Altri autori [11] eseguendo misure microcalorimetriche hanno mostrato come la quantità di calore disponibile sia proporzionale alla quantità di cellulosa fermentata.

Altri prodotti possono essere: acido lattico, alcool etilico, acido acetico, formico e, al variare delle condizioni ambientali, possono formarsi gli acidi butirrico e succinico;

- nella seconda: su tali acidi si esercita l'azione di quei batteri, purtroppo del tutto ignoti, che da essi riescono a sintetizzare i substrati per i batteri metanogeni;
- nella terza, la metanogenesi, sono attivi quelle specie batteriche riportate nella parte generale

Lignina: molti ricercatori ritengono che la lignina sia la sostanza più resistente all'attacco biochimico, della quale tra l'altro non si conosce con esattezza la struttura chimica, diversi autori concordano nel ritenere che essa sia costituita da alcoli aromatici altamente polimerizzati. La decomposizione anaerobica della lignina è stata studiata intensamente da Gotthieb e Pelozar [17], i quali hanno avuto il grande merito di riuscire a chiarire quali difficoltà si incontrano nello studio del fenomeno che rimane ancora sconosciuto.

Secondo gli autori citati, tali difficoltà possono essere sintetizzate nel fatto che la lignina non esiste in forma isolata, quindi la presenza di altre sostanze, più facilmente attaccabili, impedisce la crescita e la selezione di batteri in grado di provocare la sua degradazione; inoltre essendo un composto ad alto contenuto in carbonio e a basso contenuto di idrogeno, il quale nel polimero è in forma molto stabile, il trasferimento intraspecifico di H risulta difficoltoso.

In letteratura son pochi i dati disponibili sulla F.A. della lignina; è noto comunque che essa viene decomposta in tempi molto lunghi dell'ordine di 4 ÷ 6 mesi [18].

2. PARAMETRI FUNZIONALI

In questo capitolo vengono presi in esame i fattori influenti il processo fermentativo e i loro campi di variazione per il controllo della digestione di rifiuti animali e agro-alimentari.

I parametri esaminati sono di tipo: chimico, chimico-fisico e fluido-dinamico.

2.1. Chimici.

Con questo nome si intendono quegli elementi chimici (e le loro quantità), presenti nel digestore, che influiscono sulla crescita batterica e sulla inibizione.

Gli elementi necessari alla crescita batterica sono, oltre al carbonio, l'azoto e il fosforo; affinché si abbia una buona crescita il loro rapporto deve essere all'incirca: $100 \div 5 \div 1$ misurando la quantità di C in BOD, in accordo con quanto riportato da Mc Carty [19].

L'azoto è necessario in quanto gli organismi viventi ne hanno necessità per formare le proteine; una sua scarsa quantità determina un basso utilizzo del carbonio presente. Se invece è presente una quantità di azoto superiore al necessario questo si libera sotto forma di NH_3 che, come visto nel capitolo precedente, è sì un autoregolatore del pH, ma in quantità eccessiva è tossica.

Con un valore del rapporto C/N all'alimentazione compreso tra 25 e 30 si ha una buona produzione di biogas e un residuo che è un buon fertilizzante. Tale rapporto non deve comunque superare il valore di 35 che è il limite al di sopra del quale la produzione di biogas è molto lenta; non deve essere neppure molto inferiore ai valori ottimali in quanto, dato l'elevato contenuto di NH_3 , il processo può arrestarsi.

Per ciò che riguarda il fosforo, i batteri ne hanno bisogno in quanto esso entra nei complessi cicli energetici delle cellule viventi: il rapporto ottimale C/P è di circa 150.

Una disponibilità maggiore di fosforo non genera grossi problemi, ma una mancanza ne inibisce la fermentazione. Esso si ritrova nel biogas sotto forma di idrogeno fosforato.

In tab. II sono riportati alcuni valori del rapporto C/N per differenti tipi di deiezioni.

Gli agenti chimici inibenti il processo anaerobico vengono divisi in ioni metallici ed altri.

I primi, presenti in bassa concentrazione sono indispensabili al metabolismo delle cellule viventi mentre all'aumentare della concentrazione diventano forti inibitori; nella tabella III sono riportati i valori di concentrazione entro cui si hanno gli effetti inibenti. Per i metalli pesanti quali Cu, Ni, Cr e Pb, la concentrazione di tali ioni in soluzione non deve raggiungere il valore di 10 ppm in corrispondenza del quale il processo risulta completamente bloccato.

Per quanto riguarda gli altri ioni, è da porre in risalto che lo zolfo sotto forma di solfuro a concentrazione intorno ai 250-300 mg/lit risulta dannoso; c'è da rilevare che lo ione S^{2-} precipita i metalli pesanti come solfuri insolubili; quindi, se vi è una abbondanza di solfuri, questa può essere eliminata per aggiunta di sali di ferro. Parte dei solfuri però si sviluppa come idrogeno solforato che si ritrova nel biogas e deve essere eliminato immediatamente a valle del digestore in quanto è un composto estremamente corrosivo.

Si è constatato che una concentrazione di NH_3 libera maggiore di 150 mg/lit, inibisce completamente la produzione di biogas; l'azoto ammoniacale nel digestore, non deve mai superare i 1500 mg/lit [20] affinché non si abbia inibizione.

Altri composti chimici inibenti il processo anaerobico di digestione sono i detergenti, i composti organoclorati, i solventi organici, gli antibiotici e simili.

Su tali inibitori non sono stati ancora compiuti studi sistematici tesi a determinarne i limiti di tossicità; le concentrazioni non devono superare i 15 ÷ 20 mg/lt.

Tabella II

| Deiezione | C/N |
|---------------|-----|
| Bovina | 25 |
| Suina | 20 |
| Equina | 25 |
| Letame bovino | 30 |

Tabella III

| Ioni | Conc. in mg/lt | |
|--|-------------------|------------------|
| | Inibizione debole | Inibizione forte |
| Na ⁺ | 200 ÷ 3500 | 5500 |
| K ⁺ | 400 ÷ 2500 | 4500 |
| Ca ²⁺ | 200 ÷ 2500 | 4500 |
| Mg ²⁺ | 150 ÷ 1000 | 1500 |
| NH ⁺ ₄ | 200 ÷ 1500 | 2000 |
| Cu ²⁺ , Ni ²⁺ , Cr ⁶⁺ , Zn ²⁺ , Pb ²⁺ | | 10 |

2.2. Chimico-fisici.

2.2.a Concentrazione idrogenionica.

Il parametro di gran lunga più influente sul processo di fermentazione anaerobica è il pH. Si è già detto quale sia il suo campo di variazione senza che si abbiano effetti disastrosi sul processo, il valore ottimale è compreso tra 7 ÷ 7,2 [21].

Con la formazione di ammoniaca la digestione si autoregola, però, a volte, può succedere che tale aumento non sia sufficiente a neutralizzare tutto l'acido che si sviluppa; in tali casi, si può aggiungere calce [Ca(OH)₂], solfato di sodio, carbonato di ammonio e ammoniaca.

L'aggiunta va fatta ovviamente con estrema attenzione: ad es. la calce non va aggiunta se non quando il pH scende a valori al di sotto di 6,7, in quanto per valori superiori non è efficace perché forma CaCO₃; il sale più efficace è il bicarbonato anche se è il più costoso.

Quando il valore del pH si innalza di molto, per riabbassarlo bisogna aggiungere dell'acido; da parte di alcuni autori [22], questo intervento; viene vivamente sconsigliato; piuttosto è preferibile correggere il pH a monte del digestore ossia sull'alimentazione.

Se è necessario intervenire nel digestore è consigliabile l'aggiunta di acidi organici (formico o acetico), oppure, se il contenuto di azoto è basso, di acido nitrico; è da evitare l'introduzione di acido solforico, in quanto produce idrogeno solforato.

2.2.b Concentrazione acidi volatili.

Altro parametro che è necessario controllare con estrema attenzione è la concentrazione in acidi volatili, la quale non deve superare il valore di 1200 ÷ 1300 mg/lt. Il controllo di questo parametro è direttamente legato al pH; però, se gli interventi descritti sopra si ripetono nel tempo, è necessario agire sull'alimentazione e cioè sulla percentuale di solidi volatili presenti in essa.

Ovviamente tutto ciò vale per le fermentazioni condotte allo stato liquido, per le quali la percentuale di solidi nell'alimentazione è dell'ordine del 7 ÷ 8% [23].

2.2.c Pressione.

La pressione di lavoro del digestore può essere quella atmosferica, tuttavia, si preferisce lavorare in genere in leggera sovrappressione 10 ÷ 20 cm H₂O, per evitare l'ingresso di aria. Inoltre, da parte di alcuni, [24] si è riscontrato un effetto benefico della leggera sovrappressione anche sui fenomeni biochimici. Si consiglia tuttavia di non avere nel digestore pressioni troppo elevate, in quanto le reazioni risultano complessivamente ritardate, per il rallentamento dei fenomeni di diffusione del gas all'interfaccia gas/liquido e l'aumento della concentrazione in fase liquida, il che comporta una minor produzione di gas.

2.2.d Temperatura.

Come già detto la temperatura minima ottimale di funzionamento di un digestore è 30 ÷ 32 °C. A temperature superiori si ha una accelerazione dei processi, ma la maggior spesa energetica non sembra essere compensata dall'aumento di produzione di biogas. Al di sotto dei 10 ÷ 15 °C la produzione di biogas è praticamente nulla.

È da rilevare che la temperatura va tenuta rigidamente costante per evitare abbassamenti nel rendimento della digestione.

In fig. 3 è riportata una curva di produzione del biogas da liquami suini con il 6% di solidi totali all'alimentazione, in funzione della temperatura [25].

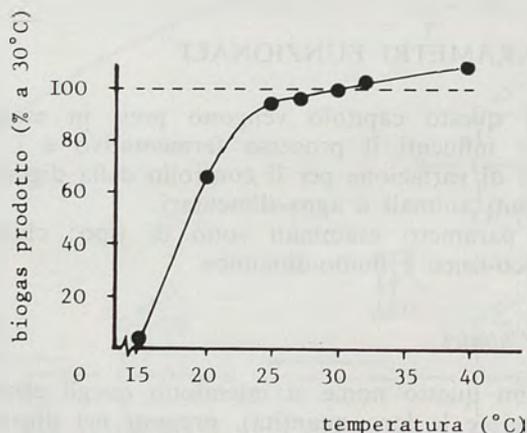


Fig. 3 - Produzione di biogas da liquami suini al 6% S.T.

In fig. 4 si riporta invece una curva di produzione del biogas da rifiuti urbani in funzione della temperatura [26].

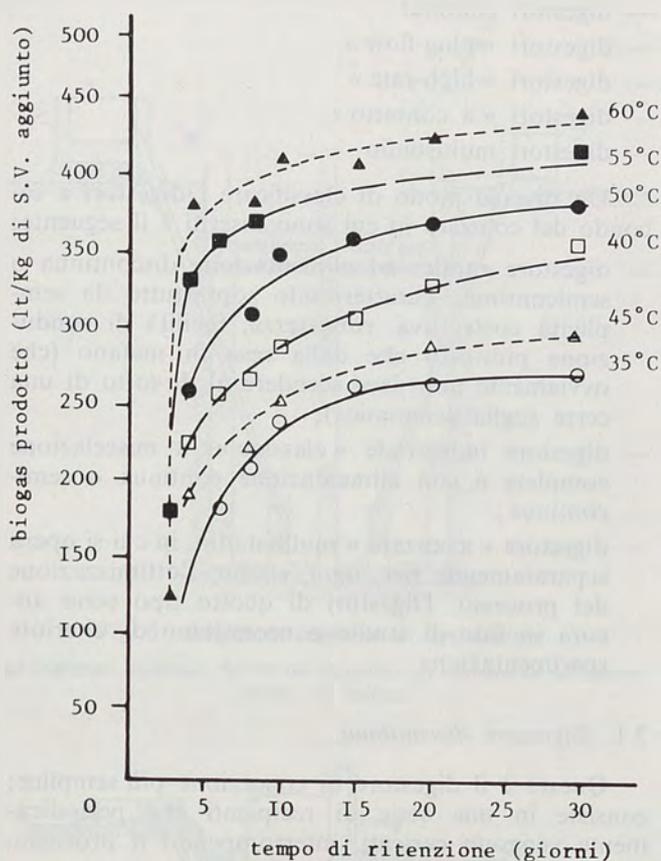


Fig. 4 - Produzione di biogas da rifiuti solidi urbani.

2.2.e Omogeneità dell'alimentazione.

L'alimentazione di un digestore deve essere perfettamente omogenea e i solidi devono essere ridotti in piccoli pezzi, questo per aumentare la superficie di contatto delle particelle. L'azione meccanica, con cui si ottiene il risultato di avere un'alimentazione « polposa » non ha solo lo scopo di omogeneizzare le fasi solide e liquide, ma anche lo scopo di rompere le micelle delle sostanze organiche per favorirne il contatto con gli enzimi.

Questo trattamento viene fatto a monte del reattore.

2.3. Fluidodinamici.

Con tale dicitura, si indicano: il tempo di ritenzione, il carico sul digestore, l'agitazione, la forma.

2.3.a Tempo di ritenzione.

Con tale dicitura si intende il tempo di stazionamento della materia organica nel digestore. Avendo due fasi, una solida e una liquida, si avranno due tempi di ritenzione: T_i e T_s , che tendono ad ugugiarsi quanto più si è in presenza di un'alimentazione omogenea, di un sistema che opera in continuo, senza ricircolo dei fanghi e con una buona agitazione.

Il tempo di ritenzione è legato al volume del reattore e alla portata della alimentazione, $T_r = V/Q$, però il suo valore è determinato da numerosi altri fattori quali il tempo di riproduzione dei batteri, la percentuale di solidi dell'alimentazione, l'intervallo di carica e non ultimo le finalità dalla digestione anaerobica, se si vuole produzione di gas, un effetto depurativo, o per l'ottenimento di un buon concime, o per tutti e tre gli scopi.

Il tempo di riproduzione dei batteri varia in funzione della temperatura. Secondo Mc Carty [19] il tempo di ritenzione deve essere due volte e mezzo il tempo di riproduzione dei batteri, in tab. IV sono riportati alcuni valori in funzione della temperatura. Qui si vuole solo ricordare che il tempo di ritenzione ottimale dipende da numerosi fattori, quindi per il trattamento di un certo rifiuto organico e per certe condizioni operative esso va determinato sperimentalmente.

Inoltre se lo scopo è quello di spingere al massimo la depurazione dell'alimentazione il tempo di ritenzione sarà maggiore.

Tabella IV

| Temperatura (°C) | Tempo di riproduzione batterico (giorni) |
|------------------|--|
| 20 | 11 |
| 25 | 8 |
| 30 | 6 |
| 35 | 4 |
| 40 | 4 |

2.3.b Carico digestore.

Per carico al digestore si intende quel parametro di progetto che determina la quantità di materia organica sopportabile da un dato digestore.

Esso è espresso in quantità di materia organica (solidi volatili SV) per unità di volume del digestore al giorno ($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{g}$).

Tale valore per reattori con scarsa agitazione, quindi con disuniformità fra punto e punto della massa fermentativa, è compreso fra $0,6 \div 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot \text{g}$, mentre con un reattore funzionante con una buona agitazione e condizioni di pH e temperature ottimali può raggiungere anche il valore di $8 \div 10 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot \text{g}$.

2.3.c Agitazione.

Si prende ora in esame il parametro di progetto di gran lunga il più importante: l'agitazione. Ad essa è affidato il compito di uniformare la massa in fermentazione e di rendere uniforme le condizioni di funzionamento del digestore cioè uniformare la temperatura, la concentrazione della massa batterica e dei substrati per evitare accumuli. Inoltre all'agitazione è affidata la rottura e/o l'impedimento di una crosta che tende a formarsi nella parte superiore del fermentatore, la quale se non rimossa o impedita può portare all'arresto del processo fermentativo.

Questo fenomeno è tipico dei digestori in cui sono presenti delle parti vegetali in fermentazione.

L'agitazione per essere efficace non deve essere continua, ma avvenire ad intervalli regolari che dipendono dal tipo di digestore e dall'alimentazione; questa può essere ottenuta sia per azione meccanica, che per ricircolazione della materia in fermentazione, oppure calibrando i tempi di carica con quelli di agitazione o insufflando parte del biogas prodotto nella massa in fermentazione.

2.3.d Forma del digestore.

Secondo autori tedeschi, la forma ad uovo è da preferire in quanto è quella che meglio di tutti favorisce l'uniformità della massa in fermentazione. Comunque in generale è bene evitare fondi con spigoli vivi in cui si possono formare sacche.

In passato sono stati costruiti digestori a fondo piatto, oggi in generale la forma cilindrica a fondo conico o sferoidale è la più proposta, anche se non mancano digestori di varie altre fogge.

3. TIPOLOGIE DI IMPIANTO

La progettazione di un impianto di digestione anaerobica deve essere preceduta da una attenta analisi dei flussi di materia disponibili e da una accurata analisi dei fabbisogni energetici della situazione specifica in cui si ipotizza l'inserimento dell'impianto stesso.

Da questa analisi deve risultare se l'impianto può essere installato per produrre energia, per produrre fertilizzante, se lo si vuole utilizzare come mezzo di depurazione o, infine se deve servire per tutti e tre gli scopi contemporaneamente come è nella maggior parte dei casi.

Questa risposta deve essere ricercata in via preliminare, in quanto il progetto del digestore e degli impianti, ad esso connessi, per lo sfruttamento del biogas, potrà risultare diverso a seconda delle finalità desiderate.

Il progetto di un impianto di digestione anaerobica dipende, oltre che da quanto sopra detto, dal tipo e dalla quantità dei rifiuti disponibili; di conseguenza, l'impianto potrà essere più o meno complesso e più o meno rispondente alle varie esigenze. Inoltre esistono diverse tipologie che è opportuno conoscere appieno per eseguire una appropriata progettazione dell'impianto, in quanto non esiste un digestore ideale da applicare a tutte le situazioni, ma ogni contesto, con tutte le sue caratteristiche tecniche, economiche, geografiche, ambientali e sociali, richiede una appropriata progettazione per una corretta valorizzazione del processo anaerobico.

La classificazione seguente prende in esame le diverse modalità di alimentazione, la struttura dei diagrammi di flusso e la presenza o meno di un supporto fisso di materiale inerte, che consente di aumentare la superficie di lavoro della flora batterica e contemporaneamente di trattenerla quanto più è possibile nel digestore; in base a tali criteri, i fermentatori possono essere classificati in sei diversi tipi,

anche se, ovviamente, ne esistono altri con caratteristiche intermedie:

- digestori discontinui
- digestori continui
- digestori « plug-flow »
- digestori « high-rate »
- digestori « a contatto »
- digestori multistadio

Un diverso modo di classificare i digestori a secondo del contesto in cui sono inseriti è il seguente:

- digestore rurale: ad alimentazione discontinua o semicontinua, caratterizzato soprattutto da semplicità costruttiva, robustezza, facilità di conduzione piuttosto che dalla resa in metano (che ovviamente non deve scendere al di sotto di una certa soglia economica);
- digestore industriale « classico »: a miscelazione completa e con alimentazione continua o semicontinua;
- digestore « avanzato » multi-stadio: in cui si opera separatamente per ogni stadio l'ottimizzazione del processo. Digestori di questo tipo sono ancora in fase di studio e necessitano di ulteriore sperimentazione.

3.1. Digestore discontinuo.

Questo è il digestore di concezione più semplice; consiste in una serie di recipienti che periodicamente vengono caricati, interrompendo il processo, con il materiale fermentabile e successivamente svuotati, quando la produzione di gas scende a valori bassi, fig. 5.

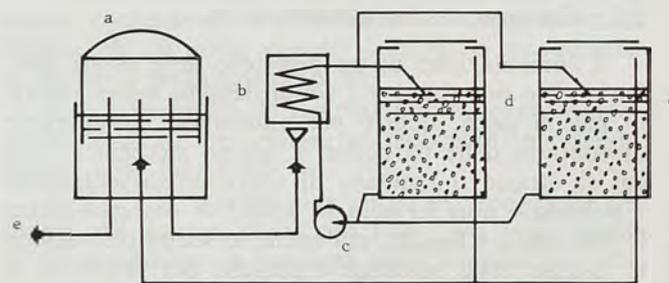


Fig. 5 - Schema di digestore discontinuo.

- a) serbatoio di accumulo; b) riscaldatore liquido di processo; c) pompa di circolazione; d) camera di fermentazione; e) biogas all'utilizzazione.

Tale digestore ha il vantaggio di richiedere poca acqua per la fermentazione e, non avendo parti in movimento, è tecnicamente molto semplice. Grosso svantaggio di tale tipo di digestore è che la produzione di gas risulta intermittente, cosa che può essere ovviata ponendo più reattori in serie.

3.2. Digestore continuo.

Il digestore continuo è il tipo più comune (anche quelli citati in seguito sono di tipo continuo). In questo paragrafo per « continuo » si intende quel

particolare digestore, che pur prevedendo una alimentazione continua, anche se giornaliera, o suddivisa in più periodi nella stessa giornata, non prevede parti in movimento fig. 6 e 7.

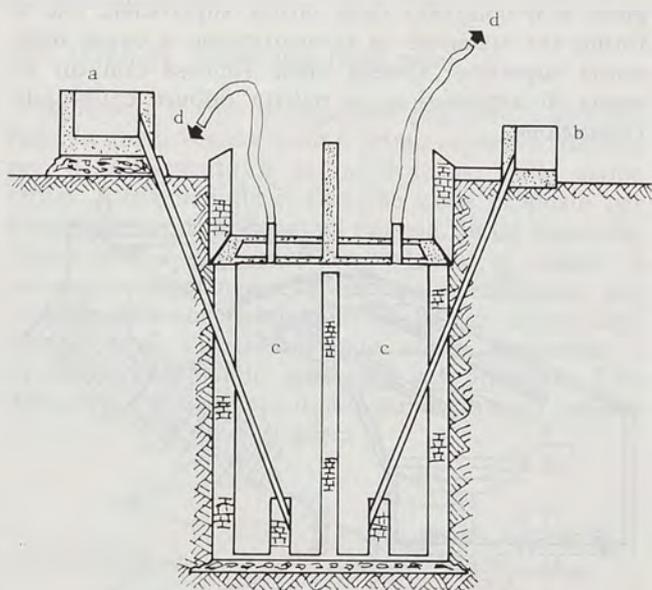


Fig. 6 - Digestore continuo di tipo indiano.

a) ingresso liquame; b) uscita liquame; c) camera di fermentazione; d) biogas.

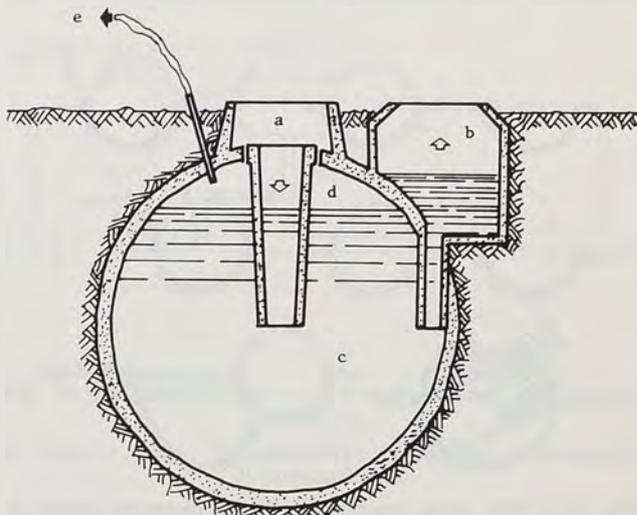
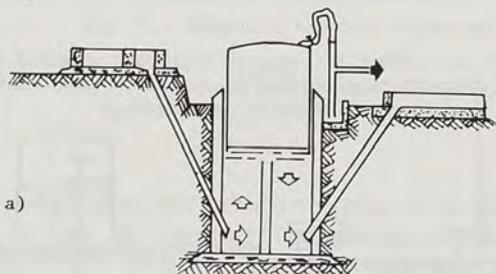
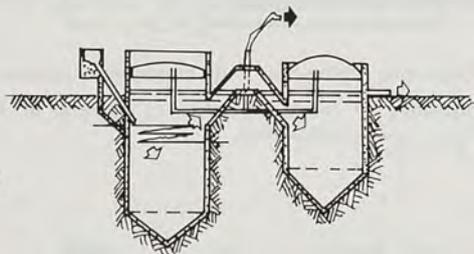


Fig. 8 - Digestore cinese di tipo rurale ($\approx 10 \text{ m}^3$).

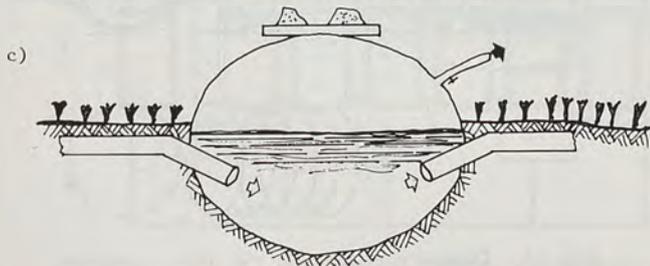
a) ingresso liquame; b) pozzo di stoccaggio per il liquame dopo fermentazione, pronto per essere sparsa sui campi; c) camera di fermentazione; d) scomparto per lo stoccaggio del biogas; e) biogas all'utilizzazione



a)



b)



c)

Fig. 7 - Esempi di digestori continui.

a) digestore da 3 m^3 ; b) digestore bistadio; c) digestore realizzato in materiale sintetico del tipo «gonfiabile».

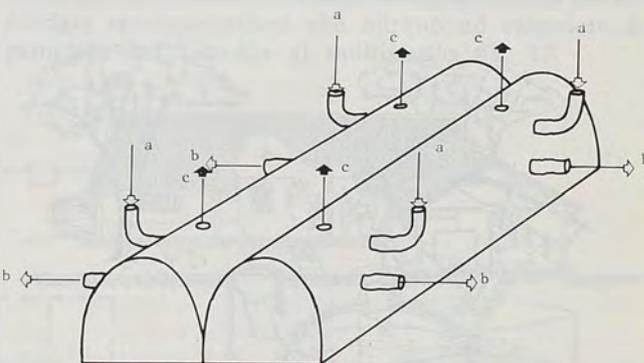


Fig. 9 - Digestore cinese realizzato con moduli da $\approx 600 \text{ m}^3$ per grosse comunità.

a) ingresso liquame; b) uscita liquame; c) biogas.

impianti installati presso scuole, caserme e città, l'alimentazione è costituita da rifiuti solidi organici e acque reflue urbane.

La taglia del digestore per il tipo rurale è di circa 10 m^3 , per gli altri si sono costruiti digestori modulari con unità da circa 600 m^3 . Nei digestori di tipo rurale, particolare enfasi viene posta all'otte-

nimento di fertilizzante, sia liquido che solido, ed il biogas che si ottiene è sufficiente per l'illuminazione e la cottura dei cibi giornalieri di una famiglia di 6-7 persone [18].

Nella fig. 10 è riportato uno schema di costruzione di un digestore cinese, che pone in risalto la semplicità della tecnologia usata, la quale, connessa

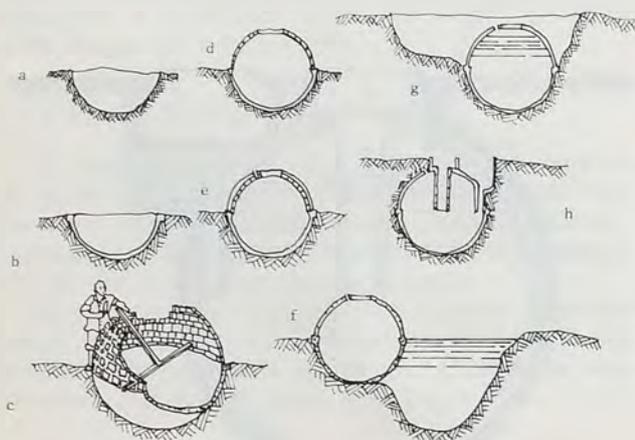


Fig. 10 - Fasi della costruzione di un digestore cinese di tipo rurale.

a) esecuzione dello scavo di supporto; b) formazione del fondo impermeabile; c) copertura con mattoni; d) copertura finita; e) impermeabilizzazione della copertura; f) esecuzione dello scavo che accoglierà il digestore e suo riempimento con acqua; g) posizionamento del digestore; h) digestore finito.

all'uso di risorse locali (materiali e personale), fa del digestore cinese un impianto tecnologicamente interessante. L'università tecnica di Berlino da alcuni anni ha allo studio tecnologie appropriate per la digestione anaerobica, a partire dagli impianti cinesi ed indiani [28].

La fig. 11, mostra l'inserimento di un digestore rurale in una azienda agricola cinese.

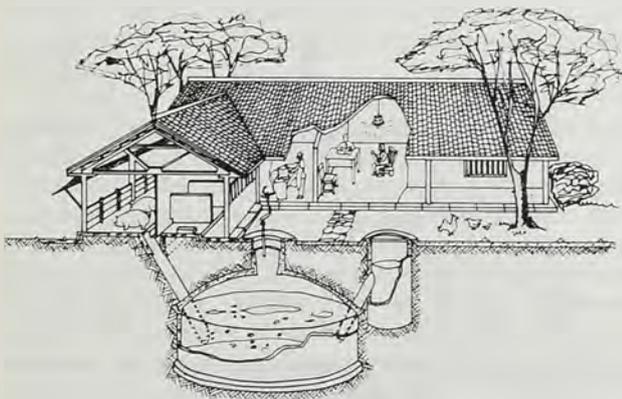


Fig. 11 - Fattoria cinese con integrato impianto di produzione biogas.

3.3. Digestore orizzontale o « plug-flow ».

Questo tipo di digestore è un particolare reattore costituito da un canale o tubo posto orizzontalmente in cui il materiale fluisce riempiendo per 3/4 la sezione del canale.

Questo tipo di digestore è stato sviluppato da Fry in Sud Africa fin dal 1950 fig. 12 [29], anche se non mancano altre elaborazioni della concezione originale. In tale tipo di digestore il problema maggiore è il controllo della crosta superficiale che si forma sul materiale in fermentazione a causa della estesa superficie. Questa viene rimossa con un sistema di asportazione a paletta oppure calibrando l'agitazione.

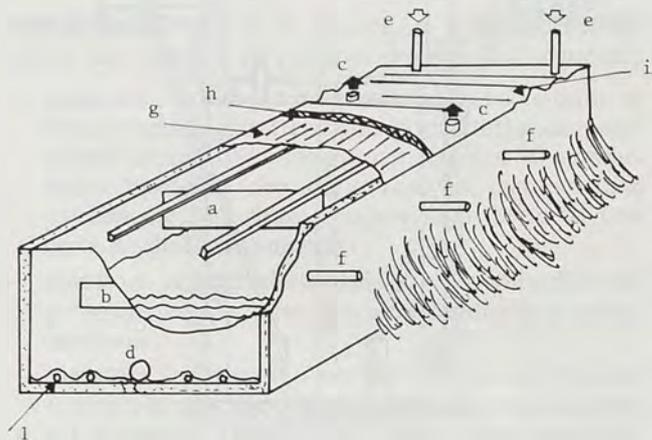


Fig. 12 - Digestore orizzontale tipo Fry.

a) rompi crosta; b) scarico crosta; c) biogas all'utilizzazione; d) tubo scarico liquame; e) ingresso liquame; f) prelievo campioni; g) copertura tenuta; h) isolante; i) lamiera ondulata l) tubi di riscaldamento.

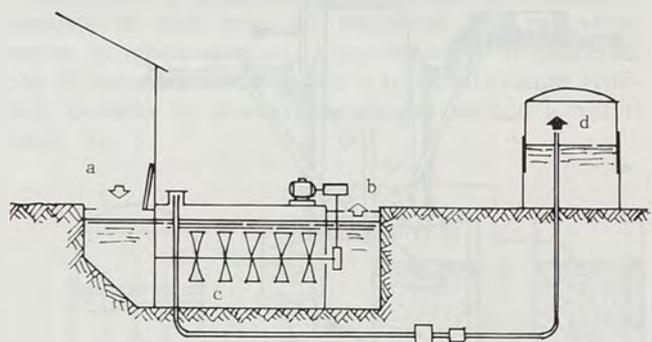


Fig. 13 - Digestore « plug-flow » di concezione tedesca.

a) ingresso liquame; b) uscita liquame; c) camera di fermentazione.

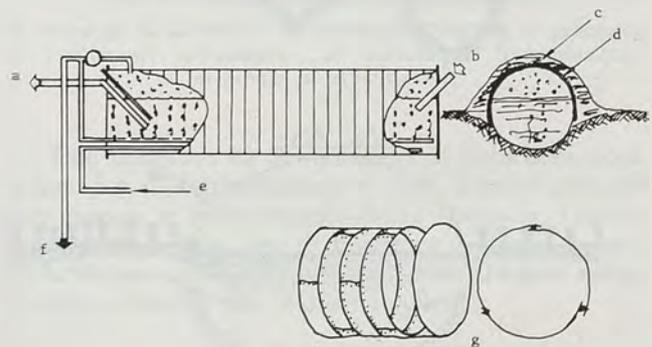


Fig. 14 - Digestore orizzontale « a tubo » interrato.

a) liquame in uscita; b) liquame in ingresso; c) materiale isolante grossolano; d) isolante; e) liquido caldo per il controllo della temperatura; f) biogas all'utilizzazione; g) particolarità costruttive.

In fig. 13 è riportato un digestore « plug-flow » di concezione tedesca. In fig. 14 è schematizzato un impianto di digestione tipo orizzontale, realizzato su scala pilota nella regione di Rice Lake [30].

3.4. Digestore monostadio (high rate).

Questo è il tipo di digestore più noto e più diffuso, in quanto esso è stato il primo ad essere studiato per il trattamento e la purificazione delle acque reflue. Attualmente è il tipo che viene proposto per il trattamento delle deiezioni animali. In tal digestore, l'agitazione è di estrema importanza, in quanto è necessario raggiungere la perfetta miscelazione per ottenere un buon funzionamento fig. 15. In impianti di tale tipo, l'agitazione può essere meccanica o ottenuta riinsufflando parte del gas prodotto. Tale digestore è certamente il più standardizzato sia per

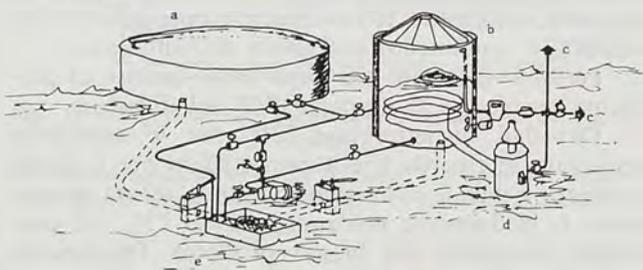


Fig. 15 - Digestore verticale « high rate ».

a) vasca di accumulo liquame; b) reattore di fermentazione anaerobica; c) biogas all'utilizzazione; d) caldaia per il riscaldamento; e) vasca di miscelazione.

i componenti che per il controllo del processo. Esso è il tipo di digestore che garantisce meglio certe prestazioni anche se, per contro, ha una complessità tecnologica che comporta un costo elevato e quindi non remunerativo se non per il trattamento di notevoli quantità di liquami.

3.5. Digestori a più stadi.

Il più semplice digestore a più stadi è quello che prevede una separazione tra il liquido e il solido affluente e alla ricircolazione nel reattore dei fanghi. Ciò permette di aumentare il carico organico di lavoro del digestore.

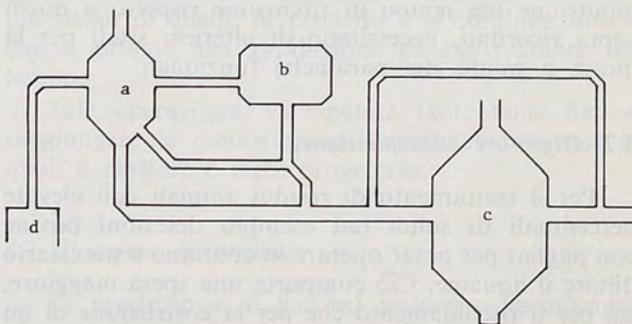


Fig. 16 - Schema di digestore con le fasi acida e metanogena separate.

a) reattore acido; b) separatore; c) reattore metanogeno; d) alimentazione.

Altro tipo di digestore a due stadi è quello che separa la fase acidogenica da quella metanogenica e quindi permette di ottimizzare i due processi separatamente ed ottenere un rendimento globale maggiore fig. 16.

Il vantaggio che si ottiene con questo metodo è la riduzione del volume del reattore e del calore richiesto per il riscaldamento, quindi una riduzione del capitale investito e del costo di gestione, anche se nel contempo, si richiede una maggiore complessità strumentale per il controllo delle due reazioni.

Per il perseguimento della diminuzione del volume del digestore e dei costi energetici, sono da ricordare sperimentazioni che mirano ad estendere il principio del bistadio al multistadio fig. 17.

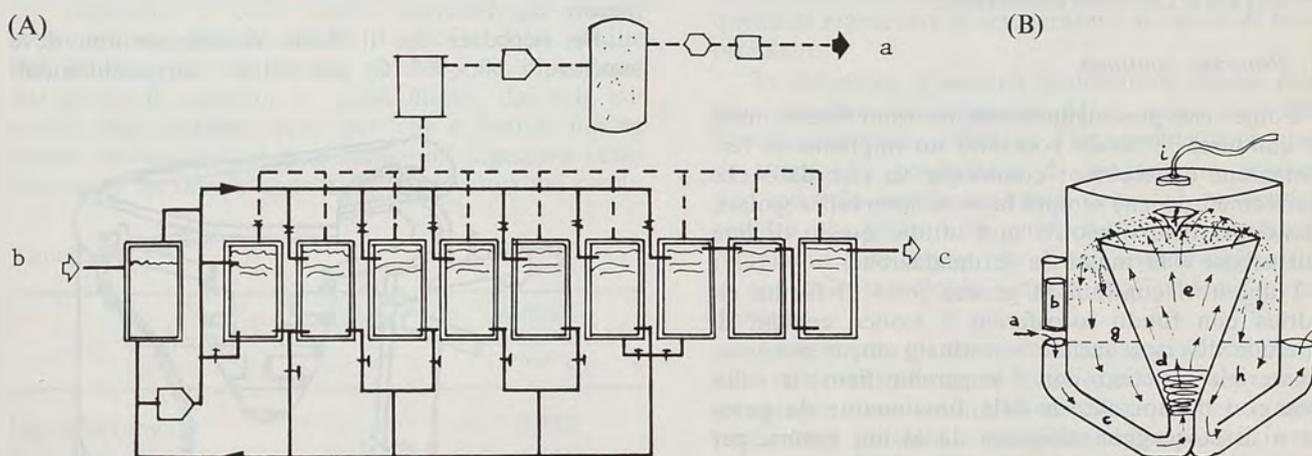


Fig. 17 - Schema di digestori multistadio (A) e ad espansione (B).

(A) a) biogas all'utilizzazione; b) ingresso liquame; c) uscita liquame.

(B) a) liquame; b) pompa idraulica; c) tubo di adduzione; d) spirale di riscaldamento; e) canale a sezione variabile; f) diffusore; g) livello del liquido; h) zona di sedimentazione; i) uscita del biogas.

3.6. Digestori a contatto.

Rientrano in questa categoria tutti quei reattori che hanno un supporto fisso di materiale inerte che permette alla flora batterica di estendere la sua superficie di contatto e di rimanere imprigionata nel reattore.

Tali reattori, anche se realizzano una forte diminuzione del tempo di ritenzione rispetto a quelli sopra ricordati, necessitano di ulteriori studi per la messa a punto dei parametri funzionali.

3.7. Digestore ad espansione.

Per il trattamento di residui animali con elevate percentuali di solidi (ad esempio deiezioni bovine con paglia) per poter operare in continuo è necessario diluire il liquame. Ciò comporta una spesa maggiore, sia per il riscaldamento che per la costruzione di un reattore di maggiore volume. Inoltre la diluizione facilita la flocculazione delle parti cellulose, con conseguente formazione di schiume superficiali, le quali, per assicurare un buon funzionamento, devono essere rimosse.

Il digestore ad espansione elimina questi problemi, in quanto tratta il liquame così come è, con percentuali di solidi fino al 20%. Come si vede in fig. 17 esso è suddiviso in due zone. Quella più interna è costituita da un canale a sezione variabile in cui il liquame viene fatto fluire da una pompa idraulica a basso numero di giri. Il materiale è riscaldato all'ingresso del canale dove avviene l'idrolisi con formazione di acqua. Il tempo di ritenzione è di circa dieci giorni. Il sistema presenta il vantaggio di permettere alle parti più pesanti di stazionare all'interno del digestore per un tempo maggiore. Nella parte superiore vi è un diffusore che convoglia la massa in fermentazione nella seconda zona più esterna, dove si completa il processo. L'uscita del liquame fermentato è regolata da un opportuno stramazzo.

4. CRITERI DI CONDUZIONE

4.1. Processo continuo.

Come visto precedentemente, esistono diversi modi per condurre in modo continuo un impianto di fermentazione anaerobico; comunque va ricordato che il caricamento viene sempre fatto ad intervalli regolari. Questo per diversi motivi non ultimo quello di non « disturbare » la massa in fermentazione.

I digestori continui in genere sono di forma cilindrica con fondo torosferico o tronco conico, di materiale diverso: acciaio rivestito o no, o cemento, o materiale sintetico, con il coperchio fisso; la soluzione con il coperchio mobile, funzionante da gasometro di stoccaggio proposto da alcuni autori, per motivi di sicurezza viene sconsigliato.

L'agitazione viene fatta dall'alto con un agitatore, però se vi è pericolo di formazione di croste che tenderebbero a bloccare lo sviluppo di gas, è da prevedere un rompi-croste realizzato, ad es. con

un'agitazione orizzontale, oppure uno stramazzo per controllare il livello della crosta.

L'estrazione del liquido può essere fatta o dal basso con una pompa, o dall'alto per stramazzo. Ovviamente il reattore va strumentato con valvole di sicurezza e indicatori di pressione e temperatura.

A monte del reattore va situata una vasca di omogeneizzazione con trituratore per i solidi, in cui si fanno le eventuali correzioni per portare i parametri ai valori ottimali.

Per i fattori influenti il processo si rimanda ai capitoli precedenti; qui si prenderà in considerazione solo il problema termico. Come detto, la temperatura ottimale di funzionamento è intorno ai 30 °C, quindi bisogna sopperire alle perdite verso l'ambiente esterno e riscaldare l'acqua di alimentazione alla temperatura di reazione. Da notare che il calore da fornire varia nel corso delle 24 ore e durante l'anno.

Il parametro da tenere in maggiore considerazione in fase di progettazione, è l'isolamento, questo perché il suo costo e la sua efficacia, determinano fortemente il rendimento energetico dell'impianto.

Pertanto il fattore più importante rispetto al problema termico, è il rapporto S/V del digestore.

Dai dati di letteratura [21], per le esperienze realizzate, si ricorda che il calore speso per il riscaldamento e per il mantenimento della massa in reazione è, mediamente nell'anno, pari al 25% del contenuto energetico del biogas prodotto. Ovviamente su questo dato intervengono fortemente una molteplicità di fattori quali: la forma del digestore, l'ubicazione cioè se è interrato o meno, e nel qual caso la sua esposizione, l'isolamento termico, il materiale e il suo costo.

Da segnalare un sistema di isolamento, realizzato in alcuni casi [8], che merita senz'altro un ulteriore approfondimento, cioè quello di utilizzare un materiale suscettibile di subire una fermentazione aerobica e sfruttare il calore che si sviluppa da questa reazione.

Il calore può essere fornito alla massa in fermentazione in diversi modi: o all'esterno scaldando l'alimentazione in uno scambiatore a parte fig. 18; o all'interno con resistenze elettriche o con uno scambiatore fig. 19.

Da ricordare che il fluido riscaldante non deve superare i 60 ÷ 65 °C, per evitare surriscaldamenti

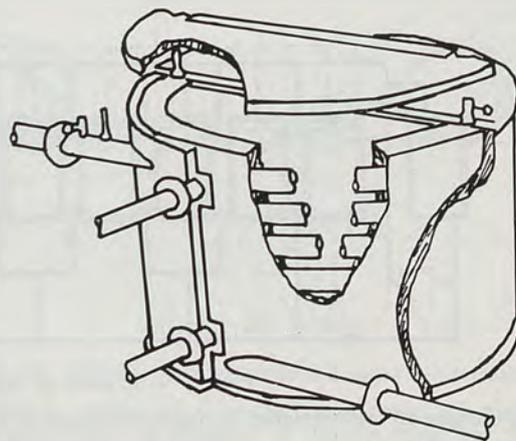


Fig. 18 - Scambiatore di calore esterno.

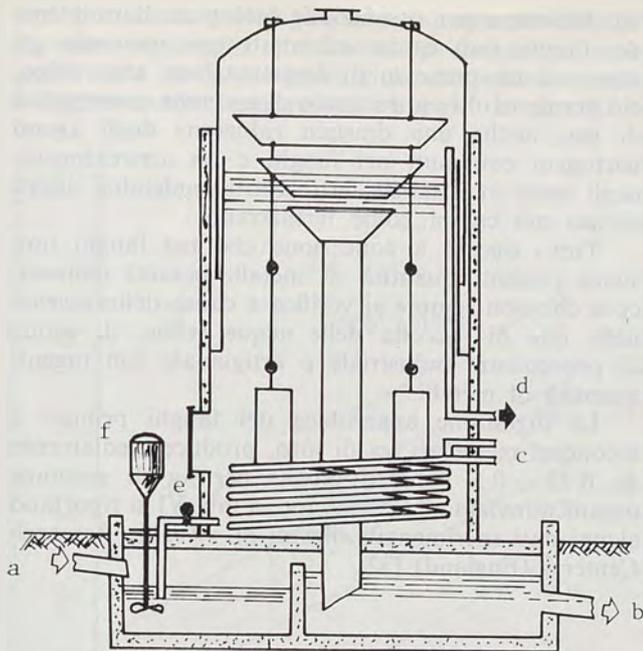


Fig. 19 - Digestore con riscaldamento interno di concezione tedesca.

a) ingresso liquame; b) uscita liquame; c) circuito di riscaldamento; d) biogas all'utilizzazione; e) pompa; f) agitatore.

locali che potrebbero provocare parziale sterilizzazione; inoltre data l'alta capacità di generare incrostazioni da parte del liquame, è bene prevedere uno scambiatore che sia facilmente pulibile, per evitare di diminuire l'efficienza dello scambio termico.

Per eseguire il calcolo del fabbisogno termico è necessaria la conoscenza di alcuni parametri quali il calore specifico dell'alimentazione, che è dell'ordine di quello dell'acqua e i coefficienti di scambio termico all'interno e all'esterno del digestore.

All'interno del reattore si ha scambio di calore tra la massa in fermentazione e il gas sovrastante, e da questo al coperchio del digestore; inoltre si ha scambio termico tra il liquame e le pareti verticali e il fondo del reattore; all'esterno, il calore si disperde dal coperchio e dalle pareti laterali verso l'aria; estremamente difficile risulta il calcolo delle perdite dal fondo verso il terreno perché esse dipendono dal grado di umidità di quest'ultimo, dai sali minerali che contiene, ecc., per cui è buona norma isolare molto bene il basamento del digestore verso il terreno. In tab. V sono riportati i valori dei coeffi-

Tabella V

| Interfaccia | Coefficiente di scambio termico (W/m ² °C) |
|--------------------------|---|
| liquame/biogas | 9,433 |
| biogas/coperchio | 9,433 |
| coperchio/aria | 22,727 |
| liquame/parete verticale | molto elevato |
| parete verticale/aria | 14,286 |

cienti di scambio termico [8] validi in condizioni di perfetta omogeneità della massa in fermentazione.

Una volta progettato il digestore e dopo che questo è stato costruito ed installato, rimane la fase più delicata, l'avviamento che deve essere fatto con estrema cura [31]: si riempie il volume utile del digestore con fanghi primari di fermentazione aerobica, quindi si alimenta il digestore con un carico molto più basso di quello di progetto e si continua fino a che si ottiene una produzione di gas regolare nel tempo.

Tale operazione, va ripetuta tante volte fino a raggiungere le condizioni di funzionamento per le quali il reattore è stato progettato.

4.2. Processo discontinuo.

La produzione di gas nel processo discontinuo, al contrario di ciò che avviene in quello continuo, non può essere costante nel tempo; essa incomincia appena viene caricato il reattore e raggiunge un massimo intorno a 15 ÷ 20 giorni dall'avvio e poi lentamente diminuisce fin verso i 90 giorni.

Tale processo è applicato in rari casi, e risulta conveniente quando si hanno a disposizione ingenti quantità di materiale solido da trattare. Per questo tipo di processo Isman [8] ha messo a punto e brevettato un sistema (1950) di pre-fermentazione aerobica esotermica, che presenta alcuni vantaggi: degrada le molecole poco polimerizzate che potrebbero acidificare molto rapidamente la massa in fermentazione anaerobica e quindi bloccare il processo, inoltre, produce in parte sostanze che saranno utili nella fermentazione e distrugge gli agenti patogeni.

La durata della pre-fermentazione deve essere stabilita opportunamente affinché essa non risulti né troppo breve (presenza di acidi) né troppo lunga (abbattimento di molta sostanza organica suscettibile di fermentare). La pre-fermentazione presenta però un grosso inconveniente dovuto alla perdita di N che deve essere reintrodotta.

A fermentazione avviata, nel caso del processo discontinuo, vi sono poche operazioni da fare se non quella di mantenere la temperatura al valore di lavoro prefissato.

In definitiva, il sistema discontinuo, risulta molto più semplice da condurre ed è meno complesso tecnologicamente, anche se l'inconveniente è quello di avere una produzione di biogas non costante; per renderla continua, come detto, si possono installare più reattori in serie; tuttavia, il costo dell'impianto e della gestione di tali sistemi hanno fatto sì che tale tecnologia venisse praticamente abbandonata.

Attualmente gli sforzi dei ricercatori sono orientati alla comprensione e al miglioramento dei sistemi tecnologici funzionanti in discontinuo per ottenere rendimenti più alti e semplificare l'impianto in maniera tale da diminuire fortemente i costi.

Ovviamente, tale processo riveste estrema importanza per le prospettive che apre per lo smaltimento dei rifiuti solidi organici, in special modo in agricoltura.

5. ALIMENTAZIONE

In questo capitolo, si prenderanno in esame le caratteristiche dei rifiuti che possono costituire la materia da sottoporre a fermentazione anaerobica. Diversi sono i rifiuti suscettibili di subire questo processo: in pratica, tutte le sostanze organiche che offrono abbastanza « alimento » nutritivo per le flore batteriche.

Alcuni rifiuti, quali ad es. quelli zootecnici, sono stati oggetti di diverse indagini, mentre per altri sono necessari ulteriori studi per una migliore comprensione del loro comportamento.

5.1. Digestione anaerobica nel trattamento delle acque reflue urbane.

Nella purificazione delle acque reflue urbane si generano fanghi sia primari che secondari: per sedi-

mentazione e per ossidazione biologica. Il problema dei fanghi può essere affrontato sottoponendo gli stessi ad un processo di fermentazione anaerobico, ciò permette oltre al recupero di un certo quantitativo di gas, anche una drastica riduzione degli agenti patogeni contenuti nei fanghi e un arricchimento degli stessi in sostanze fertilizzanti rendendoli adatti all'uso nei campi come fertilizzanti.

Tutto questo a condizione che nei fanghi non siano presenti quantità di metalli pesanti dannosi, cosa che non sempre si verifica a causa dello scarico nelle rete di raccolta delle acque reflue, di acque di provenienze industriale o artigianale con ingenti quantità di metalli.

La digestione anaerobica dei fanghi primari e secondari mescolati tra di loro, produce mediamente da $0,33 \div 0,5 \text{ Nm}^3$ di biogas per kg di sostanza organica inviata alla digestione in tab. VI si riportano alcuni dati sperimentali rilevati al « Water Research Center » (England) [32].

Tabella VI

| Tempo di ritenzione (giorni) | % di solido nel fango | Conc. in acidi volatili (mg/lt) | pH | Acidi volatili distrutti % | Produzione di biogas (Nm^3/kg di A.V. distrutti) |
|------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----|----------------------------|---|
| 50 | 3 | 12 | 7,1 | 51,9 | 1,22 |
| | 6 | 31 | 7,2 | 46,6 | 1,33 |
| | 9 | 600 | 7,4 | 47,3 | 1,28 |
| 25 | 3 | 3 | 7,1 | 40,9 | 1,32 |
| | 6 | 3 | 7,2 | 46,3 | 1,13 |
| | 9 | 8 | 7,3 | 44,9 | 1,05 |
| 20 | 3 | 8 | 7,0 | 43,4 | 1,44 |
| | 6 | 200 | 7,2 | 46,1 | 1,12 |
| | 9 | 210 | 7,3 | 44,6 | 1,20 |
| 16 | 3 | 3 | 6,9 | 46,6 | 1,24 |
| | 6 | 14 | 7,0 | 41,1 | 1,28 |
| | 9 | 70 | 7,2 | 39,0 | 1,39 |
| 13 | 3 | 3 | 6,9 | 51,7 | 1,15 |
| | 6 | 14 | 7,1 | 48,0 | 1,16 |
| | 9 | 22 | 7,2 | 45,2 | 1,46 |
| 11 | 3 | 32 | 7,1 | 41,7 | 1,14 |
| | 6 | 14 | 7,1 | 42,1 | 1,24 |
| | 9 | 54 | 7,2 | 32,9 | 1,46 |

Il problema tecnologico che si incontra nella digestione dei fanghi provenienti da acque reflue è quello della spesa energetica richiesta per mantenere il digestore alla temperatura ottimale. In fig. 20 è

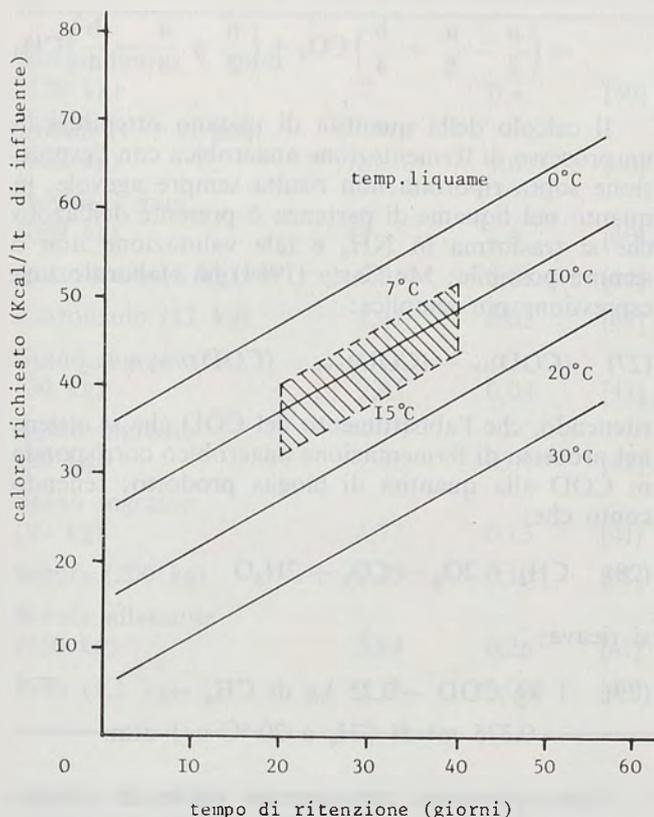


Fig. 20 - Calore richiesto per la fermentazione di fanghi provenienti dalla depurazione di acque reflue. Per il calcolo si sono fatte le seguenti assunzioni: temp. di lavoro: 35 °C; abbassamento della temp. del reattore per scambio con l'ambiente: 0,6 °C/giorno. La parte tratteggiata indica il campo ottimale.

riportato un grafico [32] che individua il campo di temperatura ottimale per il trattamento dei fanghi primari e secondari.

5.2. Digestione anaerobica di rifiuti solidi urbani.

L'idea di mescolare i rifiuti solidi urbani alle acque reflue e inviare il tutto alla fermentazione anaerobica risale almeno ad una sessantina di anni fa. [33], [34]; in seguito, data la disponibilità a basso costo di altri combustibili; tale idea fu abbandonata.

È da ricordare che l'impianto SATTI della città di Torino prevedeva una produzione di 5.500 m³/giorno di metano, equivalenti a circa 45 Tep/giorno.

Attualmente l'invio alla fermentazione anaerobica di rifiuti solidi urbani implica inserire il processo di digestione anaerobica in un impianto più complesso che deve prevedere la separazione delle parti metalliche contenute nei rifiuti solidi. La produzione di biogas, con un tempo di ritenzione di circa 8 giorni ed con una concentrazione di solidi totali del 10%, è compresa tra 0,2 e 0,3 Nm³/kg di sostanza organica, e aumenta all'aumentare della temperatura, come riportato in fig. 4.

In fig. 21 si riporta uno schema di trattamento di rifiuti solidi urbani che prevede il trattamento anaerobico della parte organica.

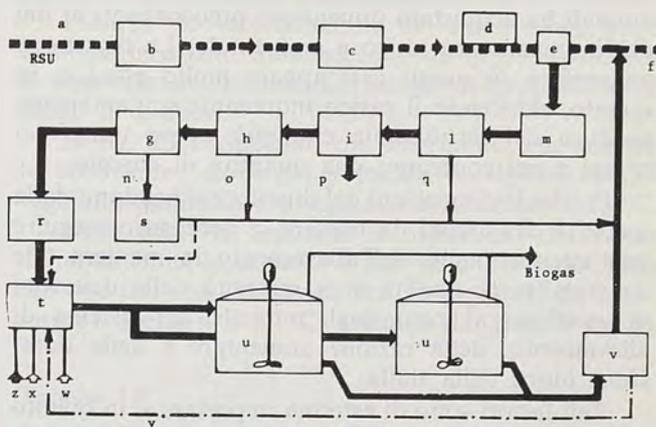


Fig. 21 - Diagramma di flusso per il trattamento dei rifiuti solidi urbani (RSU) con trattamento anaerobico della parte organica.

a) raccolta solidi urbani; b) punto di ricevimento; c) triturazione primaria; d) eliminazione grossolana dei materiali ferrosi; e) punto di smistamento; f) materiale avviato al terreno; g) separazione con ciclone; h) classificatore ad aria; i) triturazione secondaria; l) vaglio rotativo; m) stoccaggio; n) materiale organico non idoneo; o) materiale pesante; p) H₂O vap. all'atmosfera; q) materiale fine; r) materiale costituente l'alimentazione per il digestore; s) cernita materiale di scarto; t) preparazione dell'alimentazione; u) digestore; v) filtro a vuoto; z) fanghi primari dalle acque reflue; x) vapore; w) correzione: NH₄Cl; KH₂PO₄; Co(OH)₂

5.3. Digestione anaerobica di rifiuti industriali.

Le industrie conserviere e quelle di trasformazione dei prodotti agricoli o quelle vinicole, hanno scarti di lavorazione suscettibili di produrre biogas attraverso un processo di fermentazione anaerobica.

Questo processo, infatti, va diffondendosi abbastanza nel settore, anche perché la materia prima non presenta grosse difficoltà per la fermentazione, i tempi di ritenzione sono abbastanza bassi e i rendimenti buoni [35].

Nel trattamento degli scarichi industriali, la tecnologia più applicata è quella della digestione per contatto che presenta un rendimento in biogas tra 0,7 e 0,8 Nm³/kg di BOD inviato al digestore.

In fig. 22 è riportato lo schema di funzionamento di un digestore a contatto usato nell'industria.

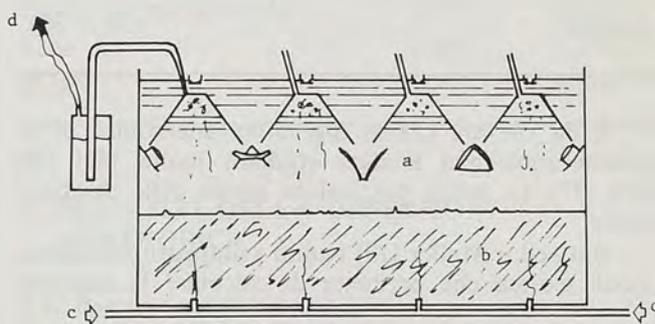


Fig. 22 - Schema di funzionamento di un digestore « a contatto ». a) liquido in fermentazione con materiale solido in sospensione; b) massa solida batterica supportata da inerte; c) biogas di agitazione; d) all'utilizzazione.

5.4. Digestione anaerobica di liquami zootecnici.

Con il crescere delle dimensioni degli allevamenti zootecnici, il problema dello smaltimento dei rifiuti animali ha acquistato dimensioni preoccupanti ai fini dell'inquinamento idrico e ambientale. La digestione anaerobica in questi casi appare molto efficace, in quanto, riducendo il carico inquinante sull'ambiente, produce del fertilizzante che può essere usato nei campi e nel contempo una quantità di energia.

Poiché le dimensioni del digestore dipendono dalla quantità di liquami da trattare, è necessario eseguire una attenta analisi dell'allevamento in maniera tale da stabilire la qualità e la quantità delle deiezioni in relazione al peso degli animali, del sistema di allevamento, della razione alimentare e della dotazione idrica della stalla.

Tali fattori sono di estrema importanza, in quanto determinano le caratteristiche chimico-fisiche del liquame e quindi gli interventi da operare su di esso prima di avviarlo alla digestione anaerobica.

I parametri da misurare; prima di passare alla progettazione di un impianto per la fermentazione anaerobica di liquami zootecnici, sono i seguenti: pH; concentrazione in solidi totali, di questi la % di sostanza volatile organica (*); la concentrazione degli ioni inibitori del processo, il rapporto C/N; la concentrazione in azoto, fosforo, il carico inquinante BOD₅, COD.

I campi di variabilità di tali parametri sono stati riportati nel capitolo II; qui si vuol solo riportare il valore del tempo di ritenzione (Tr) per il trattamento dei liquami zootecnici, in quanto esso è determinante per la scelta del volume del digestore, in un impianto continuo:

$$(25) \quad V = Q \cdot Tr$$

In tab. VII sono riportati i campi di variazione di Tr.

Tabella VII

| Tipo di deiezione | Tr (giorni) |
|-------------------|-------------|
| Suina | (10 ÷ 15) |
| Bovina | (15 ÷ 30) |
| Avicola | (20 ÷ 30) |

È da rilevare che la digestione anaerobica di liquami zootecnici è stata studiata molto [51] [20] [36] [37]; in modo particolare quelle delle deiezioni suine.

Buswell e Muller [19] hanno sviluppato un'espressione teorica che permette di calcolare la quantità

(*) Per sostanza volatile (S.V.) si intende la quantità di solidi organici presente nei solidi totali. Essa si misura trattando il solido, preessiccato a 105 °C, per alcune ore in forno a 550 °C; l'abbassamento in peso costituisce la sostanza volatile.

di metano prodotta a partire dalla composizione del liquame di partenza:

$$(26) \quad C_nH_aO_b + \left(n - \frac{a}{4} - \frac{b}{4}\right) H_2O = \\ = \left(\frac{n}{2} - \frac{a}{8} + \frac{b}{4}\right) CO_2 + \left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4}\right) CH_4$$

Il calcolo della quantità di metano ottenibile in un processo di fermentazione anaerobica con l'espressione sopra riportata non risulta sempre agevole, in quanto nel liquame di partenza è presente dell'azoto che si trasforma in NH₃ e tale valutazione non è sempre possibile; Mc Carty (1964) ha elaborato una espressione più semplice:

$$(27) \quad (COD)_{in} - (COD)_{out} = (COD)_{C_{H_4} + C_{O_2}}$$

ritenendo, che l'abbattimento del COD che si ottiene nel processo di fermentazione anaerobica corrisponda in COD alla quantità di biogas prodotto; tenendo conto che:



si ricava:

$$(29) \quad 1 \text{ kg COD} \rightarrow 0,25 \text{ kg di } CH_4 \rightarrow \\ \rightarrow 0,375 \text{ m}^3 \text{ di } CH_4 \text{ a } 20^\circ C \text{ e } 1 \text{ atm.}$$

Tale approccio, pur essendo valido in quanto permette di calcolare, il massimo della produzione ottenibile, presenta alcuni limiti: non tiene conto della quantità di sostanza organica che viene consumata per accrescimento batterico e inoltre, non tiene conto delle condizioni in cui il processo si evolve.

Il calcolo della produzione di metano, da un dato liquame per certe condizioni di processo, è un problema ingegneristico che non ha ancora trovato una valida soluzione. Diversi autori [35] [38] [39], hanno affrontato il problema sotto il profilo teorico ed hanno proposto diversi modelli matematici; in essi vengono proposti schemi per la determinazione della produzione di metano in funzione dei parametri chimico-fisici e delle condizioni di processo.

Tali modelli richiedono un'ampia sperimentazione necessaria per la comprensione dei limiti, e dell'affidabilità degli stessi, quindi allo stato attuale, la valutazione su impianti pilota è l'unico mezzo per la determinazione della produttività in biogas da un dato liquame.

Nella tab. VIII sono riportati valori del rendimento in biogas ottenuti a 30 °C e con un Tr di 15 giorni.

5.5. Digestione anaerobica di residui agricoli.

La digestione anaerobica di residui agricoli, quali ad esempio le paglie o altro è una possibile soluzione per lo smaltimento di tali residui. La fermentazione di tali vegetali, è un modo molto economico per sfruttare potenzialità energetiche che se non usate andrebbero disperse; ovviamente ciò non vale,

Tabella VIII

| Animale | .kg (feci+urine) capo giorno | m ³ biogas capo giorno | Rif. |
|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------|
| Bovini fino a 1 anno (120 kg) | 7 | 0,4 | [40] |
| Bovini (1 ÷ 2) anni (320 kg) | 18 | 1,0 | [40] |
| Bovini 2 anni (600 kg) | 49 | 1,5 | [40] |
| Lattonzolo (5 kg) | 0,65 | 0,01 | [41] |
| Lattonzolo (12 kg) | 1,27 | 0,02 | [41] |
| Suino ingrasso (30 kg) | 2,43 | 0,04 | [41] |
| Suino ingrasso (50 kg) | 2,82 | 0,07 | [41] |
| Suino ingrasso (80 kg) | 4,77 | 0,13 | [41] |
| Scrofa (200 kg) | 9,53 | 0,10 | [41] |
| Scrofa allattante (250 kg) | 5,84 | 0,26 | [41] |
| Polli (1,5 kg) | 0,15 | 0,009 | [40] |

quando esiste già un recupero, come ad esempio la paglia di grano che viene usata come lettiera per gli allevamenti o nella industria della carta.

La fermentazione anaerobica di residui agricoli risulta economica in quanto la digestione viene con-

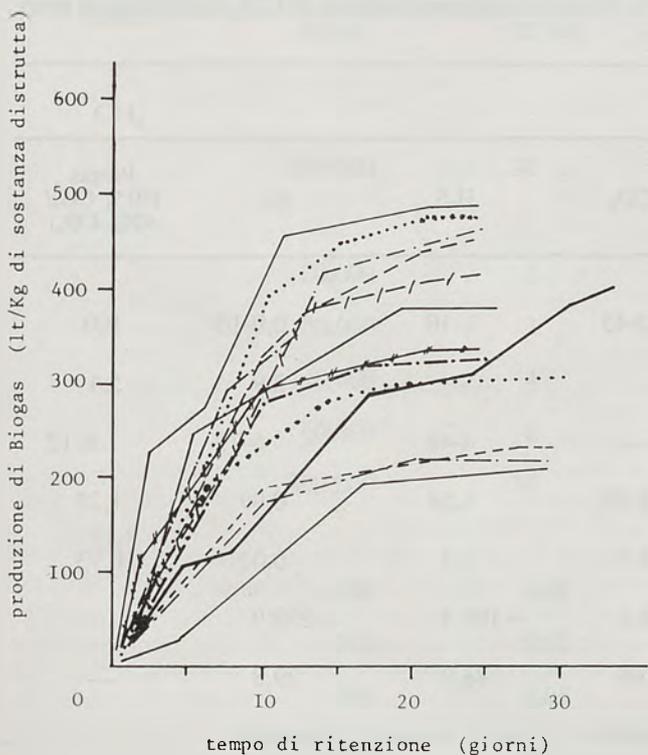


Fig. 23 - Produzione di biogas da residui vegetali.

dotta insieme ai liquami animali in quanto nei residui vegetali, si hanno delle forti carenze di azoto ed inoltre vi è della lignina, che è difficilmente attaccabile in un processo anaerobico.

Inoltre tale valorizzazione dei residui vegetali è ottimale in quanto non necessita di grosse spese per il trasporto del residuo dal luogo di produzione al luogo di utilizzo.

In fig. 23 è riportato un diagramma che mostra la produzione di biogas a partire da diversi residui vegetali ottenuti in un impianto discontinuo a 35 °C.

Nella tab. IX seguente si riportano dei valori di rendimento in metano a partire da diversi rifiuti; tali risultati sono stati ottenuti su digestori da laboratorio operanti a 30 °C ottenuti da Imhoff et. al.

Tabella IX

| Natura dei rifiuti | Rendimento in CH ₄ | |
|-----------------------------|--|--|
| | Nm ³ /kg di materia secca | Nm ³ /kg di materia secca in sospensione |
| Liquami urbani | 0,33 | 0,46 |
| Schiume di effluenti Urbani | 0,40 | 0,44 |
| Rifiuti di cucina | 0,38 | 0,39 |
| Rifiuti di carta | 0,145 | 0,165 |
| Rifiuti urbani | 0,185 | 0,197 |
| Rifiuti di mattatoi: | | |
| — sterco | 0,35 | 0,395 |
| — intestini | 0,04 | 0,04 |
| — sangue | 0,082 | 0,082 |
| Rifiuti ind. latte e form. | 0,735 | 0,772 |
| Rifiuti ind. lievito | 0,416 | 0,678 |
| Rifiuti ind. cartarie | 0,15 | — |
| Letame con paglia di stalla | 0,220 | 0,263 |
| Escrementi di equini | 0,30 | 0,328 |
| Escrementi di bovini | 0,192 | 0,253 |
| Escrementi di suini | 0,211 | 0,339 |
| Paglia di grano | 0,273 | 0,278 |
| Scarti di patate | 0,397 | 0,459 |
| Scarti del mais | 0,406 | 0,433 |
| Foglie di barbabietola | 0,391 | 0,428 |
| Erbe | 0,420 | 0,473 |
| Rose | 0,229 | 0,249 |

6. PRODOTTI DELLA DIGESTIONE ANAEROBICA

6.1. Biogas: caratteristiche.

Come detto in precedenza, il biogas è un gas che, come l'aria, è formato da un certo numero di altri gas in proporzioni variabili in funzione della materia da cui viene ottenuto e delle condizioni del processo.

Se l'impianto di produzione non ha un sistema di regolazione della temperatura per annullare le variazioni di questa nelle 24 ore, la quantità di biogas prodotto varia seguendo le oscillazioni della temperatura esterna.

In tab. X è riportata la composizione media del biogas ottenuto nel corso di una fermentazione anaerobica ben condotta.

Tabella X

| Gas | Simbolo | % |
|--------------------|-----------------------------------|---------------------|
| Metano | CH ₄ | 50 ÷ 70 (fino a 80) |
| Anidride carbonica | CO ₂ | 35 ÷ 40 (fino a 15) |
| Idrogeno | H ₂ | 1 ÷ 3 (fino a 10) |
| Ossigeno | O ₂ | 0,1 ÷ 1 |
| Ossido di carbonio | CO | 0 ÷ 0,1 |
| Azoto | N ₂ | 0,5 ÷ 3 (fino a 10) |
| Gas diversi | H ₂ S, NH ₃ | 1 ÷ 5 (fino a 10) |
| Vapore Acqueo | H ₂ O | variabile |

Dall'osservazione dei dati riportati, si può dire che il biogas è combustibile solo per circa i 2/3.

Tabella XI

| Proprietà | CH ₄ | CO ₂ | H ₂ S | H ₂ | Biogas (60% CH ₄ / 40% CO ₂) |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------|---|
| % in volume | 54-80 | 20-45 | 1-10 | 0,0-10 | 100 |
| Potere calorifico (kcal/litro) | 9,0 | — | — | 2,9 | 5,4 |
| Limiti di esplosività (% in aria) | 5-15 | — | 4-46 | 6-71 | 6-12 |
| Densità (g/lit) in c.n. | 0,72 | 1,98 | 1,54 | 0,99 | 1,22 |
| Peso specifico relativo all'aria | 0,55 | 1,5 | 1,2 | 0,07 | 0,93 |
| Temperatura critica (°C) | -82,5 | +31,1 | +100,4 | -239,9 | — |
| Pressione critica (atm) | 45,8 | 73,0 | 88,9 | 19,8 | — |
| Odore | nessuno | nessuno | uova marce | nessuna | — |

Si riportano qui di seguito alcune proprietà fisiche del gas metano che sono di valido aiuto per la comprensione di quelle del biogas:

| | |
|----------------------------------|----------------------------|
| Peso molecolare | 16,04 |
| Densità riferita all'aria a 0 °C | 55% |
| Punto di ebollizione | - 161,5 °C |
| Potere calorifico inferiore | 8.570 kcal/Nm ³ |

Il metano è un gas più leggero dell'aria e tende a non accumularsi al suolo, il che diminuisce il pericolo di esplosione.

In tab. XI sono riportati alcuni parametri chimico-fisici dei singoli costituenti il biogas e della miscela stessa.

Il metano è inodoro, incolore e non tossico; esso brucia con fiamma azzurrina, poco visibile e molto calda; la reazione di combustione è la seguente:



Il punto di infiammabilità è a 715 °C e i suoi limiti di esplosività sono 5 e 14% con aria, la velocità del fronte di fiamma è di 130 cm/sec, la temperatura di combustione è compresa tra 1.500 e 2.000 °C. Tali caratteristiche sono molto importanti per la determinazione delle condizioni ottimali di combustione del metano e di sicurezza dell'impianto di digestione; in particolare, si ricorda che la miscela di 1 volume di metano con 10 volumi di aria è altamente esplosiva se posta a contatto di una sorgente di calore.

In fig. 24 si riporta [42] un diagramma che mostra la variazione dei limiti di infiammabilità del biogas in funzione della percentuale di CH₄ contenuto in esso.

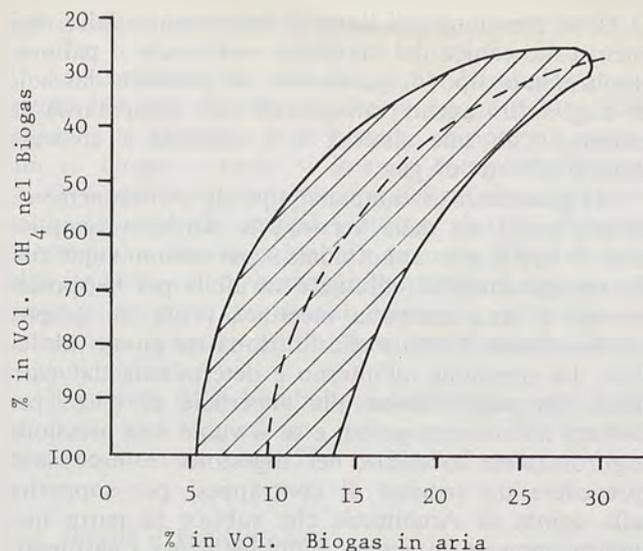


Fig. 24 - Limiti di esplosività del biogas in aria.

Nella tab. XII sono raccolti alcuni effetti fisiologici dei gas costituenti la miscela proveniente da un fermentatore anaerobico. Per tempo di esposizione si intende il tempo durante il quale un adulto o un animale, di circa 70 kg di peso, sono costretti a respirare la miscela gassosa; per effetti fisiologici, si intendono effetti riferiti su di un uomo adulto o su un animale medio, ovviamente per esseri più piccoli, gli stessi effetti si avranno con tempi di esposizione minori e con concentrazioni più basse.

Tabella XII

| Gas | Concentrazione (ppm) (% Vol) | | Tempo di esposizione | Effetti fisiologici |
|------------------|---------------------------------|------|-------------------------|--------------------------------|
| CH ₄ | | | | Asfissiante |
| | 500.000 | 50 | — | Non tossico-emicrania |
| CO ₂ | | | | Asfissiante |
| | 20.000 | 2 | — | Non nocivo |
| | 30.000 | 3 | — | Aumento del ritmo respiratorio |
| | 40.000 | 4 | — | Sonnolenza-emicranie |
| | 60.000 | 6 | 30 min | Resp. affannoso-asfissiante |
| | 300.000 | 30 | 30 min | Può essere fatale |
| H ₂ S | | | | Velenoso |
| | 100 | 0,01 | ore | Irritazione occhi e naso |
| | 200 | 0,02 | 60 min | Emicranie-capogiro vertigini |
| | 500 | 0,05 | 30 min | Nausea-agitazione insonnia |
| | 1.000 | 0,1 | — | Perdita coscienza morte |

Rispetto alla combustione, il biogas ovviamente darà delle prestazioni inferiori a quelle del metano; in particolare, il p.c.i. è compreso tra 4.500 e 6.000 kcal/Nm³ in funzione della % di CO₂ che contiene. La presenza della CO₂ ritarda la velocità del fronte di fiamma e la miscela con aria teorica è di 14% di aria e 86% di biogas; per evitare spegnimenti, è bene prevedere un rapporto di circa il 7% di aria e il 93% di gas.

6.2. Biogas: purificazione.

Qui si tratterà della eliminazione dal biogas dei tre componenti che ne abbassano il potere calorifico: vapore d'acqua, anidride carbonica, idrogeno solforato.

Tale purificazione va effettuata quando la quantità di biogas disponibile, è tale da compensarne le spese di trattamento. Il biogas depurato può giungere ad una concentrazione di CH₄ del 95% che, ai fini della combustione (rapporto con aria e p.c.i.), può essere considerato equivalente al gas naturale.

Il vapor d'acqua può essere eliminato per raffreddamento inserendo nelle parti basse delle tubazioni del gas dei dispositivi di raccolta della condensa, o per passaggio su di un letto avido di acqua (CaCl₂ o CaO).

L'anidride carbonica può essere eliminata facendo passare il biogas in una colonna che lo ponga a contatto con acqua, in quanto la CO₂ in acqua è molto più solubile del CH₄: 878 cm³/lt a 20 °C e 1 atm.

L'eliminazione della CO_2 risulta fortemente migliorata se al posto dell'acqua si usa una soluzione di calce spenta ($Ca[OH]_2$). Per una purificazione totale, vi sono sistemi più costosi ma più efficaci: assorbimento con di o tri-etanolamina o mono-etanolamina che reagiscono fortemente con la CO_2 .

L'idrogeno solforato (H_2S), deve essere eliminato, in quanto è estremamente corrosivo; immediatamente a valle del digestore, prima degli strumenti di misura, è necessario prevedere quella che viene chiamata «trappola» di H_2S . Questa consiste in uno strato assorbente di carbone attivo posto sul percorso del gas, oppure, in modo meno costoso, uno strato di massa Laming: idrossido ferrico mescolato con segatura umida. Tali sistemi di purificazione vanno bene per quantità di H_2S piccole come è nel caso del biogas; se la quantità di H_2S da eliminare è alta si può anche in questo caso, pensare ad assorbitori chimici che possono essere gli stessi della CO_2 .

La soluzione a secco è però da preferire, in quanto le «trappole» sono rigenerabili per semplice esposizione all'aria; la massa depurante può trattenere fino al 40% del proprio peso in zolfo prima di essere rigenerata.

6.3. Biogas: stoccaggio in gasometro.

La necessità di stoccare il biogas a valle del fermentatore nasce da molteplici fattori: innanzi tutto le necessità di compensare le variazioni della richiesta con quelle della produzione; inoltre con l'inserimento del gasometro è possibile controllare la pressione all'interno del fermentatore.

Il volume del gas da stoccare va calcolato eseguendo un'attenta analisi dell'utilizzazione del biogas e della sua richiesta nel tempo; quindi a meno di non avere un consumo continuo e regolare di gas appare necessario prevedere un gasometro immediatamente a valle del digestore.

Fondamentalmente esistono due tipi di gasometro: a « pallone » e a « campana », riprodotti in fig. 25.

Il tipo b è il più semplice e il meno costoso: il gas gonfia, durante l'accumulo, un pallone in materiale gommoso, il quale durante il prelievo si sgonfia. Ovviamente è necessario un sostegno metallico del pallone e una serie di contrappesi calcolati in maniera tale da avere la pressione voluta nel digestore. Con tale sistema di stoccaggio si può operare solo

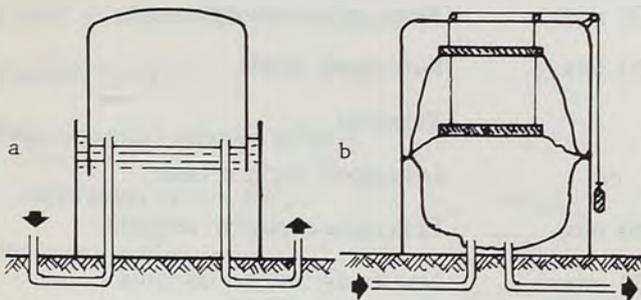


Fig. 25 - Stoccaggio del biogas con gasometro esterno.

a) gasometro a campana; b) gasometro a pallone.

a bassa pressione e il limite è determinato dalla resistenza meccanica del materiale costituente il pallone. Inoltre, tale tipo di gasometro va protetto dal sole e dagli altri agenti atmosferici per aumentarne la durata. Con tale sistema si è arrivati a stoccare fino a $400 m^3$ di gas.

Il gasometro a campana, tipo a, è comunemente il più usato sia nella versione a campana semplice che in quella a «cannocchiale» per volumi superiori. In tali gasometri il volume è variabile per lo spostamento di una campana metallica posta, in genere, in una massa d'acqua che funziona da giunto idraulico. La pressione all'interno è determinata dal peso della campana riferita alla superficie di base; per volumi abbastanza grandi e se si vuole una pressione rigorosamente costante nel digestore, è necessario prevedere un sistema di contrappesi per sopperire alla spinta di Archimede che subisce la parte metallica immersa in acqua. Indubbiamente i gasometri a «campana» sono più solidi e più sicuri di quelli a «pallone».

Ai fini della sicurezza è necessario verificare che all'interno del gasometro non vi sia aria prima di immettervi il gas; inoltre tra il gasometro e il digestore è necessario interporre una valvola che, nella fase di utilizzazione del gas dal gasometro, faccia in modo che il digestore non vada mai in depressione. Inoltre, se immediatamente a valle del gasometro vi è un'utilizzazione (combustione) del biogas è necessario porre sul condotto di uscita dal gasometro un rompifiamma che, nell'eventualità di un ritorno di fiamma, impedisca a questa di raggiungere il gasometro. Questo è facilmente ottenibile con della paglia di ferro o con una griglia.

In fig. 26 sono riportati alcuni sistemi di stoccaggio del gas che utilizzano la parte superiore del digestore; ciò può essere fatto o con un tetto mobile o con una copertura costituita da materiale gommoso gonfiabile.

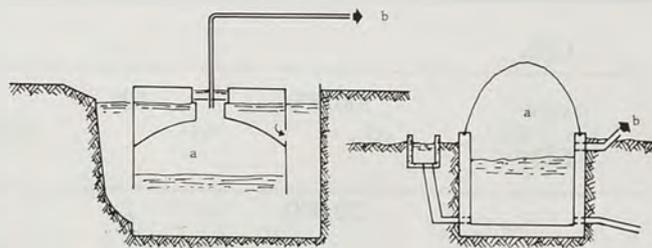


Fig. 26 - Stoccaggio del biogas con gasometro interno.

a) camera di stoccaggio; b) biogas all'utilizzazione.

Alcune semplici considerazioni sul circuito di distribuzione: a parte la distribuzione del gas con ventilatore o pompa per gas, per grosse distanze, è pensabile, per piccole distanze, di distribuirlo con sistemi più semplici e meno costosi. Dal digestore (ove la pressione è di $20 \div 30 cm H_2O$), il gas può arrivare fino ad una distanza di circa 30 m e bruciare ancora con una fiamma stabile. Per distanze superiori, è pensabile di porre lungo il circuito di distribuzione dei piccoli gasometri e trasferire il gas con un sistema di contrappesi e di valvole di non ritorno [42].

6.4. Biogas: compressione in bombole.

La compressione del biogas in bombole sia a media (40 kg/cm²) che ad alta pressione (200 ÷ 350 kg/cm²), si giustifica se si dispone di notevoli quantità di biogas e se lo si intende commercializzare.

Ovviamente la compressione del gas consuma una certa quantità di energia (intorno al 10% del gas compresso a medie pressioni), per cui, prima di scegliere questa via di immagazzinamento, è necessario eseguire un'accurata analisi energetica di tutta la catena del biogas: produzione, purificazione, stoccaggio, utilizzo.

Il volume delle bombole generalmente usate è di 10 o 50 litri che ad una pressione di 200 kg/cm² possono stoccare circa 2 e 10 Nm³ di gas.

6.5. Biogas e combustione.

La combustione è il modo con cui il biogas entra nel ciclo energetico. Più sopra si sono riportate le caratteristiche chimico-fisiche del metano e del biogas che permettono di stabilire le caratteristiche dei bruciatori per il migliore utilizzo del biogas.

Altro uso del biogas è quello per autotrazione o per motori a combustione interna fissi. I motori fissi (gruppi elettrogeni, motopompe, macchine agricole ecc.) possono essere alimentati a biogas non depurato (a parte la piccola quantità di H₂S) e questo non crea in generale grossi problemi.

L'uso per autotrazione, invece, richiede la soluzione di alcuni problemi: il gas deve essere stoccato in bombole e trasportato nella vettura e questo comporta l'adozione di criteri di sicurezza rigidi; inoltre, il motore deve far fronte a richieste di potenza variabili, quindi è necessario fare degli interventi sostanziali sugli organi meccanici.

6.6. Effluenti della digestione anaerobica liquidi e solidi quali fertilizzanti.

Da molti autori [44], [49] viene postulata la possibilità di utilizzare gli effluenti della digestione anaerobica, siano essi liquidi che solidi quali fertilizzanti nei campi al posto dei concimi chimici.

L'uso quale concime delle deiezioni animali non è una scoperta di questi tempi; a causa dei costi crescenti dei fertilizzanti chimici e del progressivo impoverimento di materia organica del terreno (0,5 ÷ 3) %, contro il (2,5 ÷ 6) % che è la media europea [44] tale tecnica va riprendendo attualità.

L'uso di un fertilizzante organico, quale il fango e lo stesso liquido provenienti dal digestore anaerobico, presenta diversi vantaggi: in primo luogo l'apporto di sostanza organica e di cariche microbiche utili al terreno; esso inoltre offre elementi indispensabili alla crescita delle piante e sostanze stimolanti; inoltre l'attività delle colonie microbiche del suolo viene esaltata, e il fosforo inorganico e i microelementi del terreno vengono stabilizzati, a favore dell'assorbimento radicale. Il trattamento di fermentazione anaerobica non altera il contenuto degli elementi fertilizzanti quali azoto, fosforo, potassio; anzi, favorendo la conversione dell'azoto organico

in azoto ammoniacale, esso aumenta il potere fertilizzante degli effluenti solidi e liquidi. A tal proposito, è bene utilizzare sia la parte liquida che quella solida per non perdere tutti i composti fertilizzanti che passano in soluzione.

Nella tab. XIII è riportato il valore fertilizzante di alcuni fanghi anaerobici.

Tabella XIII

| | N % | P % | K % | Rif. |
|---------|------|------|------|------|
| Bovini | 0,5 | 0,25 | 0,65 | [20] |
| Suini | 0,4 | 0,3 | 0,3 | [20] |
| Avicoli | 2,4 | 2,2 | 1,4 | [20] |
| Suini | 2,68 | 2,61 | 1,17 | [21] |

Il valore fertilizzante degli effluenti dipende dalle modalità di conduzione della fermentazione anaerobica e dalle caratteristiche dell'alimentazione.

Rispetto all'utilizzo, come fertilizzante, dei prodotti liquidi e solidi della digestione anaerobica, appare importante l'esperienza cinese [18] [45]. In tale paese la tecnologia del biogas è vista ed orientata verso la produzione di fertilizzante per aziende agricole.

Allo stato attuale, in Cina esistono diversi milioni di impianti di biogas funzionanti, sia per piccole comunità che per grandi città, anche se maggior enfasi è stata posta alla diffusione di piccoli impianti ad uso familiare.

Il digestore anaerobico cinese non viene visto come un accessorio dell'azienda agricola, ma, per le prestazioni che esso fornisce, come parte strutturale in cui si compie quel processo di chiusura del ciclo delle sostanze organiche consumate da tutti gli esseri viventi fig. 11.

In tab. XIV si riportano alcune composizioni usate nell'alimentare un digestore cinese; i rifiuti vegetali, prima di essere immersi nel digestore, subiscono una decomposizione in aria per un tempo di circa 15 ÷ 20 giorni.

Tabella XIV

| Urine | Deiezioni umane | Acqua | Deiezioni animali | Paglia | Vegetali di palude |
|-------|-----------------|-------|-------------------|--------|--------------------|
| 20% | 30% | 50% | | | |
| | 10% | 50% | 30% | 10% | |
| | 20% | 50% | 30% | | |
| | 10% | 50% | 10% | | 30% |

La produzione media di un impianto tipico cinese, dalle capacità di 10 m³, è di 5 m³ di biogas per giorno, sufficiente (25.000 kcal/g) per una famiglia di 5 persone per l'illuminazione e la cottura dei cibi.

Gli effluenti liquidi vengono sparsi nei campi come acqua di irrigazione o stoccati, mentre i fanghi vengono usati come concime di base o per la fabbricazione di humus.

Nella tab. XV si riportano le composizioni medie del fango e dell'effluente liquido.

Tabella XV

| | Fango | Liquido |
|-------------------|-------------|-------------|
| N | 650 mg/lt | 500 mg/lt |
| P | 40 mg/lt | 15 mg/lt |
| K | 9.400 mg/lt | 2.000 mg/lt |
| Sostanza organica | 35% | |

Utilizzando tali fertilizzanti organici, nell'anno 1977 nella regione di Yahang si è avuto un incremento nel raccolto del riso del 10% [18, pag. 61], mentre in quella di Wu Chin un incremento del 17% [45, pag. 47] nella raccolta del grano.

6.7. Aspetti patogeni.

In questo paragrafo, verranno esposti, brevemente, gli effetti benefici della fermentazione anaerobica sui rifiuti organici in merito alla loro carica patogena.

Durante la fermentazione anaerobica si ha una forte riduzione della carica batterica patogena contenuta nei rifiuti (salmonella, anchilostoma ecc.).

Il trattamento termofilo a temperature intorno ai 60 °C provoca una migliore sterilizzazione del liquame; ma anche quello mesofilo ha come effetto l'abbassamento del numero dei parassiti ad un valore non preoccupante.

In [45] viene messo in evidenza che, nella parte inferiore del reattore, esiste una concentrazione maggiore di organismi patogeni e che la diluizione dell'alimentazione, favorisce la caduta delle spore dei parassiti verso il basso e tale fatto contribuisce alla distruzione delle stesse per effetto fisico.

Secondo Krieger e altri [50] si hanno le mortalità degli agenti patogeni riportate in tab. XVI:

Tabella XVI

| Carica patogena | Tempo di riduzione (giorni) | | |
|------------------|-----------------------------|-------|--------|
| | 6 | 15 | 30 |
| Cholearea suis | 80% | 97,4% | 99,9% |
| | 20% | 90,0% | 100,0% |
| | 37% | 99,9% | |
| Typhimorium | 78% | | |
| | 60% | 99,2% | |
| Coliformi totali | 92% | 99,6% | |
| Coliformi fecali | 76% | 99,9% | |

Dai rapporti sui digestori cinesi citati, si estraggono i dati di mortalità di organismi patogeni riportati in tab. XVII.

Tabella XVII

| Organismo | Tempo di ritenzione (giorni) | % di mortalità |
|--------------|------------------------------|----------------|
| Spiraliformi | 20 | 95,12 |
| | 32 | 100 |
| Anchilostoma | 50 | 92,17 |
| | 90 | 100 |

7. ASPETTI ECONOMICI

In questo capitolo vengono esposti alcuni criteri tecnico-economici generali da prendere in considerazione nella scelta di un impianto per la fermentazione anaerobica di rifiuti agroalimentari e/o animali.

Viene anche proposta una relazione matematica per stimare il costo di investimento di un impianto di fermentazione anaerobica, intendendo per impianto solo le apparecchiature che permettono la produzione del biogas e la eliminazione di H₂S ed un piccolo gasometro a valle del digestore per controllare la pressione nel reattore; quindi sono esclusi i costi per la purificazione, stoccaggio, trasporto e utilizzo del biogas, costi che vanno valutati su casi concreti in funzione della tipologia di utilizzo.

Vengono anche proposti dei criteri per valutare il costo di produzione annuo del biogas.

Infine, i criteri esposti vengono applicati al caso concreto della produzione di biogas a partire da deiezioni bovine e suine.

7.1. Considerazioni generali.

L'economicità o meno di un impianto di fermentazione anaerobica dipende fortemente dalla tecnologia usata.

La scelta della tecnologia più appropriata va fatta eseguendo innanzi tutto un'analisi energetica complessiva del contesto in cui si vuol inserire l'impianto di fermentazione anaerobica; quindi si valuta la quantità di rifiuto e si sceglie la tecnologia più appropriata, che come visto nei capitoli precedenti, può essere molto semplice, sul tipo di quella cinese, o può raggiungere diversi gradi di sofisticazione e quindi di costo.

Se si pone come scopo la penetrazione della tecnologia della fermentazione anaerobica nel mondo agricolo per il trattamento di rifiuti agro-alimentari e/o di deiezioni animali, valgono i seguenti criteri tecnico-economici:

— attenta scelta dei materiali; questi devono essere duraturi e dare ottime prestazioni, costare poco e non richiedere per l'installazione personale specializzato;

- l'impianto deve risultare tecnologicamente semplice e versatile, tale cioè da sopportare eventuali variazioni nell'alimentazione, ed essere concepito in modo da non richiedere per la sua conduzione interventi continuativi;
- particolare attenzione va posta alla localizzazione del reattore, all'isolamento termico e alla movimentazione del liquame, in quanto questi determinano il rendimento netto energetico dell'impianto;
- se l'azienda in cui si prevede di installare l'impianto di fermentazione anaerobica presenta dei problemi di scarico delle acque, è da vagliare opportunamente, con una attenta analisi energetica, se il trattamento anaerobico è da farsi a monte o a valle di quello aerobico.

7.2. Curva analitica dei costi di investimento.

La curva dei costi di investimento iniziale di un impianto di fermentazione anaerobica, con buona approssimazione [46] [47] [52], è rappresentata dalla seguente funzione:

$$(31) \quad P = A \cdot V^{0,78}$$

in cui A è una costante che dipende dalla tecnologia usata ed esprime il costo di un certo volume:

$$(32) \quad A = P_0/V_0^{0,78}$$

Volendo esprimere il costo di investimento per un impianto di fermentazione anaerobica di deiezioni animali, è necessario definire le caratteristiche di un capo medio, valutare la concentrazione media dei solidi nelle deiezioni e la quantità di liquame da avviare al fermentatore alla concentrazione di solidi totali ottimale per la fermentazione stessa; in tabella XVIII sono riportati tali valori per un capo medio o equivalente, bovino e suino [48].

Tabella XVIII

| Capo eq. | Peso (kg/capo) | Deiezioni (kg/capo · giorno) | Liquame da trattare all'8% S.T. | |
|----------|----------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| | | | (m ³ /capo · giorno) | (lt/kg peso vivo · giorno) |
| Bovino | 347 | 25 a \cong 13% S.T. | 0,041 | 0,12 |
| Suino | 75 | 6 a \cong 10% S.T. | 0,008 | 0,12 |

Siano K e Tr rispettivamente, il liquame da trattare per capo equivalente e per giorno e il tempo di ritenzione in un impianto continuo; il volume di lavoro del digestore sarà:

$$(33) \quad V_u = K \cdot Tr \cdot n$$

in cui n è il numero di capi eq. di cui si vogliono trattare anaerobicamente le deiezioni.

Fissando un coefficiente di utilizzo del 90% del volume del reattore [41], questo risulterà:

$$(34) \quad V = 1,11 \cdot K \cdot Tr \cdot n$$

che introdotto nella (31) dà:

$$(35) \quad P = A \cdot 1,08 \cdot (K \cdot Tr)^{0,78} \cdot n^{0,78}$$

in cui Tr è espresso in giorni e K in m³/capo eq. giorno.

La (35) rappresenta la relazione tra il costo di investimento e il numero di capi eq. dell'allevamento; essa tiene conto della tecnologia usata attraverso il fattore A , delle modalità di conduzione dell'allevamento attraverso il fattore K e del tempo di ritenzione Tr .

7.3. Costo di produzione annuo.

Per la stima del costo di produzione annuo del biogas si sono fatte le seguenti assunzioni:

- ammortamento: tasso del 15% costo di investimento in 10 anni:

$$f_1 = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} = 0,199$$

- manutenzione, costi di esercizio: 6% del costo di investimento:

$$f_2 = 0,06;$$

quindi il costo di gestione in L/anno risulta:

$$(36) \quad p = P \cdot f^* \quad \text{in cui } f^* = \Sigma f$$

7.4. Produzione di biogas da deiezioni suine e bovine.

La produzione teorica di biogas in un allevamento costituito da n capi è:

$$(37) \quad G = C \cdot n$$

esprimendo C in Nm³/capo · anno, G rappresenta la produzione teorica annua ottenibile da un allevamento di n capi.

Per capo equivalente bovino e suino, come definito in tab. XVIII, C vale rispettivamente [48]:

$$C = 1; \quad C = 0,11 \text{ in Nm}^3/\text{capo eq. giorno}$$

La (37), come detto, rappresenta la produzione teorica di biogas; la produzione netta di biogas dipende dalla tecnologia usata e varia durante il corso dell'anno; mediamente nell'anno è accettato [35] un coefficiente di utilizzazione del 75% con una tecnologia del tipo « High Rate »; se β è il coefficiente di utilizzazione del biogas prodotto, la produzione netta sarà:

$$(38) \quad G = C \cdot n \cdot \beta$$

Combinando la (38), (35) e (36) si ottiene la seguente relazione:

$$(39) \quad p = \frac{1,08 \cdot A \cdot (K \cdot Tr)^{0,78} \cdot f^*}{C \cdot a \cdot \beta} n^{-0,22}$$

la quale esprime il costo, in Lire per ogni kcal netta, dell'energia ricavabile dal trattamento delle deiezioni di un allevamento di n capi equivalenti; a è il potere calorifico inferiore del biogas.

Per la scelta del valore da dare alla costante A nella (39), è stata condotta una ricerca presso ditte fornitrici di impianti di fermentazione anaerobica per deiezioni animali; nella tab. XIX sono riportati i valori più significativi ricavati dall'indagine.

Tabella XIX

| V_0 (m^3) | P_0^* (L) | A |
|--------------------|------------------|-------------------|
| 110 | $37 \cdot 10^6$ | $0,94 \cdot 10^6$ |
| 550 | $250 \cdot 10^6$ | $1,82 \cdot 10^6$ |
| 120 | $55 \cdot 10^6$ | $1,31 \cdot 10^6$ |
| 200 | $87 \cdot 10^6$ | $1,39 \cdot 10^6$ |

In fig. 27-28 si riporta la (39) per i valori di A di tab. XIX; per i valori delle altre grandezze si sono usati quelli riportati in tab. XX.

Tabella XX

| | Bovini | Suini |
|-----------------------------|--------|-------|
| K (m^3 /capo-eq. giorno) | 0,041 | 0,008 |
| C (Nm^3 /capo-eq. anno) | 365 | 40 |
| Tr (giorni) | 15 | 15 |
| f^* ($anno^{-1}$) | 0,26 | 0,26 |
| a ($kcal/Nm^3$) | 5.200 | 5.200 |
| β | 0,75 | 0,75 |

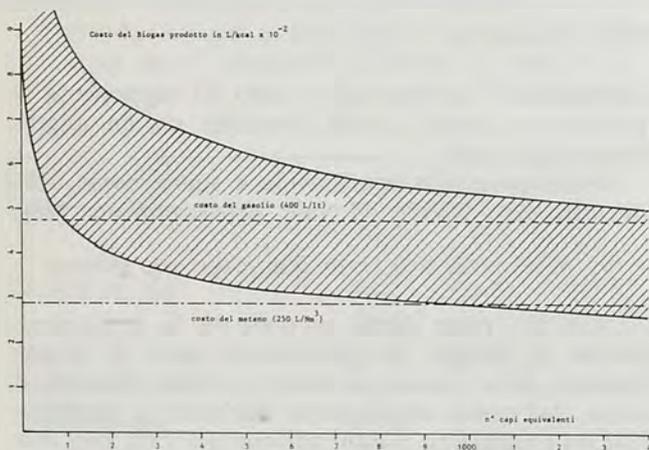


Fig. 27 - Variabilità del costo dell'energia prodotta dal trattamento di deiezioni bovine.

* Tali prezzi si riferiscono all'ottobre/novembre 1980.

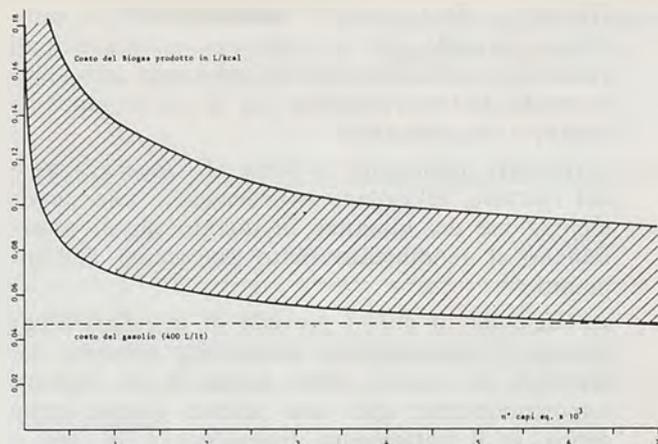


Fig. 28 - Variabilità del costo dell'energia prodotta dal trattamento di deiezioni suine.

L'andamento delle curve mostra l'esistenza di un ampio campo di variabilità dei costi degli impianti di fermentazione anaerobica (aree tratteggiate nelle figure). Ciò è legato al fatto che i fornitori di impianti di fermentazione anaerobica non offrono ancora un prodotto sufficientemente standardizzato. A nostro avviso questa è una delle cause del forte ritardo nella penetrazione della tecnologia della fermentazione anaerobica per lo smaltimento delle deiezioni animali.

Tuttavia riteniamo che le prospettive di convenienza sia energetica che economica siano reali, soprattutto nel settore dell'allevamento bovino; le curve dei costi mostrano che già oggi per questo settore esiste una convenienza economica (almeno nell'ipotesi di poter utilizzare completamente il biogas prodotto) per allevamenti di almeno 80-100 capi, se il costo di installazione dell'impianto viene contenuto entro il valore di 340.000 L/ m^3 .

Un ringraziamento è dovuto a tutti gli Enti e le persone che hanno reso possibile lo svolgimento del presente lavoro, fornendo documentazione e utili e qualificati suggerimenti.

Si vuole qui esplicitamente ricordare:

- l'Assessorato all'Agricoltura della Regione Piemonte;
- l'IPLA;
- il personale dell'Istituto di Fisica Tecnica e Impianti Nucleari del Politecnico di Torino ed in particolare la Signora Alda Gallo Imariso che si è prodigata nella cura di tutta la parte amministrativa relativa alla Convenzione.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] H. A. BARKER, *Biological Formation of Methane*, Ind. Eng. Chem. 48, 1438 (1956).
- [2] AUTORI VARI, *Journées d'études sur la valorisation énergétique des sous-produits agricoles* Parigi 13-14 Marzo 1979.
- [3] J. LE GALL, *Biochimie et microbiologie de la methanogenese*, vedere [2].
- [4] A. ERNST, V. STADBAUER, G. STRAUSS, *Biogas, Energie aus Abfall*, Bild der Wissenschaft (1977).
- [5] J. G. ZEIKUS, P. J. WEIMER, *Fermentation of cellulose and cellulose by Clostridium thermocellum in the absence and presence of Methanobacterium thermoautotrophicum*, Appl. Env. Micr. 33, 289 (1977).

- [6] P. ROIBOND, A. CLARA, *Aspects écologiques de la production de méthane*, vedere [2].
- [7] C. D. PARKER, *Australian Journal of Experimental Biology and Medicine*, 23, 81 (1945).
- [8] B. LAGRANGE, *Biomethane*, vol. II, EDISUD, Aix-en-Provence (1979).
- [9] H. HENKELEKIÖU, *Basic Principles of Sludge Digestion*, Biologic Waste Treatment, W. W. Eckenfelder Jr. Editore, Pergamon Press, Londra (1961).
- [10] S. NEAVE, A. M. BUSWELL, *Industrial and Engineering Chemistry*, 19, 1012 (1927).
- [11] W. J. NIEKERSON, *Transformation of Carbon Compounds by Microorganism*, «Industrial and Engineering Chemistry», 48, 1411 (1956).
- [12] H. A. BARKER, *Arch. Mikrobiol.* 7, 404 (1936).
- [13] D. C. AUGENSTEIN et al., *Biomethanisation: Anaerobic Fermentation of CO₂/H₂ and CO to Methane*, 69mo Congresso Annuale dell'American Institute of Chemical Engineers (1976).
- [14] W. STADMAN, F. C. BARKER, *Arch. Biochem.* 21, 256 (1949); M. J. PINE, H. A. BARKER, *Bacteriol. Proc.* p. 98 (1954).
- [15] W. J. SCHNELLEN, M. KLUYSER, *Arch. Biochem.* 14, 57 (1947).
- [16] A. J. SALLE, *Fundamental Principles of Bacteriology*, Mc Graw Hill, New York (1943).
- [17] W. H. GOTTLIEB, S. PELOZAR, *Journal of Bacteriological Reviews* 15, 55 (1951).
- [18] *China: Azolla Propagation and Small-Scale Biogas Technology*, FAO Soils Bulletin 41, Roma (1978).
- [19] P. L. MC CARTY et al., *Nutrient Requirements and Biological Solids Accumulation in Anaerobic Digestion*, Industrial Advances on Water Pollution Research, vol. 2, pag. 305 (1965).
- [20] W. GANAPINI, A. VIGLIA, *Smaltimento e valorizzazione dei liquami zootecnici: aspetti ambientali ed energetici*, *Informatore Agrario*, 1 (1980).
- [21] D. A. STAFFORD Ed., *Anaerobic Digestion*, 1st International Symposium on Anaerobic Digestion, Cardiff (1979).
- [22] R. KUGELMAN et al., *Cation Toxicity and Stimulation in Anaerobic Waste Treatment*, *Journal of Water Pollution Control*, 37, 97 (1965).
- [23] R. C. LOEHR, *Pollution Control for Agriculture*, p. 142 (1977).
- [24] R. J. SMITH et al., *Experimental Methane Production from Animal Excreta in Pilot-Scale and Farm-Size Units*, *Journal of Animal Science* 48, 1 (1979).
- [25] G. LETTINGA et al., *Effect of Feed Composition on Digester Performance*, 1st International Symposium on Anaerobic Digestion, Cardiff (1979).
- [26] J. T. PFEFFER, *Anaerobic Digestion Processes*, vedere [25].
- [27] QIAN-ZE-SHU, NU-JIN-PENG, *Studies of Observations on Methane Fermentation in the Farmland Digester in China*, Department of Soils Agricultural Chemistry, Zhejiang, Hangzhou, Cina (1976).
- [28] I.P.A.T. Technical University of Berlin. Information issued on their project concerned with biogas plants in the framework of rural development (1977).
- [29] J. L. FRY, *Practical Building of Methane Power Plants*, Standard Printing, Santa Barbara, California (1971).
- [30] *Energy and Economic Assessment of Anaerobic Digester and Biofuels for Rural Waste Managements*, EPA - 600/7-78-174, Cincinnati (1978).
- [31] 3rd Miami International Conference on Alternative Energy Source 15/17 December 1980.
- [32] F. E. MOSEY, *Sewage Treatment Using Anaerobic Digestion*, 1st International Symposium on Anaerobic Digestion, Cardiff (1979).
- [33] A. GASTONE, A. DE MARTINO, *Note sull'impianto di produzione di metano biologico a Torino*, *Acqua e Gas*, (1941).
- [34] G. IPPOLITO, *L'impianto di depurazione delle acque di fogna di Potenza*, *Acqua e Gas* (1938).
- [35] T. DONNELLY, *Industrial Effluent Treatment with the Bioenergy Process*, *Proc. Bioch.*, vol. 13, n° 6 (1978).
- [36] R. J. SMITH et al., *Experimental Methane Production from Animal Excreta in Pilot-Scale and Farm-Size Units*, *Journal of Animal Science* 48, 1 (1979).
- [37] J. K. R. GASSER Editore, *Effluents from Livestock*, Applied Science, Londra (1980).
- [38] D. T. HILL et al., *Modelling Techniques and Computer Simulation of Agricultural Waste Treatments*, *Agricultural Waste* 2,2 (1980).
- [39] E. LAVAGNO, P. RAVETTO, B. RUGGERI, *Proposals for the Analytical Modelling of Digester*, International Conference «Energy from Biomass», Brighton, 4-7 Nov. 1980.
- [40] GIZA - GI&GI, *Biogas: energia del futuro*, Bagnolo in Piano (RE) (1980).
- [41] CRPA Notizie, n° 4-5 (1980).
- [42] P. J. MAYNEL, *Biogas: Planning Digester*, Prism Press (1976).
- [43] S. G. BURGESS, D. D. WOODS, *The Properties and Detection of Sludge Gas*, *Journal of the Institute of Sewage Purification* 24-46 (1964).
- [44] W. GANAPINI, *La risorsa rifiuti*, ETAS, Milano (1978).
- [45] *China: Recycling of Organic Waste in Agriculture*, FAO Soils Bulletin 40 (1977).
- [46] W. W. ECKENFELDER Jr. et al., *Design and Economics of Joint Wastewater Treatment*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, p. 153, SA/1 (1972).
- [47] G. GRIGNASCHI, Eneco, comunicazione privata.
- [48] E. LAVAGNO et al., *Contributions of Alternative Energies to meet the Needs of Rural Areas*, 3rd Miami International Conference on Alternative Energy Sources, December 1980.
- [49] R. SUMMER et al., *Use and Analysis of Digested Sludge*, 3rd International Symposium on Livestock Wastes, ASAE (1978).
- [50] D. J. KRIEGER et al., *Survival of Salmonellae, Total Coliforms and Fecal Coliforms in Swine Waste Lagoon Effluents*, 3rd International Symposium on Livestock Wastes, ASAE (1978).
- [51] R. SUMMER, S. BOUSFIELD, *A detailed study of piggery-waste anaerobic digestion*, *Agricultural Wastes*, 2, 61 (1980).
- [52] A. G. HASHIMOTO, Y. R. CHEN, *The overall Economics of Anaerobic Digestion*, 1st International Symposium on Anaerobic Digestion, Cardiff (1979).

La Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino accoglie nella « Rassegna Tecnica », in relazione ai suoi fini culturali istituzionali, articoli di Soci ed anche non Soci, invitati. La pubblicazione, implica e sollecita l'apertura di una discussione, per iscritto o in apposite riunioni di Società. Le opinioni ed i giudizi impegnano esclusivamente gli Autori e non la Società.

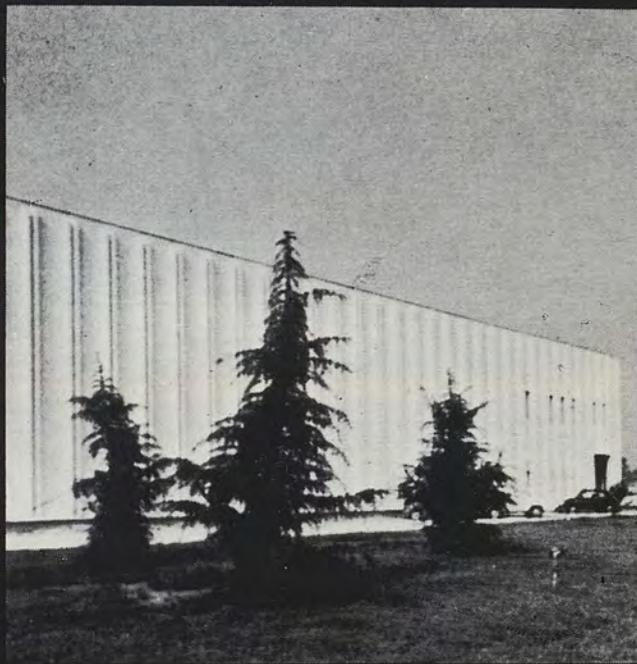
Direttore responsabile: **MARIO FEDERICO ROGGERO**

Autorizzazione Tribunale di Torino, n. 41 del 19 Giugno 1948

Spedizione in abbonamento postale GR III/70 - Mensile

STAMPERIA ARTISTICA NAZIONALE - CORSO SIRACUSA, 37 - TORINO

Prefabbricare. Tradurre in economia lo spazio e il tempo.



Unire la conoscenza della realtà e i suoi problemi operativi con la capacità di produrre soluzioni idonee al progettista e al costruttore.

La prefabbricazione può essere considerata la sintesi di questi due punti.

Manufatti prefabbricati in cemento armato normale e precompresso per costruzioni civili, industriali e rurali, scuole, ponti, ...



PREFABBRICATI PRECOMPRESSI VIBRATI IN C.A.

ING. PRUNOTTO s.p.a.

12060 GRINZANE CAVOUR (CN) - PIANA GALLO, 3



IMPRESA COSTRUZIONI

ING. PRUNOTTO s.p.a.

12060 GRINZANE CAVOUR (CN) - PIANA GALLO, 3

La ING. PRUNOTTO S.p.A. realizza e progetta tutto questo, traducendo in realtà pratica e razionale la scelta delle tecnologie più adatte alle esigenze del momento determinate fundamentalmente dall'esperienza.

Ed è sempre l'esperienza, solitamente, la dote che mette in

grado un'impresa di fronteggiare rapidamente ed efficacemente i problemi più difficili ed imprevisti.

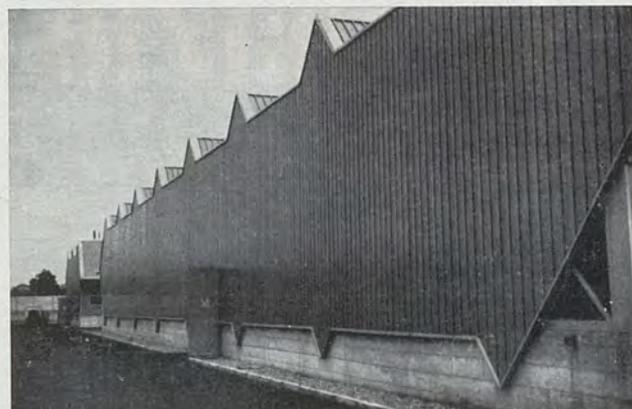
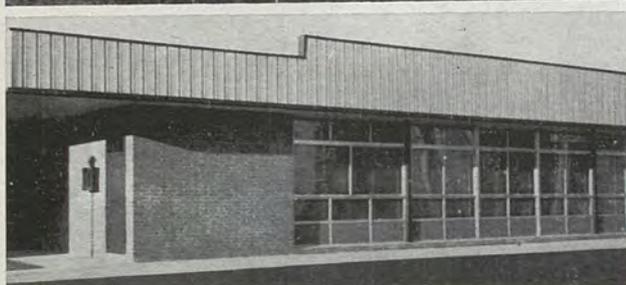
CANDELA

EDIFICI

CIVILI - INDUSTRIALI - AGRICOLI

ORTECO

CARPENTERIA METALLICA



Torino - c. M. D'Azeglio 78 - tel. 688792

SISTEMI TELEFONICI A MISURA D'UTENTE



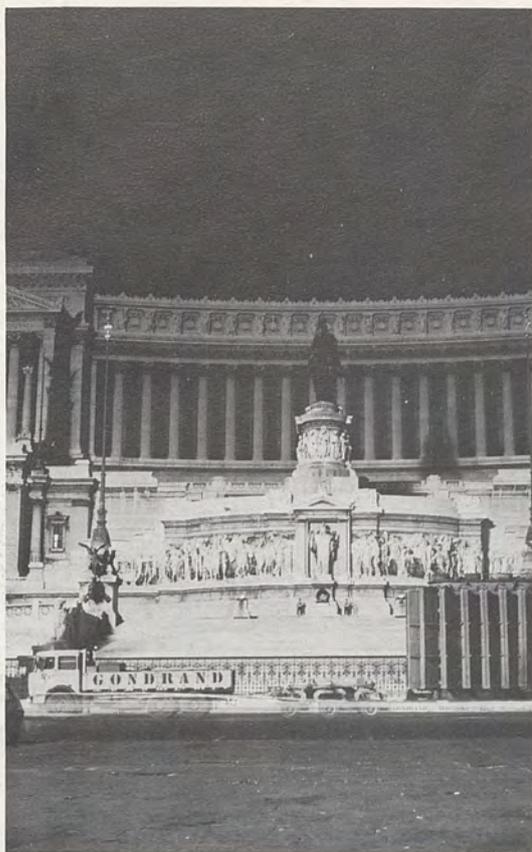
per: PICCOLE & MEDIE AZIENDE
INDUSTRIE
VILLE
OSPEDALI
BANCHE
PROFESSIONISTI

Telefonica Subalpina

DA 35 ANNI È CONSULENZA, PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE

CORSO DUCA DEGLI ABRUZZI 6 - TORINO - TEL. 535.000





**Quando il trasporto è un "grosso"
problema...**

Gondrand, naturalmente.

Trasporto grandi impianti - Trasporto di materiali radioattivi e di merci pericolose
Montaggi industriali - Noleggio autogru

GONDRAND

Una holding articolata per tutti i servizi inerenti la movimentazione delle merci.
Presente in 86 località italiane - 227 sedi di gruppo in Europa.

Sede Sociale: Milano - Via Pontaccio, 21 - tel. 874854 - telex 334659
(indirizzi sulle Pagine Gialle alla voce spedizioni aeree, marittime, terrestri (☎)).



Onduline® S-T sottocoppo

«intelligenza soprattutto»

SETTE I VANTAGGI:

- risparmio di tempo del 50% nella posa dei coppi.
- allineamento perfetto dei coppi.
- stabilità totale dei coppi.
- impermeabilità assoluta con ogni pendenza.
- manutenzione eliminata per sempre.
- isolamento termico superiore.
- transitabilità del tetto senza rotture.

IN VENDITA NEI PRINCIPALI MAGAZZINI

Onduline ITALIA SPA

55011 ALTOPASCIO (Lucca) Via Sibolla Tel. (0583) 25611/2/3/4/5 r.a. Telex 500228 ITOFIC - I





