

QUADERNI PER LA PROGETTAZIONE

BIOGAS DA DISCARICA

Manuale di progettazione, gestione
e monitoraggio degli impianti

con modello di calcolo BIO-5 in Excel

di
Enrico Magnano



EPC LIBRI

INDICE GENERALE



INTRODUZIONE	13
--------------------	----

CAPITOLO 1

IL FENOMENO PRODUTTIVO DEL BIOGAS.....	15
--	----

1.1 Fase aerobica.....	15
1.2 Fase facoltativa anaerobica (acida).....	16
1.3 Fase metanigena anaerobica.....	16
1.4 Fase conclusiva aerobica	17
1.5 Osservazioni sulla fenomenologia produttiva	18
1.6 Fattori che influenzano la produzione di biogas.....	19
1.6.1 <i>Caratteristiche dei rifiuti</i>	19
1.6.1.1 <i>Composizione</i>	20
1.6.1.2 <i>Pezzatura</i>	20
1.6.1.3 <i>Densità</i>	20
1.6.2 <i>Umidità</i>	21
1.6.3 <i>Temperatura</i>	23
1.6.4 <i>Caratteristiche ambientali</i>	24
1.6.5 <i>Caratteristiche gestionali e costruttive</i>	24
1.7 Osservazioni sui fattori influenzanti	25

CAPITOLO 2

LE CARATTERISTICHE DEL BIOGAS.....	27
------------------------------------	----

2.1 Caratteristiche chimiche	27
2.1.1 <i>Metano</i>	29

2.1.2	<i>Anidride carbonica</i>	30
2.1.3	<i>Ossigeno</i>	30
2.1.4	<i>Azoto</i>	31
2.1.5	<i>Idrogeno</i>	32
2.1.6	<i>Idrogeno Solforato</i>	33
2.1.7	<i>Ammoniaca</i>	34
2.1.8	<i>Monossido di Carbonio</i>	35
2.1.9	<i>Microcomponenti</i>	36
2.2	<i>Caratteristiche di combustione</i>	38
2.2.1	<i>Combustione</i>	38
2.2.2	<i>Esplosione</i>	46
2.3	<i>Densità</i>	47
2.4	<i>Temperatura</i>	49
2.5	<i>Pressione</i>	50
2.5.1	<i>Pressione legata alla produzione del biogas</i>	50
2.5.2	<i>Pressione barometrica</i>	53
2.5.3	<i>Pressione di captazione</i>	56
2.6	<i>Umidità</i>	57
2.7	<i>Sedimentabilità</i>	57
2.8	<i>Solubilità</i>	58
2.9	<i>Odore</i>	58
2.10	<i>Colore</i>	58
2.11	<i>Biogas "tipico"</i>	59
2.11.1	<i>Unità di misura</i>	59
2.11.2	<i>Composizione</i>	61
2.11.3	<i>Potere calorifico</i>	61
2.11.4	<i>Limiti di infiammabilità</i>	62
2.11.5	<i>Densità</i>	62
2.11.6	<i>Temperatura</i>	62
2.11.7	<i>Pressione</i>	63
2.11.8	<i>Umidità</i>	63
2.11.9	<i>Riepilogo dati standard</i>	63



CAPITOLO 3

LE PROBLEMATICHE RAPPRESENTATE DAL BIOGAS	65
3.1 Impatti olfattivi	65
3.2 Rischi di incendio	68
3.3 Rischi di asfissia	73
3.4 Rischi di intossicazione	75
3.5 Emissioni in atmosfera di GHG	76
3.6 Fitotossicità	77
3.7 Sinergia degli effetti	78

CAPITOLO 4

LE PREVISIONI PRODUTTIVE DEL BIOGAS.....	79
4.1 Modellistica disponibile	80
4.2 Modello teorico di calcolo	83
4.2.1 Sottomodello stechiometrico	84
4.2.2 Sottomodello biochimico	85
4.2.3 Osservazioni	88
4.3 Modello di calcolo: LANDGEM della U.S.E.P.A	89
4.4 Modello di calcolo: UNFCCC – IPPC 2006	90
4.5 Modello BIO-5	92

CAPITOLO 5

CAPTAZIONE DEL BIOGAS.....	93
5.1 Quando captare il biogas	95
5.2 Raggio di influenza	97
5.3 Vita utile dei sistemi di captazione	100

5.4	Sistemi di captazione	101
5.4.1	<i>In corso d'opera</i>	102
5.4.2	<i>Dreno percolati di fondo</i>	103
5.4.3	<i>Dreno di protezione meccanica in sponda</i>	104
5.4.4	<i>Dreni infra-telo</i>	106
5.4.5	<i>Dreni interni</i>	107
5.4.6	<i>Camini di esalazione biogas</i>	108
5.4.7	<i>Elementi costruttivi</i>	112
5.4.8	<i>Sonda coassiale</i>	113
5.4.9	<i>Dreno</i>	118
5.4.10	<i>Costruzione del dreno</i>	121
5.4.11	<i>Campane in elevazione su camini di esalazione</i>	125
5.4.12	<i>Torce Statiche</i>	128
5.4.13	<i>Dreni orizzontali di captazione biogas</i>	130
5.4.14	<i>Sistemi di gestione dei percolati</i>	135
5.4.15	<i>A completamento discarica</i>	136
5.4.16	<i>Trincee perimetrali di captazione biogas</i>	137
5.4.17	<i>Pozzi verticali</i>	138
5.4.18	<i>La trivellazione dei pozzi</i>	140
5.4.18.1	<i>Log di perforazione</i>	142
5.4.18.2	<i>Campionamenti e misure</i>	145
5.4.18.3	<i>Predisposizione alla trivellazione</i>	145
5.4.18.4	<i>Trivellazione</i>	147
5.4.18.5	<i>Misure di sicurezza</i>	152
5.4.19	<i>La costruzione dei pozzi trivellati</i>	155
5.4.19.1	<i>Tipologia del materiale drenante</i>	156
5.4.19.2	<i>Tipologia della sonda fessurata</i>	157
5.4.20	<i>Testa di pozzo</i>	159
5.4.21	<i>Sigillatura del pozzo</i>	164
5.4.22	<i>Dreni corticali</i>	166
5.5	Sequenza dotazioni di captazione	168
5.6	Problematiche legate ai sistemi di captazione	172
5.6.1	<i>Infiltrazioni d'aria</i>	172

5.6.2	<i>Ristagno percolati</i>	175
5.6.2.1	<i>Misura del livello dei percolati</i>	176
5.6.2.2	<i>Scelta di una pompa percolati</i>	182
5.6.3	<i>Vetustà</i>	188

CAPITOLO 6

IL TRASPORTO DEL BIOGAS

6.1	Valutazioni sulla sicurezza delle reti di trasporto biogas	192
6.2	Tipologia della rete di trasporto	196
6.2.1	<i>Sistemi in serie</i>	196
6.2.2	<i>Sistemi ad anello</i>	198
6.2.3	<i>Sistemi in parallelo</i>	199
6.2.4	<i>Sistemi misti</i>	199
6.2.5	<i>Sistemi a qualità differenziata</i>	202
6.3	Parametri ottimali per il trasporto.....	203
6.3.1	<i>Materiali costruttivi</i>	204
6.3.2	<i>Formazione di condense</i>	204
6.3.3	<i>Pendenze delle linee</i>	205
6.4	Dimensionamento della rete di trasporto.....	209
6.4.1	<i>Parametri del calcolo di dimensionamento</i>	210
6.4.2	<i>Perdite di carico distribuite</i>	214
6.4.3	<i>Diametri minimi delle linee secondarie</i>	219
6.4.4	<i>Considerazioni sui flussi</i>	219
6.4.5	<i>Velocità di flusso</i>	221
6.4.6	<i>Diagramma dimensionamento rapido</i>	222
6.4.7	<i>Perdite di carico localizzate</i>	224
6.4.8	<i>Esempio pratico di dimensionamento rete</i>	229
6.5	Dilatazione termica lineare.....	235
6.5.1	<i>Compensatori di dilatazione termica lineare</i>	240
6.5.2	<i>Dilatazione termica della sezione</i>	244



6.6	Reti ausiliarie	245
6.6.1	<i>Reti idrauliche percolati e condense</i>	245
6.6.2	<i>Reti aria compressa</i>	250
6.6.3	<i>Reti elettriche</i>	253
6.7	Tipologie costruttive	254
6.7.1	<i>Il Polietilene</i>	254
6.7.2	<i>La giunzione delle linee</i>	265
6.7.3	<i>Collaudi delle linee</i>	268
6.7.4	<i>La posa in opera delle linee</i>	269

CAPITOLO 7

REGOLAZIONE DELLA RETE	277
7.1 Criteri di regolazione	277
7.2 Parametri di regolazione	281
7.2.1 <i>Pressione relativa</i>	282
7.2.2 <i>Portata</i>	284
7.2.3 <i>Qualità del biogas</i>	285
7.3 Attuatori di regolazione.....	287
7.3.1 <i>Regolazione manuale</i>	288
7.3.2 <i>Regolazione automatica</i>	288
7.3.3 <i>Dove applicare la regolazione automatica</i>	294
7.4 Dotazioni di regolazione	299
7.5 Valvole a farfalla	306
7.6 Valvole a sfera	309
7.7 Valvole a membrana	311
7.8 Valvole a saracinesca	312
7.9 Valvole a sede inclinata	312
7.10 Valvole a flusso avviato	315



CAPITOLO 8

MISURA DEL BIOGAS.....	317
8.1 Parametri ambientali	317
8.1.1 <i>Barometria</i>	317
8.1.2 <i>Umidità e pluviometria</i>	319
8.1.3 <i>Temperatura atmosferica</i>	319
8.1.4 <i>Ventosità</i>	320
8.2 Misura della pressione relativa	320
8.2.1 <i>Manometri a colonna liquida</i>	322
8.2.2 <i>Manometri a quadrante</i>	324
8.2.3 <i>Manometri digitali</i>	326
8.2.4 <i>Modi e criteri di misura</i>	327
8.3 Analisi della qualità	328
8.3.1 <i>Modi e criteri di misura</i>	331
8.4 Misura della portata	333
8.4.1 <i>Modi e criteri di misura</i>	341
8.5 Misura di temperatura.....	343
8.6 Misura dei livelli.....	345
8.7 Registrazione dei dati	346
8.7.1 <i>Report manuali</i>	347
8.7.2 <i>Report automatici</i>	358

CAPITOLO 9

TRATTAMENTO DEL BIOGAS.....	361
9.1 Pre-trattamenti	361
9.1.1 <i>Separazione dei liquidi</i>	361
9.1.2 <i>Deumidificazione</i>	370
9.1.3 <i>Separazione del particolato</i>	373
9.1.4 <i>Assorbimento</i>	373
9.1.5 <i>Adsorbimento</i>	377

9.2	Aspirazione e compressione	382
9.2.1	<i>Dimensionamento</i>	384
9.3	Combustione in torcia	389
9.3.1	<i>Dotazioni</i>	399
9.3.2	<i>Dimensionamenti</i>	400
9.4	Ossidazione biologica	404

CAPITOLO 10

RECUPERO ENERGETICO	409
10.1 Rendimenti di trasformazione	410
10.2 Termico	412
10.2.1 <i>Combustione diretta</i>	412
10.2.2 <i>Acqua calda</i>	413
10.2.3 <i>Vapore</i>	414
10.2.4 <i>ORC</i>	415
10.3 Elettrico con motori endotermici.....	416
10.4 Elettrico con microturbine.....	421
10.5 Elettrico con ORC	422
10.6 Cogenerazione	422
10.7 Per autotrazione	423
10.8 Per uso domestico.....	423
10.9 Accumulo	424

CAPITOLO 11

MONITORAGGIO DEL BIOGAS.....	427
11.1 Quando eseguire il monitoraggio	427
11.2 Programma di monitoraggio	428

11.3 Dove eseguire il monitoraggio	430
11.4 Azione di bonifica sulle dotazioni di monitoraggio.....	431
11.5 Dotazioni di monitoraggio.....	432
11.6 Come eseguire il monitoraggio	435
11.7 Strumenti per il monitoraggio.....	436
11.8 Registrazione dei dati	436

CAPITOLO 12

PROTOCOLLO DI GESTIONE	437
12.1 Definizioni.....	437
12.2 Frequenza degli interventi	438
12.3 Manutenzione ordinaria.....	438
12.4 Manutenzione straordinaria.....	438
12.5 Procedure d'intervento	438
12.6 Finalità degli interventi.....	440
12.7 Strumentazione di gestione.....	441

CAPITOLO 13

IL CONTROLLO DELLE EMISSIONI DI BIOGAS.....	443
13.1 Come eseguire la valutazione delle emissioni di biogas	447
13.1.1 <i>Valutazione per misura</i>	447
13.1.2 <i>Valutazione per calcolo</i>	448
13.1.3 <i>Valutazione per stima</i>	449
13.1.4 <i>Valutazioni miste</i>	449
13.2 Proposte operative.....	449
13.3 Valutazione dell'efficienza di captazione	452



13.4	Indagine emissioni diffuse con camera di cattura	452
13.4.1	<i>Metodologia di indagine</i>	453
13.4.2	<i>Definizione del numero dei punti di monitoraggio</i>	454
13.4.3	<i>Condizioni ambientali al momento dell'indagine</i>	455
13.4.4	<i>Descrizione della strumentazione necessaria</i>	456
13.4.5	<i>Svolgimento dell'indagine</i>	458
13.5	Indagine emissioni con termografia aerea	461

CAPITOLO 14

	ISTRUZIONI D'USO MODELLO DI CALCOLO BIO-5	463
14.1	Il Modello di calcolo BIO-5	463
14.1.1	<i>Criteri generali di calcolo</i>	465
14.1.2	<i>Valutazioni probabilistiche</i>	466
14.2	Efficienza di captazione	466
14.3	Istruzioni d'uso del modello BIO-5	472
14.3.1	<i>Inserimento dei dati</i>	472
14.3.2	<i>Valutazioni probabilistiche</i>	476
14.4	Esempio d'uso del modello BIO-5	476

INTRODUZIONE



La presente monografia affronta uno degli aspetti più critici delle discariche controllate per lo smaltimento dei rifiuti solidi: la produzione di gas biologico meglio noto come "biogas".

Molto spesso nel passato si è considerata la "pericolosità" di una discarica come proporzionale alla sua capacità di diffondere liquami (percolati) nel terreno lasciando in secondo ordine l'effetto delle emissioni di biogas. Solo nei tempi più recenti si è approfondita la tematica della captazione e trattamento dei biogas sulla spinta di differenti stimoli; in primo luogo alcuni incidenti, anche molto gravi, hanno evidenziato la pericolosità del biogas, successivamente si è valutato il potere energetico del biogas (composto principalmente da metano) identificando il fluido come fonte energetica rinnovabile. Infine i meccanismi introdotti dal protocollo di Kyoto hanno stimolato le iniziative di riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra tra le quali assume una importanza rilevante l'emissione di metano dalle discariche.

Tali differenti e svariati stimoli hanno incrementato l'interesse nei confronti delle problematiche della captazione del biogas ed hanno conseguentemente sviluppato Normative indirizzate alla riduzione e controllo delle emissioni di biogas. Si è quindi incominciato a formare una diversa concezione progettuale delle discariche atta al maggiore controllo del fenomeno produttivo del biogas ed alla massimizzazione della captazione.

Occorre ricordare che la problematica, o la risorsa, rappresentata dalla presenza di biogas non riguarda solo le discariche in fase di realizzazione o gestione ma è riferibile anche alle discariche chiuse, anche da decenni. Il fenomeno decompositivo può durare numerosi anni e quindi rappresentare una problematica "latente" sul territorio.

L'autore del presente testo si occupa di discariche e di biogas fin dalla fine degli anni '70 e ha svolto attività di consulenza su centinaia di impianti in Italia e nel Mondo. Tale esperienza ha indotto l'autore ad avere una grande "umiltà" di approccio ad ogni nuovo caso avendo imparato sul campo che non esistono due discariche uguali tra loro. Questa premessa non vuole ridurre l'utilità del presente testo ma induce gli utenti ad avere una grande attenzione a tutti i particolari ed a non dare nulla per scontato.

Gli argomenti trattati nel testo toccheranno numerosi aspetti scientifici e tecno-

logici senza però avere la presunzione di svilupparli nel dettaglio. Argomentazioni di chimica, biologia, fisica elementare, geologia, idraulica, ingegneria, ed altri ancora verranno affrontati con stile "manualistico" lasciando agli utenti, qualora interessati, l'approfondimento specifico su testi scientifici.

Questa monografia è indirizzata ai tecnici che operano nel settore, siano essi progettisti di nuovi impianti, gestori di reti di captazione del biogas oppure operatori impegnati nel controllo ambientale.

IL FENOMENO PRODUTTIVO DEL BIOGAS

Nel seguito vengono illustrati i principali fenomeni che concorrono al processo di biogassificazione dei rifiuti, nonché i principali fattori che influenzano qualità e quantità del biogas prodotto.

La decomposizione dei rifiuti solidi in uno scarico controllato assume spesso aspetti vari e complessi: principalmente processi fisici, chimici e biologici, che agiscono simultaneamente alla degradazione della componente organica dei rifiuti stessi.

Per **degradazione fisica** s'intende la trasformazione delle componenti del rifiuto che comporta il mutamento delle caratteristiche fisiche del rifiuto stesso, fra cui la riduzione del volume. Fra i fenomeni fisici si possono inoltre ricordare la precipitazione di sostanze, nonché i fenomeni di assorbimento e di rilascio di sostanze.

Per **degradazione chimica** s'intende il complesso delle reazioni che avvengono tra le diverse sostanze componenti il rifiuto; ha riflessi anche nella qualità dei percolati, con variazione della solubilità, del potenziale redox e del pH.

Il principale meccanismo di decomposizione dei rifiuti in discarica è però la **degradazione biologica**, cioè la trasformazione della materia per opera di microrganismi, quali i batteri.

La degradazione biologica si svolge in varie fasi, le principali delle quali risultano:

- la fase aerobica;
- la fase facoltativa anaerobica;
- la fase metanigena anaerobica.

1.1 Fase aerobica

La degradazione aerobica avviene subito dopo il deposito dei rifiuti nello scarico controllato a seguito dell'impiego, da parte dei microrganismi, dell'ossi-



geno libero. Questo viene prelevato dall'aria inglobata nella discarica durante la deposizione del rifiuto o penetrata dopo la chiusura (ad es. per l'aspirazione eccessiva del sistema di captazione del biogas). Il processo utilizza altresì l'ossigeno disciolto nell'acqua meteorica infiltrata dal capping di chiusura della discarica.

Il processo di degradazione aerobica è quindi legato alla disponibilità di ossigeno ed è quindi normalmente di breve durata (da qualche ora ad alcuni mesi) e comunque proporzionale alla tipologia gestionale della discarica.

Il fenomeno è inoltre legato alla tipologia dei rifiuti.

Nella prima fase il fenomeno è favorito dalla presenza nel rifiuto di sostanze facilmente e rapidamente degradabili.

Il **processo aerobico è fortemente esotermico** (produzione di calore che può raggiungere temperature di 70° C) ed è caratterizzato da emissioni di anidride carbonica, acqua e sostanze organiche parzialmente degradate.

1.2 Fase facoltativa anaerobica (acida)

La decomposizione facoltativa anaerobica avviene quando la disponibilità di ossigeno è ridotta al punto in cui non è più possibile un processo aerobico.

Gli organismi presenti, definiti facoltativi, prediligono l'ossigeno libero ma, se esso è assente, possono utilizzare l'ossigeno "legato".

Caratteristiche di questa fase sono la produzione di anidride carbonica, una minore generazione di energia termica rispetto al processo aerobico e una notevole produzione di sostanza organica parzialmente degradata, la maggior parte della quale è costituita da acidi organici. Detti acidi, con l'anidride carbonica disciolta, si ritrovano inoltre nel percolato a cui conferiscono un certo livello di acidità.

1.3 Fase metanigena anaerobica

Lo stadio finale della decomposizione dei rifiuti organici consiste nella decomposizione metanigena anaerobica. In questa fase gli organismi convertono la sostanza organica, parzialmente degradata dagli organismi aerobici facoltativi, in metano ed anidride carbonica.

A seguito del consumo dei substrati solubili, la produzione di metano diviene dipendente dall'idrolisi della cellulosa; peraltro detta frazione contiene la più alta quantità di carbonio potenzialmente convertibile in metano.



Le caratteristiche di questa fase sono sempre la produzione di energia termica (comunque inferiore rispetto alla fase aerobica), l'utilizzazione di materia organica disciolta, la produzione di metano ed anidride carbonica, nonché l'aumento del pH con valori vicini alla neutralità.

Gli effetti della decomposizione metanigena sono quelli che maggiormente interessano il presente testo.

Gli studi condotti da numerosi ricercatori hanno accertato che di norma la fase metanigena si instaura dopo un periodo variabile tra i 3 e i 9 mesi dalla deposizione del rifiuto. Una volta avviata la fase metanigena, la produzione di biogas si manifesta, normalmente, per parecchi anni (anche oltre 40), secondo un andamento che evidenzia la massima produzione nei primi anni e un progressivo esaurimento asintotico fino alla completa degradazione della sostanza organica o fino a quando esistono le condizioni ambientali idonee al processo.

1.4 Fase conclusiva aerobica

Teoricamente al completamento della fermentazione metanigena, in assenza di sovrappressione, gli interstizi alveolari della discarica tendono ad essere pervasi nuovamente da aria che consentirebbe residui fenomeni fermentativi aerobici.

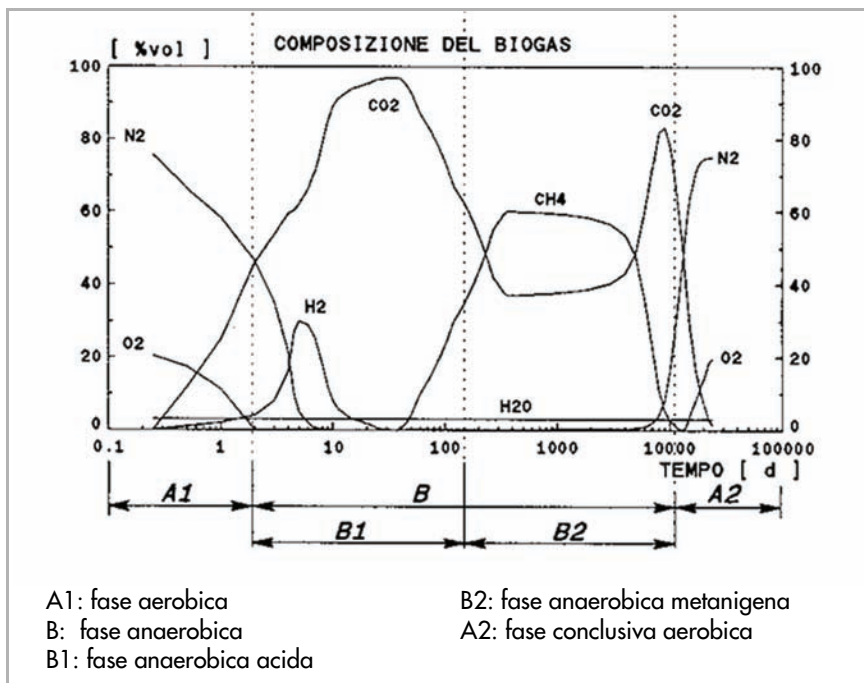


Figura 1.1
Grafico indicativo della fermentazione dei rifiuti (A. Damiani, M. Gandolla - 1992)

1.5 Osservazioni sulla fenomenologia produttiva

La fenomenologia produttiva del biogas è stata appena accennata in quanto si ritiene che il suo approfondimento sia poco determinante per un manuale pratico di progettazione e gestione della captazione del biogas.

La rappresentazione grafica riportata nella figura 1.1 è quindi puramente indicativa della fenomenologia "tipica", della cronologia temporale e delle percentuali produttive dei differenti gas.

Esistono numerosi studi in letteratura sull'argomento con conclusioni spesso contrastanti. La differenziazione espressa (differenti fasi di decomposizione) è facilmente evidenziabile in laboratorio su campioni di rifiuto inseriti in camere sperimentali dove è possibile monitorare i parametri fisici ed "isolare" il fenomeno.

In una discarica "reale" la differenziazione dei fenomeni è invece molto complessa. La decomposizione del rifiuto avviene in zone limitrofe della stessa discarica dove intervengono numerose variabili connesse al conferimento ed alla gestione dei rifiuti. Intervengono inoltre variabili "ambientali" tipiche di un impianto aperto (temperatura, barometria, precipitazioni, ventosità).

Tali importanti influenze "variabili" differenziano il fenomeno di produzione del biogas da discarica da quello che avviene in un digestore anaerobico dove tutti i fattori sono sotto controllo.

Si portano ad esempio alcune delle variabili che influiscono sulla fermentazione che possono intervenire in discarica:

- i rifiuti organici chiusi in sacchetti possono sviluppare la fase aerobica già prima di arrivare in discarica;
- un trattamento di frantumazione oppure di forte compattazione dei rifiuti comporta una notevole riduzione dei vuoti all'interno dell'ammasso, riducendo quindi le quantità di ossigeno libero disponibile per le fasi di decomposizione aerobica;
- una mancanza di captazione di biogas (metano ed anidride carbonica) dagli strati più profondi della discarica causa una sovrappressione che tende a saturare gli interstizi più superficiali allontanandone l'ossigeno;
- una eccessiva captazione di biogas dagli strati più profondi può richiamare forzatamente aria nei rifiuti e ristabilire una fermentazione aerobica anche in zone già caratterizzate da fenomeni metanigeni.
- le variazioni barometriche "naturali" dell'atmosfera possono variare la presenza di aria negli strati più superficiali del deposito



Come evidente è quasi impossibile definire esattamente l'influenza di una fenomenologia fermentativa rispetto ad un'altra. È però importante che l'utente di questo manuale sappia valutare tipologicamente la discarica al fine di identificare le ricadute sui fenomeni di produzione del biogas.

Discariche che consentono una consistente fermentazione aerobica, quali ad esempio le discariche poco compattate, oppure gestite a "cumuli" di rifiuti stesi saltuariamente, oppure con una morfologia molto esposta (discariche in forte elevazione), oppure poco "coperte", tendono a ridurre una importante parte del carbonio biogassificabile senza produrre metano. La mancanza di metano nella fase aerobica impedisce ogni tipo di trattamento (combustione o recupero energetico) di questo tipo di biogas.

Esiste inoltre il rischio che la fenomenologia fermentativa descritta inverta la propria evoluzione tipica consentendo il reinstaurarsi di una fase aerobica a causa di anomalie del sistema di captazione (eccessiva aspirazione).

Nel seguito del testo considereremo la sola fase di fermentazione anaerobica metanigena in grado di produrre un biogas con una elevata concentrazione di metano idoneo quindi al trattamento per combustione o recupero.

1.6 Fattori che influenzano la produzione di biogas

La degradazione anaerobica della componente organica dei rifiuti è condizionata dai fenomeni chimici, fisici e biologici precedentemente descritti, esistono comunque numerosi fattori in grado di influenzare positivamente o negativamente il fenomeno descritto. Di seguito si illustrano alcuni di questi fattori influenzanti.

1.6.1 *Caratteristiche dei rifiuti*

Il primo elenco dei fattori influenzanti è riferibile alle caratteristiche del rifiuto smaltito.

Ovviamente nulla è più eterogeneo di un rifiuto e molto spesso è difficile poter disporre di una caratterizzazione tipologica e merceologica precisa. Nelle discariche più moderne, con l'avvento della raccolta differenziata e la presenza di impianti di selezione e recupero a monte della discarica, è molto più facile definire una tipologia dei rifiuti mentre nelle discariche più vecchie o realizzate in Paesi non ancora dotati di specifiche Normative o Regolamentazioni il termine "rifiuto" è molto ampio.

Si riportano di seguito alcune caratteristiche dei rifiuti che influiscono sulla produzione di biogas.

1.6.1.1 Composizione

Ovviamente la merceologia dei rifiuti conferiti è determinante nella fenomenologia produttiva, specialmente la presenza di sostanza organica biogassificabile è alla base del fenomeno.

Maggiori dettagli sull'argomento verranno approfonditi nella sezione di valutazione analitica della produttività.

1.6.1.2 Pezzatura

Le dimensioni delle particelle costituenti la massa eterogenea dei rifiuti possono avere effetti contrastanti sulla metanogenesi. Da una parte, la riduzione della pezzatura aumenta sensibilmente la superficie reattiva e di conseguenza il processo di idrolisi, con effetti potenzialmente molto rilevanti sul tasso di produzione del biogas. D'altra parte, l'esposizione di un'ampia superficie al processo di idrolisi può condurre alla rapida formazione di acidi grassi volatili. Tali acidi possono deprimere il pH a valori tossici per la popolazione batterica metanigena. La riduzione della pezzatura comporta inoltre la diminuzione dell'indice dei vuoti nella massa dei rifiuti con il conseguente aumento della densità, con gli effetti sotto descritti.

1.6.1.3 Densità

L'effetto della densità sulla produzione di biogas non è stato ancora del tutto chiarito e quantificato. Risulta, infatti, da studi sperimentali, che la densità può avere effetti contrastanti sulla produzione di biogas. Diminuendo la capacità di campo dei rifiuti si tende ad aumentare la diffusione e la distribuzione nella massa di rifiuti dell'umidità e di tutti gli elementi presenti nella fase acquosa (microrganismi, nutrienti ecc.). La superficie totale reattiva della frazione solida diminuisce e pertanto anche la velocità di idrolisi della sostanza organica. In rifiuti secchi, si è riscontrato un aumento della produzione di biogas all'aumentare della densità (Rees J.F. – 1981 - Major affecting methane production in landfills) a differenza di quanto avviene in rifiuti con umidità maggiore.

Nei rifiuti secchi probabilmente il primo meccanismo tende a prevalere sul secondo, mentre nei rifiuti umidi, in cui spesso si è già inizialmente in condizioni di saturazione capillare, il primo meccanismo è poco o per nulla influente.

In seguito alla compattazione effettuata nelle operazioni di pretrattamento e



deposito nello scarico controllato si ha un aumento della densità dei rifiuti a cui si può associare un fenomeno di "spremitura" di parte dell'acqua trattenuta sotto forma di umidità che tende a saturare la massa dei rifiuti.

Occorre inoltre considerare che la riduzione della capacità di campo dei rifiuti, a seguito di un incremento di densità, ostacola la trasmissività ai gas degli stessi. In pratica il biogas si sposta con maggiore difficoltà e la captazione forzata è meno efficace.

In sintesi è possibile valutare che basse densità (0,3 – 0,5 t/m³) influiscano negativamente sul fenomeno di fermentazione, così come alte densità (> 1,5 t/m³) possano consentire veloci saturazioni da parte dei percolati e difficoltà di trasmissività dei gas. Ne consegue che la densità ideale dovrebbe essere compresa tra 0,5 e 1,5 t/m³.

Occorre infine distinguere la densità ottenuta dai trattamenti (compattazione in discarica o pre-compattazione) dalla densità tipica legata alla massa dei rifiuti sovrastanti. Un metro cubo di rifiuti subirà pertanto una prima "compattazione" al momento della deposizione in discarica (oppure l'ha già subita in stabilimento nel caso di balle pre-confezionate) raggiungendo una densità tipica. Tale densità sarà poi incrementata in proporzione al peso dei rifiuti che sovrasteranno lo stesso metro cubo di rifiuti.

1.6.2 Umidità

L'umidità dei rifiuti all'atto del deposito nello scarico controllato, dipende dalla composizione dei rifiuti, dalle condizioni climatiche e dalle tecniche di raccolta o pre-trattamento.

Risulta che i rifiuti di cucina e quelli di giardino hanno il più elevato tasso di umidità, mentre carta e cartoni presentano valori ben più bassi. La maggior parte dell'umidità riscontrabile nelle frazioni cellulosiche deriva dall'assorbimento di acqua dalle altre componenti della miscela di rifiuti, durante il processo di formazione dei rifiuti solidi.

La funzione dell'umidità nel processo di metanogenesi è triplice:

- consentire l'attività dei microrganismi;
- creazione di una interfaccia solido-liquido;
- diffusione ottimale nell'ammasso dei microrganismi e dei nutrienti nel substrato idrolizzato.

Numerose esperienze, di laboratorio e sul campo, hanno mostrato un aumento consistente della produzione di biogas all'aumentare dell'umidità; è stato altre-

si riscontrato, che una volta stabilizzate la diffusione e l'interfaccia solido-liquido, l'umidità aggiuntiva non ha effetti rilevanti sulla metanogenesi.

Successivamente al deposito in discarica, l'umidità dell'ammasso dei rifiuti normalmente varia in funzione dei seguenti fattori:

- Disponibilità idriche:
 - percolazione acque meteoriche;
 - afflusso acque sotterranee (falde, sorgenti);
 - afflusso acque superficiali di scorrimento dall'esterno;
 - eventuale ricircolo di percolato,
- Condizioni ambientali:
 - temperatura atmosferica;
 - irraggiamento solare;
 - ventosità della zona.
- Caratteristiche della superficie di copertura:
 - tipologia della stratigrafia del capping (spessori, caratteristiche materiali, pendenze);
 - presenza e tipo di vegetazione.
- Caratteristiche dei rifiuti:
 - densità;
 - pezzatura;
 - umidità al momento dello smaltimento.
- Modalità di impermeabilizzazione del fondo e delle pareti della discarica.

All'atto del conferimento in discarica i rifiuti si trovano normalmente in condizioni insature, e sono quindi in grado di assorbire acqua fino a raggiungere la saturazione capillare, oltre la quale si ha la formazione di percolato.

L'acqua assorbita dai rifiuti può essere comunque rilasciata successivamente, negli strati superficiali per evapotraspirazione e negli strati più bassi per azione della compressione.

Il contributo, positivo o negativo, dovuto alla produzione o al consumo di acqua, associabile alle diverse reazioni biochimiche di degradazione aerobica e anaerobica della sostanza organica, è limitato e normalmente trascurabile nel bilancio ideologico per una discarica aperta.



Quando la discarica viene invece chiusa, specialmente nel caso di stratigrafie di copertura molto efficienti dal punto di vista della riduzione delle infiltrazioni di acqua, la maggior parte delle variabili precedentemente descritte viene quasi annullata e gli elementi di apporto del bilancio ideologico tendono ad azzerarsi.

Normalmente in tale fase di post-chiusura il pompaggio e l'allontanamento dei percolati continua ad essere eseguito fino alla riduzione minima dei battenti. A questo punto il consumo di acqua da parte della fermentazione diventa determinante fino ad esaurire quasi completamente le disponibilità e quindi inibire gravemente la fermentazione anaerobica dei rifiuti.

Se un settore di discarica viene posto in esercizio nella stagione secca e completato in tempi brevi, vi è la concreta possibilità che l'umidità dei rifiuti non sia sufficiente per un completo sviluppo del fenomeno di produzione di biogas. Studi di laboratorio hanno dimostrato che, in condizioni di bassa umidità, viene prodotta una quantità scarsa o nulla di biogas.

Sperimentazioni in campo, condotte su settori di discarica, hanno anch'esse confermato la forte dipendenza della produzione di biogas dall'umidità, riscontrando minori presenze di biogas prodotto dagli ammassi a basso tenore di umidità.

Alcune tipologie di discariche, definite "bioreattori", basano proprio sul controllo dell'umidità interna alla discarica l'ottimizzazione della produzione del biogas con lo scopo di anticipare e concentrare il fenomeno in tempi più brevi di quelli "naturali".

È quindi definibile che il fattore di umidità interno alla discarica è l'elemento di maggiore importanza nella variabilità della produzione del biogas. Umidità basse (< 30-40%) riducono la fenomenologia produttiva mentre condizioni di saturazione dei rifiuti, oltre ad inibire il fenomeno, ostacolano gravemente lo spostamento e quindi la captazione del biogas.

1.6.3 Temperatura

La produzione di biogas è influenzata dalle temperature all'interno dello scarico controllato, nonché dalle variazioni di queste nel tempo.

In condizioni strettamente anaerobiche ed in presenza di un adeguato isolamento termico, le temperature all'interno della massa di rifiuti possono raggiungere anche 30-50°C.

Sulla base dell'energia di attivazione, necessaria alla produzione di metano, è stato calcolato che la temperatura ottimale per tale processo è di circa 40°C

in quanto legato alla presenza di batteri di gruppo mesofilo.

In base al bilancio termico dello scarico controllato è possibile costruire profili termici, che dimostrano come ad una certa profondità, funzione della capacità isolante degli strati depositi, la temperatura all'interno dello scarico controllato non sia più influenzata dalle condizioni termiche dell'ambiente esterno, ma solo dalla natura esotermica delle reazioni di fermentazione dei rifiuti. È stato inoltre riscontrato che all'aumentare dell'umidità dei rifiuti si ha un aumento dell'energia prodotta dalle reazioni di fermentazione.

1.6.4 Caratteristiche ambientali

Le caratteristiche ambientali influiscono sul fenomeno di produzione del biogas in funzione della morfologia della discarica.

Tanto più una discarica esprime spessori e volumi consistenti minore sarà l'influenza ambientale esterna, discariche di basso spessore (< 10 m) o di limitato volume sono invece più influenzate dalle condizioni al contorno.

Le caratteristiche ambientali influiscono sui fenomeni precedentemente descritti: pertanto una discarica localizzata in un ambiente tropicale caldo e umido con abbondanti precipitazioni avrà una produzione di biogas più rapida e concentrata nel tempo rispetto ad una discarica localizzata in ambienti freddi e siccitosi.

Ne consegue che i fattori influenzanti sono:

- Temperatura ambientale;
- Umidità relativa dell'aria;
- Precipitazioni;
- Ventosità;
- Insolazione (evapotraspirazione);

1.6.5 Caratteristiche gestionali e costruttive

Anche le caratteristiche gestionali e costruttive della discarica influiscono sul fenomeno di produzione del biogas.

Una buona impermeabilizzazione di fondo (naturale, artificiale o mista) consente la raccolta dei percolati e quindi la preservazione dell'umidità necessaria alla fermentazione.

La morfologia della discarica evidenzia l'interfaccia con l'atmosfera esterna:



una discarica molto esposta (ad esempio un rilevato completamente fuori terra) rappresenta minori produzione di biogas anaerobico rispetto ad una discarica poco esposta (ad esempio una cava riempita di rifiuti).

Uno spessore dei rifiuti poco rilevante (< 10 m) aumenta il rischio di infiltrazioni di aria mentre una discarica molto spessa (>40 m) induce a sopporre alte densità dei rifiuti negli strati inferiori con conseguenti maggiori rischi di saturazione da parte dei percolati e bassa trasmissività ai gas.

Anche la gestione del rifiuto è determinante nel processo di fermentazione: una buona compattazione eseguita frequentemente riduce la capacità di campo dei rifiuti e quindi la presenza di aria negli stessi accorciando il fenomeno di fermentazione aerobica e preservando una maggiore quantità di carbonio per la successiva fase anaerobica. La copertura dei rifiuti contribuisce a ridurre l'interfaccia con l'atmosfera e quindi a ridurre la fase fermentativa aerobica, ovviamente la qualità della copertura è proporzionale alla tipologia del materiale ed allo spessore dello stesso.

Nel caso di discariche vecchie o realizzate in paesi con tecnologie non ancora ottimali è possibile incorrere in "usi gestionali" particolari, di notevole influenza, sul fenomeno produttivo del biogas. Si pensi alla pratica della combustione volontaria a cielo aperto dei rifiuti che riduce inevitabilmente la presenza di sostanza organica (in particolare cellulosica) dalla massa dei rifiuti, oppure alla presenza di ricercatori (waste peckers) di rifiuti che tendono a sottrarre alcune categorie di rifiuti (in particolare carta e cartone) interessate dalla fermentazione. Ulteriore influenza al processo di fermentazione dei rifiuti, è la potenziale presenza di mandrie di animali (bovini, ovini, suini) che pascolano sulla discarica sottraendo sostanze organiche velocemente putrescibili e rilasciando altre sostanze organiche ... già digerite.

1.7 Osservazioni sui fattori influenzanti

Come illustrato i fattori che possono influenzare la fermentazione dei rifiuti sono numerosi ed ogni discarica può evidenziare la presenza contestuale di questi aspetti. Non sempre gli impianti di captazione del biogas vengono realizzati o gestiti su discariche moderne dove vengono attuate le migliori tecniche di conduzione, spesso gli interventi sono rivolti ad impianti costruiti numerosi anni fa oppure in paesi con tecnologie ambientali in fase di sviluppo.

Per tali motivi l'osservatore che deve valutare la realizzazione di un impianto di captazione del biogas deve essere estremamente attento a questi fattori influenzanti senza però poter disporre valutazioni analitiche precise dell'inci-

denza sul fenomeno. Sarà infatti molto difficile avere tutte le informazioni necessarie per una esatta valutazione dell'impianto; in primo luogo perché alcune informazioni non sono "misurabili" (ad esempio la porzione di rifiuti bruciati, oppure l'esposizione all'atmosfera).

Anche le informazioni più precise, quali ad esempio la composizione merceologica dei rifiuti, sono spesso molto aleatorie in quanto riferite a indagini basate su campioni non sempre espressamente rappresentativi di tutti i conferimenti; solo le discariche che ricevono rifiuti esclusivamente da altri impianti di trattamento (discariche di filiera) hanno la possibilità di avere dati merceologici più precisi.

Ulteriore esempio della difficoltà nel disporre dati precisi è riferibile alla valutazione dell'umidità interna alla massa dei rifiuti. Molto spesso nello stesso impianto coesistono condizioni di saturazione e condizioni di carenza di umidità. Queste osservazioni non servono a demoralizzare il lettore circa la possibilità nel disporre di dati precisi e certi sulla coltivazione di una discarica ma dovrebbero stimolare l'attenzione alle osservazioni soggettive che spesso non trovano riscontro in nessun documento "ufficiale".

Il progettista dovrebbe essere dunque un buon "osservatore" in grado di rilevare tutti i molteplici aspetti di un impianto caratterizzato proprio dalla ampia variabilità delle caratteristiche.

ISTRUZIONI D'USO MODELLO DI CALCOLO BIO-5

14.1 Il Modello di calcolo BIO-5

Il modello di calcolo BIO-5 è stato elaborato direttamente dall'Autore del presente manuale e viene allegato al testo in forma di foglio elettronico Excel per Windows®. Nei capitoli successivi verranno fornite le istruzioni ed i consigli applicativi per l'applicazione del modello.

Il modello di previsione produttiva del biogas (LFG) **BIO-5** nasce dall'evoluzione delle precedenti versioni dello stesso modello di calcolo sviluppate fin dal 1982 ed è quindi da ritenersi antecedente, come approccio di calcolo, ai modelli già descritti nel Capitolo 4 a pag. 79.

La prima versione del modello, denominata **BIO-1**, era stata sviluppata in linguaggio basic su una consolle da gioco con appena 64 Kb di memoria RAM. BIO-1 attribuiva una "produttività" di biogas fissa per ogni singola tonnellata smaltita in discarica (come il software LANDGEM) ed eseguiva esclusivamente una elaborazione sovrapposizione di effetti.

La seconda versione del modello: **BIO-2** del 1987, inseriva una valutazione di produttività specifica del rifiuto applicando i concetti espressi dal Prof. Tabasaran nel 1982 (*Obtention et valorisation du metahne a partir de dechets urbains. Tribune de Cebedeau, 35, 483-8*).

Le maggiori difficoltà erano però la disponibilità dei dati di input da inserire nelle formule. In effetti nelle discariche "reali", specialmente in quel periodo, i dati specifici erano pochi e le analisi merceologiche dei rifiuti molto rare. Sulla base di tali difficoltà l'Autore ha ritenuto di inserire una serie di informazioni meno scientifiche ma più facilmente accessibili da utilizzarsi come elementi "correttivi" del modello di calcolo. Viene pertanto elaborato un questionario di facile compilazione per l'acquisizione di tutte le informazioni sulla discarica.

Nasce quindi nel 1991 il modello **BIO-3**, subito aggiornato in **BIO-4** (maggiori informazioni nel questionario). Con queste versioni era possibile elaborare



una produzione specifica di biogas per ogni singola tonnellata di rifiuto in funzione delle sue caratteristiche merceologiche. I dati del questionario consentivano la definizione di un coefficiente correttivo di produttività (K_p) che modificava la produzione specifica; di seguito si procedeva con la sovrapposizione degli effetti in funzione degli afflussi dei rifiuti.

Il modello **BIO-4** consentiva inoltre di definire, in funzione delle caratteristiche della discarica, l'efficienza di captabilità (K_c) e quindi stimare i quantitativi di biogas captabile e recuperabile.

Nonostante l'evoluzione del modello ed i risultati soddisfacenti di attendibilità, verificati su numerosi impianti "pilota", le difficoltà erano sempre legate alla scarsa precisione dei dati di input del modello.

La discarica è infatti un ambiente molto eterogeneo, ben diverso dai lisimetri da laboratorio con i quali venivano elaborati numerosi modelli che si affacciavano in letteratura scientifica o nei congressi. Per tale motivo l'Autore ha voluto introdurre un concetto "probabilistico" da legare ai dati di input, in pratica anziché inserire un valore specifico per un dato ne venivano inseriti due, corrispondenti ai due estremi probabilistici. Ovviamente più la "forchetta" dei singoli dati era ampia minore era la precisione del risultato.

Su tale concetto nasce nel 2001 il modello **BIO-5** che è stato utilizzato per circa 7 anni su centinaia di discariche in Italia e nel Mondo. Il modello ottimizzava ulteriormente il questionario di acquisizione dati portandolo a rendere disponibili ben **17 fattori correttivi** dei coefficienti di produzione specifica (K_p) e di efficienza di captazione (K_c).

La maggiore novità era comunque legata all'approccio probabilistico con la definizione dei due estremi valutativi: **Best Case** e **Worst case**.

Nel 2005 al modello **BIO-5** viene aggiunta una ulteriore possibilità di valutare automaticamente la riduzione di emissioni di gas ad effetto serra (GHG) seguenti l'attivazione o l'ottimizzazione di un sistema di captazione del biogas. Tale integrazione, non sostanziale, assume la denominazione di **BIO-6**.

Nel 2008, sulla scorta delle numerosissime esperienze sviluppate, e dei continui risultati di riscontro applicati agli impianti "pilota" viene studiata una nuova versione del modello di prospezione produttiva: la **BIO-7**.

Il questionario viene di nuovo ottimizzato e reso di più semplice compilazione mediante la predisposizione di alcune risposte pilotate, i dati di input passano da 17 a 34. Il modello di calcolo della produzione specifica viene radicalmente rivisto ed approfondito.

Figura 14.1

Logo
modello di
calcolo
BIO-7



Viene approfondita la valutazione dell'umidità interna della discarica mediante la determinazione del **fattore Kud**.

Dal 2009 è pertanto disponibile il modello **BIO-7**.

14.1.1 Criteri generali di calcolo

BIO-5 utilizza un algoritmo derivato da un modello biochimico molto simile a quello presentato nel Capitolo 4 a pag. 79 come modello "teorico", che, ottimizzando sperimentalmente i parametri applicati al modello base, consente di costruire una curva "standard" di produzione unitaria.

I summenzionati parametri "corretti", introdotti nell'elaborazione biochimica, dipendono principalmente dalla caratterizzazione dell'ambiente di decomposizione.

La prima fase della valutazione è quindi orientata alla definizione della produttività specifica media di una singola tonnellata di rifiuto smaltito. Per ottenere tale dato si valuta merceologicamente la composizione del rifiuto smaltito suddividendolo in due frazioni differenziabili per la cinetica di fermentazione:

- Frazione velocemente biodegradabile (definita RVP);
- Frazione lentamente biodegradabile (definita RLP).

Ottenuta la valutazione di produttività specifica delle due frazioni RVP e RLP si procede all'applicazione di un coefficiente di produttività (K_p) che definisce le condizioni tipiche di fermentazione dell'impianto osservato.

Di particolare importanza ed influenza è l'umidità interna alla discarica (K_{ud}). Definite le produttività totali di gas per singola frazione di rifiuto si passa alla determinazione della cinetica di decomposizione.

Il modello di calcolo definisce il tempo di semitrasformazione (T_s) della sostanza organica inteso come il tempo necessario al dimezzamento della porzione biogassificabile iniziale.

Anche in questo caso il T_s viene valutato separatamente per le due frazioni RVP e RLP.

Essendo noto il tempo di semitrasformazione vengono di conseguenza calcolate le massime produzioni annuali ed i coefficienti di regressione (K_r) ed infine le produzioni specifiche anno per anno.

Nel modello di calcolo viene considerata una produzione di 40 anni.

L'ultima fase dell'elaborazione consiste nella sovrapposizione degli effetti legati alle quantità di rifiuti smaltiti con la cronologia di deposizione in discarica e conseguentemente con la valutazione della produzione teorica annua.



14.1.2 Valutazioni probabilistiche

Come dichiarato in precedenza, lo studio delle previsioni di produzione è normalmente basato sull'attribuzione di un considerevole numero di variabili, imposte spesso arbitrariamente, che condizionano l'elaborazione finale. Di conseguenza l'attendibilità delle previsioni fornite dal modello BIO-5 è funzione dell'affidabilità dei suddetti valori, peraltro non sempre facilmente disponibili e pertanto spesso frutto di valutazioni soggettive basate sull'esperienza del progettista.

Per tali motivazioni è parso opportuno condurre un'analisi basata sull'assunzione di uno spettro di differenti "scenari", in chiave probabilistica.

Detti scenari sono compresi fra due "casi limite":

best case:

prospezione condizionata dall'applicazione di valori "ottimistici" (nel senso della massima produzione di biogas) a tutte le variabili non certe;

worst case:

prospezione condizionata dall'applicazione di valori "pessimistici" (nel senso della minima produzione di biogas) a tutte le variabili non certe.

14.2 Efficienza di captazione

I modelli di calcolo del biogas presentati e proposti consentono di valutare, pur con differenti percorsi scientifici e pratici, la produzione di biogas di una discarica.

Non tutto il biogas prodotto può essere però intercettato e trattato da un impianto di captazione; è pertanto necessario definire un criterio di "efficienza di captazione" inteso come il rapporto tra il biogas effettivamente captabile ed il biogas prodotto.

Normalmente tale fattore viene riconosciuto come K_c

Le motivazioni che giustificano una efficienza di captazione non totale ($K_c < 1$) sono legati a molteplici aspetti.

In primo luogo la discarica è un impianto "aperto" dove l'ambiente di digestione anaerobica della componente organica dei rifiuti è difficilmente confinato, in particolar modo verso l'atmosfera. La morfologia della discarica è spesso complessa ed in continua evoluzione.

I fattori ambientali influiscono consistentemente e continuamente sulla fermentazione.



tazione e rendono difficoltosa una azione di captazione perfettamente bilanciata; si pensi per esempio alle variazioni barometriche che modificano in continuazione i parametri ottimali di applicazione della depressione alla rete di captazione.

Tra gli elementi che influenzano l'efficienza dell'impianto di captazione, dipendenti dalle caratteristiche del deposito di rifiuti, si elencano:

- grado di compattazione dei rifiuti;
- tipologia merceologica dei rifiuti;
- spessore dei rifiuti;
- saturazione dei rifiuti da parte del percolato;
- tipologia e permeabilità degli strati di infracopertura;
- tipologia e permeabilità degli strati di copertura finale.

Tali caratteristiche sono differenti tra ogni discarica e spesso possono essere differenti anche in diverse zone della stessa discarica.

Il coefficiente di efficienza K_c dovrebbe inoltre comprendere anche le porzioni di biogas che vengono ossidate naturalmente negli strati superficiali, definiti "corticali" della discarica. L'incidenza di tale porzione di biogas ossidata è definita nel modello UNFCCC come fattore OX ed è stimata tra lo 0 ed il 10%. Tale fattore è molto variabile ed è influenzato dalla presenza del sistema di captazione del biogas e dal tipo di copertura della discarica. Nel caso di assenza di captazione è presumibile una pressione interna positiva all'interno della massa dei rifiuti alla quale corrisponde una esalazione in atmosfera, favorita da una eventuale assenza di copertura.

In secondo luogo l'efficienza di captazione è influenzata dalla tipologia della rete e del relativo impianto di captazione del biogas.

Molto spesso il fattore K_c è legato anche alla valutazione di una **esistenza effettiva o parziale dell'impianto di captazione**. In molte discariche non esiste un impianto di captazione, oppure viene realizzato molto dopo il conferimento dei rifiuti, spesso dopo la chiusura della discarica: in questi casi il K_c è uguale a 0. Più frequentemente l'impianto di captazione viene attivato nel corso della coltiviazione della discarica per mezzo di elementi "provvisori", integrativi o parziali, in questo caso l'efficienza di captazione è proporzionale alla effettiva disponibilità delle dotazioni di captazione.

Dopo la chiusura della discarica, o di una sezione o lotto della stessa discarica, normalmente le dotazioni di captazione vengono completate e l'efficienza di captazione raggiunge le massime prestazioni.

Tra gli elementi che influenzano l'efficienza dell'impianto di captazione dipendenti dalle caratteristiche stesse della rete di captazione si elencano:

- densità della rete di captazione (interasse dei pozzi o degli altri elementi predisposti);
- depressione applicata agli elementi di captazione;
- caratteristiche costruttive degli elementi di captazione;
- allagamento degli elementi di captazione da parte dei percolati.

Nel periodo successivo alla chiusura della discarica l'impianto di captazione continuerà a funzionare per diverse decine di anni, è quindi ovvio che la rete di captazione subirà gli effetti della vetustà ed in particolare subirà i fenomeni tipici di una discarica quali l'assestamento della massa dei rifiuti e la produzione del percolato. È pertanto prevedibile che il coefficiente di efficienza subirà una fase regressiva proporzionale al livello di manutenzione applicato.

Nella valutazione della captabilità del biogas, applicata alla produzione teorica definita dai modelli di calcolo, il fattore K_c viene assunto per stima arbitraria. Viene attribuito pertanto un valore "fisso" rappresentativo di tutte le fasi precedentemente descritte.

Molto spesso tale fattore non viene neppure giustificato ma imposto.

Anche il modello BIO-5, proposto come elemento di calcolo, impone un K_c , ma tale fattore viene determinato sulla base della acquisizione di una numerosa serie di informazioni tipiche della discarica e dell'impianto di captazione

Da uno studio svolto a livello internazionale dalla Università di Strathclyde (USA) nel 2002, svolto su 2.364 discariche negli Stati Uniti e 55 discariche in Europa, è emerso lo stato medio dell'arte relativamente all'efficienza di captazione del biogas.

Le discariche sono state suddivise per categoria di capacità e ad ogni categoria sono stati applicati i modelli di calcolo standard per la valutazione delle produzioni: CAA, AP-42 ed EPA.

I risultati sono stati confrontati con le prestazioni di captazione, per la verifica di efficienza.

Si riportano le seguenti valutazioni:

- Discariche USA, modello CAA:

Efficienza	media:	48,28%
	massima:	62,18%
	minima:	34,38%



- Discariche USA, modello AP-42:

Efficienza	media:	69,22%
	massima:	86,45%
	minima:	51,99%

- Discariche USA, modello EPA:

Efficienza	media:	49,00%
	massima:	78,40%
	minima:	19,61%

- Discariche UE, modello CAA:

Efficienza	media:	48,28%
	massima:	62,18%
	minima:	34,38 %

È evidente che la variabilità dei valori è elevata e le medie di prestazioni sono riferibili alla tipologia del modello di calcolo utilizzato. È comunque interessante osservare che le maggiori prestazioni di efficienza di captazione sono nell'ordine del 60 – 80%. Solo le maggiori prestazioni calcolate con il modello AP-42 superano l'86%, ma tale modello di calcolo è considerato "prudenziale" come è evidente sul confronto dei dati medi.

Ne consegue che lo stato dell'arte internazionale identifica una media di efficienza di circa il 50%, con prestazioni di massima efficienza nell'ordine del 70%.

Tale osservazione conferma la valutazione di Gandolla e Damiani fatte nel 1992 (Gestione del biogas da discariche controllate – Istituto per l'Ambiente): *"È comunque importante sottolineare che risulta impossibile captare la totalità del biogas prodotto per svariati motivi, tra cui le inevitabili perdite in atmosfera ed il rendimento stesso del sistema di captazione. Cautelativamente quindi è opportuno supporre una captazione massima del 45 ÷ 55% del biogas teoricamente generabile"*

Più recentemente le Normative e le Prescrizioni degli Enti di Controllo ed Autorizzativi hanno teso ad elevare tale prestazione di efficienza di captazione.

L'Ente Inglese EA (Environmental Agency) ha emesso nel 2004 la norma: DFTGN 03 "Guidance on the management of landfill gas" che cita, in merito alla efficienza di captazione: *"The annual collection efficiency for methane should be compared against a value of 85 per cent. This collection efficiency*

should be achieved in that part of the landfill where gas collection must be taking place (i.e. the capped areas of the site)."

L'ARTA Abruzzo (Agenzia Regionale Tutela Ambiente) ha definito alcune Linee Guida per le emissioni di biogas da Discariche (link: <http://www.arta-abruzzo.it/download/normative/aria/LineeGuidaBiogas.pdf>).

Dove viene indicata una efficienza media di captazione variabile tra il 60% (fase operativa) e l'80% (dopo la chiusura).

Infine la Provincia di Torino, negli Atti Autorizzativi e Prescrittivi delle discariche insistenti nel proprio territorio ha indicato una efficienza di captazione minima dell'85% da raggiungersi dopo la chiusura della discarica.

Sulla base di tali numerosi riferimenti di letteratura e Normativi e in considerazione dell'esperienza maturata **si propone di considerare, come elemento di riferimento, una efficienza di captazione (Kc) dell'80 - 85% da raggiungersi alla chiusura della discarica.**

Il fattore di efficienza dovrà essere considerato come nettamente inferiore nella fasi di coltivazione della discarica, inoltre si propone un fattore di regressione nella fasi di post-chiusura. **In pratica si propone l'uso di un Kc variabile al posto del Kc fisso.**

Nell'esempio di seguito riportato si suppone una discarica che viene "coltivata" per 7 anni, durante questo periodo viene attivato l'impianto di captazione del biogas (al terzo anno di gestione). Il riferimento percentuale è riferito alla produzione di biogas, che è ovviamente variabile nel tempo. Per semplificare la valutazione dell'esempio viene assunta tale produzione come costante e pari al 100%.

Nella tabella e nel grafico riportati si suppone il seguente scenario:

- Nei primi due anni (-7 e -6 rispetto alla chiusura) non esistendo nessuna dotazione di captazione il Kc è pari a zero, si suppone però una elevata ossidazione;
- Dal terzo anno (-5) entra in funzione la captazione, anche se parziale e non perfettamente efficiente, si riduce ovviamente il fattore di ossidazione;
- Negli anni successivi si incrementa il fattore di captazione e si riduce il fattore di ossidazione;
- Nell'anno di chiusura della discarica si suppone la massima efficienza di captazione, la minima ossidazione ed esalazione in atmosfera.
- Negli anni successivi alla chiusura si suppone una lenta regressione prestazionali ed un progressivo incremento della ossidazione.

Tab. 14.1 – Esempio pratico di variabilità Fattori di efficienza di captazione ed ossidazione corticale

ANNI DI RIFERIMENTO RISPETTO ALLA CHIUSURA DELLA DISCARICA	FATTORE DI EFFICIENZA DI CAPTAZIONE Kc	FATTORE DI OSSIDAZIONE CORTICALE Kox	PORZIONE DI BIOGAS ESALATO
-7		20%	80%
-6		20%	80%
-5	40%	15%	45%
-4	45%	10%	45%
-3	50%	8%	42%
-2	55%	5%	40%
-1	65%	3%	32%
chiusura	85%	0%	15%
1	83%	1%	16%
2	82%	2%	16%
3	80%	3%	17%
4	78%	4%	18%
5	77%	5%	18%
6	75%	6%	19%
7	74%	7%	19%
8	72%	8%	20%
9	71%	9%	20%
10	69%	10%	21%

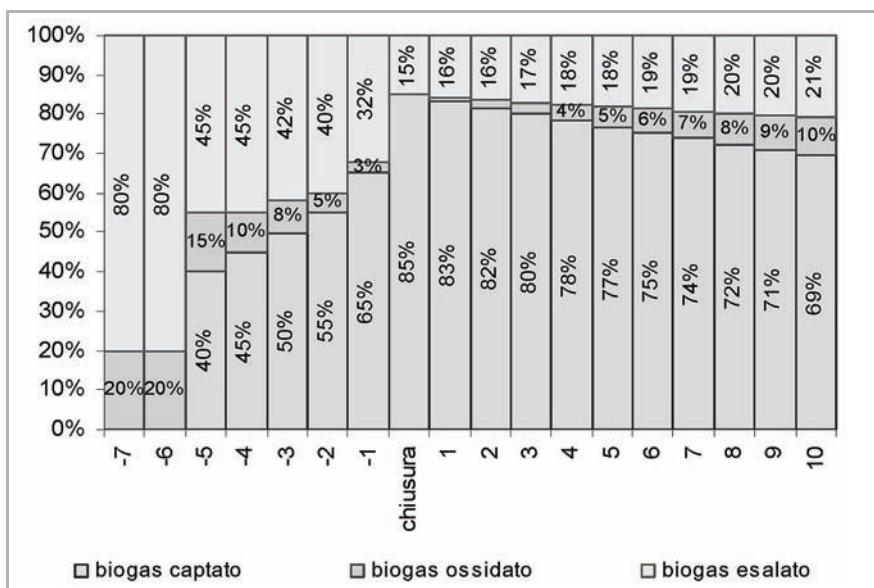


Figura 14.2
 – Grafico variabilità Fattori di efficienza di captazione ed ossidazione corticale (riferimento tab. 14.1)

14.3 Istruzioni d'uso del modello BIO-5

Come premesso al presente manuale viene allegato il software di calcolo della produzione di biogas **BIO-5**. Nel presente capitolo vengono riportate le istruzioni di utilizzo di tale modello di calcolo.

Il software, in formato Excel per Windows®, ha il nome: bio-5.xls e può essere facilmente installato su ogni PC dotato di sistema operativo Windows.

Il file comprende 3 fogli:

- **Data:** comprende tutte le informazioni necessarie per lo sviluppo del modello che l'utente dovrà inserire;
- **Bio:** comprende i risultati analitici del calcolo;
- **Tab:** comprende il foglio di calcolo;
- **Grafico:** comprende la rappresentazione grafica della produzione teorica e captabile del biogas.

Compilando il foglio **data** è possibile inserire le variabili nel modello mentre i dati della prospezione saranno accessibili nei fogli **bio**, **tab** e **grafico**.

Nel foglio data possono essere modificate solo le caselle gialle che identificano l'inserimento dei dati di input, le rimanenti caselle sono bloccate per evitare modifiche accidentali al modello.

14.3.1 Inserimento dei dati

Nel foglio **data** sono elencate tutte le informazioni necessarie allo svolgimento del calcolo.

La prima sezione riguarda la **merceologia dei rifiuti (MR)**, nell'elenco disponibile sono riportate le categorie di rifiuti più frequenti e nella prima colonna a destra devono essere riportate le incidenze note all'utente.

Si riporta di seguito la copia della tabella così come rappresentata nel file con una ipotesi di compilazione.

Tab. 14.2 - Esempio pratico di inserimento delle variabili MR relative alla merceologia dei rifiuti

MERCEOLOGIA RIFIUTI		%	Ci	fb	u
MR1	organico - residui alimentari	30,00%	55,00%	70,00%	45,00%
MR2	residui giardino	5,00%	50,00%	70,00%	45,00%
MR3	carta e cartone	20,00%	50,00%	60,00%	8,00%
MR4	tessili e cuoio	2,00%	50,00%	20,00%	10,00%
MR5	legno	4,00%	50,00%	50,00%	20,00%

Tab. 14.2 (segue) - Esempio pratico di inserimento delle variabili MR relative alla merceologia dei rifiuti

MERCEOLOGIA RIFIUTI		%	Ci	fb	u
MR6	plastica e gomma	20,00%	70,00%	0,00%	2,00%
MR7	vetro e inerti	14,00%	0,00%	0,00%	3,00%
MR8	metalli	5,00%	0,00%	0,00%	3,00%

Qualora fossero note le caratterizzazioni specifiche dei rifiuti (umidità, incidenza carbonio e porzione biodegradabile) potrà essere possibile modificare anche queste. Nel caso invece non fossero disponibili tali dati sarà possibile mantenere come default i parametri già presenti nella tabella.

- Ci:** porzione percentuale di carbonio organico su base secca della porzione di rifiuto;
- fb:** frazione biodegradabile del Carbonio organico (Ci);
- u:** contenuto d'acqua della porzione di rifiuto.

Qualora fossero presenti altre categorie di rifiuti sarà possibile procedere ad una assimilazione alla categorie già descritte modificando adeguatamente i parametri caratterizzanti (Ci, fb, u).

Nella seconda sezione sarà necessario inserire il **fattore di umidità interno alla discarica Kud**, tale parametro è riferito alle condizioni specifiche interne dell'impianto e non alle categorie di rifiuti. Per esempio nel caso di un rifiuto molto umido conferito in una discarica localizzata in una zona arida e con sistemi di copertura molto efficienti tali seconde valutazioni dovranno essere predominanti alla valutazione di umidità del rifiuto.

Il valore di default proposto è del 50% e rappresenta un fattore prossimo alla "neutralità".

Per discariche molto umide possono essere inseriti fattori Kud di circa il 65 ÷ 70% mentre per discariche molto secche o dotate di coperture "impermeabili" che impediscono l'afflusso di acqua meteorica si può stimare un fattore limite Kud di circa il 35 ÷ 40%.

In questa valutazione occorre ricordare che l'acqua presente nei rifiuti al conferimento viene utilizzata dai fenomeni bio-chimici di trasformazione e pertanto tende a ridursi nel tempo e quindi deve essere necessariamente "integrata".

Nella terza sezione viene affrontata la **cronologia dei conferimenti dei rifiuti (CR)**, viene proposta una tabella dove è necessario inserire il primo anno di conferimento ed automaticamente si evidenzieranno gli anni successivi.



A fianco di ogni anno occorrerà inserire il dato di conferimento dei rifiuti espresso in tonnellate.

Si riporta in allegato un esempio di compilazione per una discarica iniziata nel 2004 e coltivata per 4 anni.

Tab. 14.3 – Esempio pratico di inserimento delle variabili CR relative ai conferimenti storici dei rifiuti

CR	CONFERIMENTI RIFIUTI	ANNO	CONFERIMENTO	
CR1	1° conferimento rifiuti	2004	125.369	t RS
CR2	2° conferimento rifiuti	2005	246.398	t RS
CR3	3° conferimento rifiuti	2006	452.000	t RS
CR4	4° conferimento rifiuti	2007	625.000	t RS
CR5	5° conferimento rifiuti	2008		t RS
CR6	6° conferimento rifiuti	2009		t RS
CR7	7° conferimento rifiuti	2010		t RS

Nelle sezioni successive del foglio data viene riportato un questionario contenente 22 informazioni sulla discarica e sul sistema di coltivazione.

Le prime 9 informazioni caratterizzano il coefficiente di produzione K_p mentre le successive identificano il coefficiente di captabilità K_c .

L'utente dovrà identificare la situazione o l'informazione che comprende la condizione effettiva e riportare il fattore proposto nella casella gialla corrispondente al **fattore attribuito** al modello.

Nell'esempio successivo viene valutata la piovosità della zona, l'utente ha ritenuto che la piovosità media sia compresa tra 800 e 1.000 mm/m² ed ha quindi riportato il valore "95" nella casella gialla.

Tab. 14.4 – Esempio pratico di compilazione di uno dei quesiti del questionario

A	PRECIPITAZIONE MEDIA ANNUA (mm/m2)		
A1	sconosciuta	fattore	100
A2	meno di 600 mm	fattore	80
A3	tra 600 e 800 mm	fattore	90
A4	tra 800 e 1000 mm	fattore	95
A5	tra 1000 e 1500 mm	fattore	100
A6	tra 1500 e 2000 mm	fattore	102
A7	oltre 2000 mm	fattore	105
		FATTORE ATTRIBUITO	95



L'utente sarà libero di personalizzare il fattore attribuito (casella gialla) sulla base della propria discrezionalità, per esempio in una zona desertica con piogge poco presenti il fattore inserito potrà essere molto più basso di quello minimo proposto (es. 75).

Si precisa che alcune informazioni sono ripetute sia nella sezione di valutazione del K_p che in quella di valutazione del K_c con fattori tra loro differenti. Per esempio la valutazione della impermeabilità della copertura della discarica viene considerata come "negativa" nella determinazione del coefficiente di produzione K_p in quanto tende a limitare l'umidità della discarica.

Lo stesso parametro viene però considerato come positivo nella valutazione del coefficiente di captabilità K_c in quanto tende a limitare le infiltrazioni di aria nel sistema. In poche parole, una copertura impermeabile tende a ridurre la produzione di biogas ma consente di captarlo meglio.

Una volta completata la sezione del questionario con i dati richiesti sarà sufficiente spostarsi al foglio **bio** per la valutazione dei dati. Nella parte alta del foglio bio viene rappresentata una tabella con tutti i dati di calcolo relativi alla produzione specifica di una singola tonnellata di rifiuto ed alla produzione complessiva della discarica.

Nella tabella viene inoltre considerato il **coefficiente di captabilità K_c come elemento "fisso"** e viene quindi riportata la produzione captabile ad esso riferita. Nell'ipotesi che l'utente volesse "personalizzare" il coefficiente di captabilità così come proposto nella Tabella 14.1 potrà essere conveniente copiare i dati della previsione di produttività teorica (colonna M del foglio elettronico **tab**) in un nuovo foglio di excel ed attribuire per ogni anno il coefficiente K_c più adeguato.

Nelle colonne più a destra sono riportate delle valutazioni di diluizione del biogas con aria (biogas al 40 ed al 30% di metano).

Nel caso la discarica oggetto dello studio fosse composta da più lotti si consiglia di elaborare il modello BIO-5 per ogni singolo lotto come se si trattasse di una singola discarica. I risultati finali delle singole elaborazioni potranno essere sovrapposti in un foglio elettronico separato con il metodo del "copia - incolla".

Nel caso la discarica in oggetto fosse caratterizzata da un cambiamento della qualità dei rifiuti conferiti, ad esempio attribuibile all'entrata in servizio di una raccolta differenziata, oppure alla attivazione di un impianto di trattamento, sarà possibile elaborare ogni singola fase di conferimento come fosse riferibile ad una singola discarica per poi sovrapporre i risultati delle elaborazioni, come sopra indicato.

14.3.2 Valutazioni probabilistiche

Come più volte affrontato nel presente testo non sempre è possibile disporre di dati di input "certi", Nel caso le incertezze fossero consistenti si propone di elaborare una doppia elaborazione.

La prima elaborazione, definibile "best case", dovrebbe considerare tutti i fattori variabili nella loro "migliore probabilità" intesa come la probabilità di maggiore produzione di biogas; in questa ipotesi i fattori K_p (coefficiente di produzione) e K_c (coefficiente di captabilità) saranno i più elevati.

La seconda elaborazione, definibile "worst case", dovrebbe invece contemplare le variabili pessimistiche, intese come le probabilità minori di produzione del biogas, K_p e K_c saranno ovviamente più contenuti.

Si prenda per esempio la tabella precedente relativa alle precipitazioni annue, se il dato non è certo sarà possibile nell'ipotesi best case considerare una ipotesi ottimistica (es: variabile A4, tra 800 e 1000 mm di precipitazioni annue - fattore variabile: 95) mentre nell'ipotesi worst case considerare una ipotesi pessimistica (es: variabile A3, tra 600 e 800 mm di precipitazioni annue - fattore variabile: 90).

Occorre comunque considerare che troppe "variazioni" tendono a definire una variabilità tra le due ipotesi probabilistiche (best e worst case) troppo ampia con il rischio di ottenere una prospezione produttiva poco precisa. Si consiglia pertanto di applicare la variabilità solo per i dati poco certi, lasciando invece variabili "uniche" per i dati più facilmente verificabili.

14.4 Esempio d'uso del modello BIO-5

Si procede di seguito con un esempio applicativo del modello **BIO-5** al fine di agevolare l'uso dello stesso.

La prima fase riguarda la compilazione della tabella relativa alla composizione merceologica dei rifiuti conferiti in discarica. Nella tabella qui sotto riportata sono stati inserite alcune variabili che rappresentano una ipotetica merceologia, non sono state invece modificate le variabili di default circa le ulteriori caratteristiche (C_i , f_b e u). Nelle due ultime colonne a destra si evidenziano le percentuali di Carbonio organico e Carbonio biodegradabili considerate nel modello (valori di calcolo non modificabili).



Tab. 14.5 – Esempio pratico di compilazione della tabella MR

MERCEOLOGIA RIFIUTI		%	Ci	fb	u	C org	C bio
MR1	organico - residui alimentari	32,66%	55,00%	70,00%	45,00%	6,92%	4,84%
MR2	residui giardino	4,79%	50,00%	70,00%	45,00%	0,92%	0,65%
MR3	carta e cartone	18,85%	50,00%	60,00%	8,00%	5,20%	3,80%
MR4	tessili e cuoio	4,45%	50,00%	20,00%	10,00%	0,40%	0,26%
MR5	legno	4,29%	50,00%	50,00%	20,00%	0,86%	0,51%
MR6	plastica e gomma	18,65%	70,00%	0,00%	2,00%	0,00%	0,00%
MR7	vetro e inerti	11,09%	0,00%	0,00%	3,00%	0,00%	0,00%
MR8	metalli	5,22%	0,00%	0,00%	3,00%	0,00%	0,00%

La seconda fase riguarda l’inserimento del fattore di umidità Kud, nell’ipotesi di calcolo **si è considerata una umidità interna alla discarica del 48%**.

Si precisa che la considerazione non è fatta sulla tipologia dei rifiuti (valutata nella tabella precedente) ma sulla valutazione dell’ambiente complessivo di fermentazione.

Tab. 14.6 - Esempio pratico di compilazione della tabella Kud

FATTORE UMIDITÀ DISCARICA (Kud)	48	%
---------------------------------	-----------	---

La terza fase riguarda la compilazione della tabella relativa alla cronologia di conferimento dei rifiuti in discarica.

Nella tabella qui sotto riportata si è ipotizzato un inizio dei conferimenti dei rifiuti in discarica nell’anno 1998 ed un conferimento di 14 anni, fino all’anno 2011; nella compilazione basta inserire il primo anno mentre i successivi saranno automaticamente rappresentati.

Per gli anni fino al 2009 (anno di presunta compilazione del questionario) sono noti i dati a consuntivo dei conferimenti mentre per gli anni di gestione futura (2010 e 2011) si è stimata un previsione.

Complessivamente è stato considerato un conferimento complessivo di circa 1,5 milioni di tonnellate di rifiuti.

Tab. 14.7 - Esempio pratico di compilazione della tabella dei conferimenti rifiuti CR

CR	CONFERIMENTI RIFIUTI	anno	conferimento	
CR1	1° conferimento rifiuti	1998	52.660	t RS
CR2	2° conferimento rifiuti	1999	75.860	t RS

Tab. 14.7 (segue) - Esempio pratico di compilazione della tabella dei conferimenti rifiuti CR

CR	CONFERIMENTI RIFIUTI	anno	conferimento	
CR3	3° conferimento rifiuti	2000	84.500	t RS
CR4	4° conferimento rifiuti	2001	85.920	t RS
CR5	5° conferimento rifiuti	2002	110.450	t RS
CR6	6° conferimento rifiuti	2003	150.550	t RS
CR7	7° conferimento rifiuti	2004	65.000	t RS
CR8	8° conferimento rifiuti	2005	48.900	t RS
CR9	9° conferimento rifiuti	2006	150.900	t RS
CR10	10° conferimento rifiuti	2007	170.600	t RS
CR11	11° conferimento rifiuti	2008	120.480	t RS
CR12	12° conferimento rifiuti	2009	133.780	t RS
CR13	13° conferimento rifiuti	2010	120.000	t RS
CR14	14° conferimento rifiuti	2011	120.000	t RS
CR15	15° conferimento rifiuti	2012	0	t RS
CR16	16° conferimento rifiuti	2013	0	t RS
CR17	17° conferimento rifiuti	2014	0	t RS
CR18	18° conferimento rifiuti	2015	0	t RS
CR19	19° conferimento rifiuti	2016	0	t RS
CR20	20° conferimento rifiuti	2017	0	t RS
CR21	21° conferimento rifiuti	2018	0	t RS
CR22	22° conferimento rifiuti	2019	0	t RS
CR23	23° conferimento rifiuti	2020	0	t RS
CR24	24° conferimento rifiuti	2021	0	t RS
CR25	25° conferimento rifiuti	2022	0	t RS
CR26	26° conferimento rifiuti	2023	0	t RS
CR27	27° conferimento rifiuti	2024	0	t RS
CR28	28° conferimento rifiuti	2025	0	t RS
CR29	29° conferimento rifiuti	2026	0	t RS
CR30	30° conferimento rifiuti	2027	0	t RS
CR31	31° conferimento rifiuti	2028	0	t RS
CR32	32° conferimento rifiuti	2029	0	t RS
CR33	33° conferimento rifiuti	2030	0	t RS
CR34	34° conferimento rifiuti	2031	0	t RS
CR35	35° conferimento rifiuti	2032	0	t RS
CR36	Totale conferimento rifiuti	1.489.600		t RS



Di seguito si procede con le valutazioni proposte del questionario.

Nella prima sezione vengono valutate le variabili che incidono sulla produttività della discarica.

La prima variabile riguarda la piovosità media della zona e quindi la potenziale capacità di umidificazione della massa dei rifiuti con acqua piovana.

Nell'ipotesi considerata si suppone una piovosità media compresa tra 600 ed 800 millimetri per metro quadro.

Tab. 14.8 - Esempio pratico di compilazione della tabella A del questionario

A	PRECIPITAZIONE MEDIA ANNUA (mm/m2)		
A1	sconosciuta	fattore	100
A2	meno di 600 mm	fattore	80
A3	tra 600 e 800 mm	fattore	90
A4	tra 800 e 1000 mm	fattore	95
A5	tra 1000 e 1500 mm	fattore	100
A6	tra 1500 e 2000 mm	fattore	102
A7	oltre 2000 mm	fattore	105
FATTORE ATTRIBUITO			90

La seconda variabile riguarda la possibilità di ulteriori (oltre la pioggia) afflussi idrici "naturali" nella massa dei rifiuti.

Nell'ipotesi considerata non si ritiene che tali afflussi esistano e pertanto il "voto" attribuito (100) risulta essere "neutro" e quindi non influente sulla variazione del Kp.

Tab. 14.9 - Esempio pratico di compilazione della tabella B del questionario

B	ALTRI AFFLUSSI IDRICI		
B1	sconosciuti od inesistenti	fattore	100
B2	ipotesi di falde limitate in connessione	fattore	102
B3	ipotesi di falde consistenti in connessione	fattore	105
B4	corpi idrici superficiali limitati	fattore	102
B5	corpi idrici superficiali consistenti	fattore	105
FATTORE ATTRIBUITO			100

La terza variabile riguarda la possibilità di afflussi idrici di natura "gestionale" nella massa dei rifiuti, afflussi pertanto voluti e controllati. In tale scenario si inseriscono le discariche "bioreattori" per le quali il "voto" può essere addirittura incrementato.

Nell'ipotesi considerata tali afflussi non esistono e pertanto il "voto" attribuito (100) risulta essere "neutro" e quindi non influente sulla variazione del Kp.

Tab. 14.10 - Esempio pratico di compilazione della tabella C del questionario

C	RICIRCOLO DEI PERCOLATI IN DISCARICA		
C1	non viene eseguito	fattore	100
C2	eseguito limitatamente	fattore	103
C3	eseguito normalmente	fattore	108
FATTORE ATTRIBUITO			100

La quarta variabile riguarda la consuetudine gestionale di coprire frequentemente i rifiuti con terreno od altro materiale al fine di evitare esportazioni "eoliche" dei rifiuti o per motivi di ordine sanitario. In funzione del tempo di permanenza della copertura questa può essere realizzata in modi differenti. Anche la disponibilità naturale dei materiali di copertura influisce sulla scelta del "voto".

Nell'ipotesi considerata si è ritenuto che le coperture intermedie siano state realizzate con terreni di natura poco permeabile (argille, limi o simili) e pertanto il voto attribuito (92) è penalizzante poiché tale tipo di copertura ostacola la diffusione dei liquidi nella massa dei rifiuti.

Tab. 14.11 - Esempio pratico di compilazione della tabella D del questionario

D	COPERTURE INTERMEDIE DELLA DISCARICA		
D1	non eseguite	fattore	100
D2	eseguite con materiali drenanti (sabbia, ghiaia, macerie)	fattore	104
D3	eseguite con materiali impermeabili (argilla, limi)	fattore	92
D4	eseguite con materiali sintetici	fattore	98
FATTORE ATTRIBUITO			92

La quinta variabile riguarda la copertura definitiva della discarica, dopo il termine dei conferimenti. Tale variabile viene considerata penalizzante se limita eccessivamente l'apporto di acqua pluviale nella massa dei rifiuti.

Nell'ipotesi considerata si è ritenuto che la copertura finale sia spessa ed impermeabile e quindi il voto attribuito (98) è stato penalizzante per il Kp.

**Tab. 14.12** - Esempio pratico di compilazione della tabella E del questionario

E	COPERTURA FINALE DELLA DISCARICA		
E1	poco spessa e permeabile	fattore	102
E2	poco spessa ed impermeabile	fattore	100
E3	spessa e permeabile	fattore	100
E4	spessa ed impermeabile	fattore	98
FATTORE ATTRIBUITO			98

La sesta variabile riguarda la temperatura media annuale della zona della discarica.

Nell'ipotesi considerata si è ritenuto che la discarica sia in una zona temperata con valori medi compresi tra 14 e 18°C e pertanto il voto attribuito è stato premiante.

Tab. 14.13 – Esempio pratico di compilazione della tabella F del questionario

F	TEMPERATURA MEDIA ANNUA ARIA (°C)		
F1	sconosciuta	fattore	100
F2	meno di 5	fattore	90
F3	tra 5 e 10	fattore	98
F4	tra 10 e 14	fattore	100
F5	tra 14 e 18	fattore	102
F6	oltre 18	fattore	104
FATTORE ATTRIBUITO			102

La settima variabile riguarda lo spessore della discarica inteso come lo strato medio dei rifiuti. Discariche poco spesse raggiungono difficilmente una condizione di completa anaerobiosi.

Nell'ipotesi considerata si è ritenuto che la discarica sia abbia uno spessore medio di rifiuti intermedio alle condizioni G3 (tra 10 e 20 metri) e G4 (superiore a 20 metri) e pertanto è stato attribuito un voto "personalizzato" compreso tra i due voti proposti.

Tab. 14.14 - Esempio pratico di compilazione della tabella G del questionario

G	SPESSORE DELLA DISCARICA IN METRI		
G1	tra 0 e 5	fattore	60
G2	tra 5 e 10	fattore	90
G3	tra 10 e 20	fattore	100
G4	oltre 20	fattore	105
FATTORE ATTRIBUITO			103

La ottava variabile riguarda la morfologia della discarica: discariche completamente in sopraelevazione sono molto più esposte delle discariche completamente interrata (es. cave di tufo); indipendentemente dallo spessore dei rifiuti. Nell'ipotesi considerata si è ritenuto di una discarica con una porzione di volume "esposto" compresa tra il 10 ed il 30%.

Tab. 14.15 - Esempio pratico di compilazione della tabella H del questionario

H	PORZIONE DI DISCARICA FUORI TERRA (IN ELEVAZIONE)		
H1	meno del 10%	fattore	100
H2	tra il 10 e 30%	fattore	98
H3	tra il 30 e 50%	fattore	95
H4	tra il 50 e 80%	fattore	90
H5	oltre 80%	fattore	85
FATTORE ATTRIBUITO			98

Infine la nona variabile riguarda la tipologia della gestione della discarica. Nell'ipotesi considerata si è valutata una moderna ed adeguata gestione della discarica in oggetto ed è pertanto stato attribuito un voto "neutro". Nel caso di discariche molto vecchie o mal gestite è invece necessario attribuire un voto penalizzante.

Tab. 14.16 - Esempio pratico di compilazione della tabella I del questionario

I	TIPO DI GESTIONE		
I1	discarica non gestita e completamente aerobica	fattore	50
I2	discarica gestita parzialmente, gestione semi-aerobica	fattore	75
I3	discarica gestita correttamente, gestione anaerobica	fattore	100
FATTORE ATTRIBUITO			100

Nella seconda parte del questionario sono valutate la variabili che incidono sulla captabilità del biogas e quindi determinano il fattore Kc.

La decima variabile riguarda la geometria della discarica: discariche con geometrie molto "complesse" sono più difficili da porre sotto controllo rispetto ad impianti con forme semplici.

Nell'ipotesi considerata si è ipotizzata una discarica con una forma

tronco-piramidale molto regolare (base rettangolare) localizzata in una zona di pianura (piana). Tale scenario è considerato neutro e pertanto il voto attribuito è stato 100.

Tab. 14.17 - Esempio pratico di compilazione della tabella L del questionario

L	GEOMETRIA DELLA DISCARICA		
L1	forma regolare in piano	fattore	100
L2	forma regolare in valle	fattore	95
L3	forma irregolare in piano	fattore	95
L4	forma irregolare in valle	fattore	90
L5	in celle fisicamente separate	fattore	90
VALORE ATTRIBUITO			100

L'undicesima variabile riguarda lo spessore della discarica inteso come lo strato medio dei rifiuti.

Tale valutazione era già stata proposta nella considerazione del Kp ma in questo caso il voto è basato su concetti differenti: discariche poco spesse sono difficilmente "captabili" mentre discariche molto spesse hanno problemi opposti ma egualmente limitanti, in questo caso il voto neutro è intermedio.

Nell'ipotesi considerata si è ritenuto che la discarica sia abbia uno spessore medio di rifiuti compreso tra 10 e 20 metri.

Tab. 14.18 - Esempio pratico di compilazione della tabella M del questionario

M	SPESSORE DELLA DISCARICA (IN METRI)		
M1	tra 0 e 5	fattore	60
M2	tra 5 e 10	fattore	90
M3	tra 10 e 20	fattore	100
M4	tra 20 e 30	fattore	90
M5	oltre 30	fattore	80
VALORE ATTRIBUITO			100

Anche la dodicesima variabile era già stata proposta nella considerazione del Kp e riguarda la porzione "esposta" della massa dei rifiuti e quindi il rischio di infiltrazioni di aria dalla parte corticale.

Nell'ipotesi considerata si è ritenuto che la discarica sia abbia una esposizione compresa tra il 10 ed il 30% del proprio volume.



Tab. 14.19 - Esempio pratico di compilazione della tabella N del questionario

N	PORZIONE DI DISCARICA FUORI TERRA (IN ELEVAZIONE)		
N1	meno del 10%	fattore	100
N2	tra il 10 e 30%	fattore	90
N3	tra il 30 e 50%	fattore	80
N4	tra il 50 e 80%	fattore	85
N5	oltre 80%	fattore	70
VALORE ATTRIBUITO			90

La tredicesima variabile riguarda la densità dei rifiuti raggiunta dopo la compattazione e in funzione dei pre-trattamenti ricevuti.

Densità troppo basse implicano il rischio di infiltrazioni di aria (in funzione comunque della quantità dei conferimenti) mentre densità troppo alte rendono riducono la trasmissività ai gas.

Nell'ipotesi considerata si è ritenuto che la discarica sia abbia una densità compresa tra 700 ed 800 kg per metro cubo.

Tab. 14.20 - Esempio pratico di compilazione della tabella O del questionario

O	DENSITÀ DEI RIFIUTI DOPO LA COMPATTAZIONE (Kg/mc)		
O1	tra 400 e 600 kg	fattore	80
O2	tra 600 e 700 kg	fattore	95
O3	tra 700 e 800 kg	fattore	100
O4	tra 800 e 900 kg	fattore	98
O5	tra 900 e 1000 kg	fattore	95
VALORE ATTRIBUITO			100

La quattordicesima variabile (ripetuta) riguarda le coperture intermedie dei rifiuti e l'ostacolo da queste rappresentato nello spostamento dei gas.

Come per la tabella D si è scelta l'opzione relativa alle coperture con terreno poco permeabile, nel caso specifico con materiali sintetici.

Tab. 14.21 - Esempio pratico di compilazione della tabella P del questionario

P	COPERTURE INTERMEDIE DELLA DISCARICA		
P1	non eseguite	fattore	100
P2	eseguite con materiali drenanti	fattore	100
P3	eseguite con materiali impermeabili	fattore	80
P4	eseguite con materiali sintetici	fattore	90
VALORE ATTRIBUITO			90



La quindicesima variabile (ripetuta) riguarda la copertura finale dei rifiuti e la considerazione di ermeticità dell'impianto; in questo caso il voto è "opposto" a quanto espresso nella tabella E.

Come per la tabella E si è scelta l'opzione relativa alle coperture con terreno poco permeabile.

Tab. 14.22 - Esempio pratico di compilazione della tabella Q del questionario

Q	COPERTURA FINALE DELLA DISCARICA		
Q1	poco spessa e permeabile	fattore	80
Q2	poco spessa ed impermeabile	fattore	90
Q3	spessa e permeabile	fattore	90
Q4	spessa ed impermeabile	fattore	100
VALORE ATTRIBUITO			90

La sedicesima variabile è di particolare importanza ma di non semplice valutazione.

Il quesito richiede di valutare quale porzione di rifiuti sia completamente satura di percolati.

La considerazione esposta (voto 85) è stata stimata in una porzione di circa il 30% dello spessore medio dei rifiuti, pertanto il voto è stato "interpolato" tra il voto R2 ed il voto R3.

Tab. 14.23 - Esempio pratico di compilazione della tabella R del questionario

R	PRESENZA DI FALDE DI PERCOLATI		
R1	non esistenti	fattore	100
R2	limitate al 20% dei rifiuti	fattore	95
R3	limitate al 40% dei rifiuti	fattore	80
R4	limitate al 60% dei rifiuti	fattore	50
R5	limitate al 80% dei rifiuti	fattore	30
R6	oltre l'80% dei rifiuti	fattore	20
VALORE ATTRIBUITO			85

La diciassettesima variabile è relativa alla presenza di fanghi urbani od industriali già digeriti nella massa dei rifiuti ed all'ostacolo che questi pongono alla trasmissività ai gas.

La considerazione esposta non prevede la presenza di fanghi.

Tab. 14.24 - Esempio pratico di compilazione della tabella S del questionario

S	PRESENZA DI FANGHI IN DISCARICA		
S1	non presenti	fattore	100
S2	limitati al 10% dei rifiuti	fattore	90
S3	limitati al 30% dei rifiuti	fattore	70
S4	limitati al 50% dei rifiuti	fattore	50
S5	oltre il 50% dei rifiuti	fattore	30
VALORE ATTRIBUITO			100

Dalla diciottesima variabile si prende in considerazione la tipologia del sistema di captazione del biogas

Il quesito è relativo alle caratteristiche del sistema di captazione. Nel caso di sistemi misti sarà necessario soggettivamente interpolare i voti.

La considerazione esposta prevede la presenza pozzi costruiti in elevazione (T6).

Tab. 14.25 - Esempio pratico di compilazione della tabella T del questionario

T	TIPOLOGIA DEL SISTEMA DI CAPTAZIONE		
T1	trincee drenanti sub orizzontali pendenza < 5%	fattore	70
T2	trincee drenanti sub orizzontali pendenza > 5%	fattore	80
T3	perforazioni verticali diametro fino a 300 mm	fattore	80
T4	perforazioni verticali diametro fino a 600 mm	fattore	95
T5	perforazioni verticali diametro fino a 1000 mm	fattore	100
T6	camini costruiti in elevazione	fattore	90
VALORE ATTRIBUITO			90

La diciannovesima variabile riguarda la tipologia della rete di trasporto e di come i singoli elementi sono ad essa collegati.

La considerazione ipotizza che i pozzi siano collegati in parallelo alle dotazioni di regolazione.

Tab. 14.26 - Esempio pratico di compilazione della tabella U del questionario

U	TIPOLOGIA DELLA RETE DI CAPTAZIONE		
U1	in serie (fino a 4 pozzi per ramo)	fattore	90
U2	in serie (oltre 4 pozzi per ramo)	fattore	85
U3	in serie (oltre 8 pozzi per ramo)	fattore	65
U4	in parallelo	fattore	100
VALORE ATTRIBUITO			100



La ventesima variabile riguarda il raggio di influenza delle dotazioni di captazione e quindi la "densità" del sistema di captazione.

La considerazione ipotizza che i pozzi siano posizionati con un raggio di influenza di circa 25-30 metri e quindi con una distanza intermedia tra loro di circa 50 m.

Tab. 14.27 - Esempio pratico di compilazione della tabella V del questionario

V	RAGGIO MEDIO DI INFLUENZA DEI POZZI		
V1	meno di 10 m	fattore	95
V2	tra 10 e 15 m	fattore	90
V3	tra 15 e 20 m	fattore	85
V4	tra 20 e 25 m	fattore	80
V5	tra 25 e 30 m	fattore	70
V6	tra 30 e 35 m	fattore	65
V7	tra 35 e 50 m	fattore	50
VALORE ATTRIBUITO			70

La ventunesima variabile è "alternativa" alla precedente ed è riferita alla eventuale presenza di sistemi sub-orizzontali di captazione meglio noti come "trincee".

La considerazione non ipotizza dotazioni di tale tipo e pertanto il voto attribuito è neutro (100).

Tab. 14.28 - Esempio pratico di compilazione della tabella Z del questionario

Z	RAGGIO MEDIO DI INFLUENZA TRINCEE		
Z1	meno di 10 m	fattore	90
Z2	tra 10 e 15 m	fattore	80
Z3	tra 15 e 20 m	fattore	65
Z4	tra 20 e 25 m	fattore	50
Z5	tra 25 e 30 m	fattore	35
VALORE ATTRIBUITO			100

L'ultima variabile riguarda l'impostazione gestionale data al sistema di captazione.

Nel caso di recupero energetico si prevede una minore incisività dell'azione di captazione e pertanto una minore efficienza di captazione.

Nell'ipotesi considerata si prevede una valutazione intermedia con una qualità di biogas non elevato ma comunque ancora in grado di essere recuperato.

Tab. 14.29 - Esempio pratico di compilazione della tabella X del questionario

X	IMPOSTAZIONE CRITERIO DI CAPTAZIONE		
X1	captazione bonifica spinta (CH4 30%)	fattore	110
X2	captazione bonifica, ipotesi di recupero (CH4 40%)	fattore	100
X3	captazione per recupero (CH4 > 50%)	fattore	90
VALORE ATTRIBUITO			100

Inseriti nel foglio "data" tutti i parametri richiesti (caselle di colore giallo) il modello di calcolo provvederà automaticamente alla elaborazione della prospezione produttiva.

I risultati della prospezione sono rappresentati nella parte alta del foglio "bio"; nella tabella sono riportate tutti i parametri principali elaborati dal modello.

Tab. 14.30 - Risultati della prospezione produttiva - Parametri

PARAMETRO CALCOLATO	SIGLA	VALORE	UNITÀ MISURA
Percentuale rifiuti velocemente putrescibili	RVP	37,45%	
Percentuale rifiuti lentamente putrescibili	RLP	27,59%	
Percentuale rifiuti non putrescibili	RNP	34,96%	
Percentuale rifiuti putrescibili	RP	65,04%	
Carbonio biodegradabile	Corg	142,99	kg / t RS
Carbonio biogassificabile	Cbio	100,60	kg / t RS
Carbonio biogassificabile RVP	Cbio RVP	54,86	kg / t RS
Carbonio biogassificabile RLP	Cbio RLP	45,73	kg / t RS
Biogas producibile	LFG50	187,91	Nm ³ / t RS
Fattore di correzione in funzione dell'umidità	Kud	94%	
Biogas producibile considerato il fattore Kud	Ptu	176,55	Nm ³ / t RS
Biogas producibile considerato il fattore Kud RVP	Ptu RVP	96,29	Nm ³ / t RS
Biogas producibile considerato il fattore Kud RLP	Ptu RLP	80,26	Nm ³ / t RS
Coefficiente di regressione della curva RVP	Kr RVP	0,80415	
Coefficiente di regressione della curva RLP	Kr RLP	0,92992	
Coefficiente cinetico RVP	Ki RVP	0,21798	
Coefficiente cinetico RLP	Ki RLP	0,07266	
Tempo di semitrasformazione RVP	Ts RVP	3,17994	anni
Tempo di semitrasformazione RLP	Ts RLP	9,53981	anni
Biogas producibile nell'arco di 40 anni	Ptu 40	145,78	Nm ³ / t RS
Biogas producibile nell'arco di 40 anni - RVP	Ptu 40 RVP	71,14	Nm ³ / t RS



Tab. 14.30 (segue) - Risultati della prospezione produttiva - Parametri

PARAMETRO CALCOLATO	SIGLA	VALORE	UNITÀ MISURA
Biogas producibile nell'arco di 40 anni - RLP	Ptu 40 RLP	74,64	Nm ³ / t RS
Biogas producibile nell'arco di 40 anni		177.009.102	Nm ³
Coefficiente di produzione Kp	Kp	83,54%	
Biogas producibile con fattore Kp	Ptu Kp	147,50	Nm ³ / t RS
Biogas producibile nell'arco di 40 anni con fattore Kp	Ptu Kp 40	121,79	Nm ³ / t RS
Coefficiente di captabilità Kc	Kc	63,85%	
Biogas captabile con fattore Kc	Ptu Kc	94,18	Nm ³ / t RS
Biogas captabile nell'arco di 40 anni		113.020.312	Nm ³
Primo anno di conferimento		1998	
Numero anni di conferimento		14	anni
Totale rifiuti conferiti		1.489.600	t RS

Nel foglio "tab" viene invece riportata la tabella con i risultati della prospezione produttiva distribuiti nel tempo.

Nella parte sinistra della tabella viene sviluppata la produzione "specificata" di una singola tonnellata di rifiuto nell'arco temporale di 40 anni: la capacità produttiva viene espressa in Nm³ di biogas LFG₅₀ (come per tutte le informazioni restituite dal modello di calcolo) e differita nelle due categorie caratteristiche RVP (Rifiuti Velocemente Putrescibili) e RLP (Rifiuti Lentamente Putrescibili).

Per le due categorie vengono inoltre riportati i tempi di semitrasformazione (Ts). Infine i valori vengono corretti del Coefficiente di produzione attribuito dal modello (Kp).

Tab. 14.31 - Risultati della prospezione produttiva - 1^a sezione

T	PRODUZIONE SPECIFICA		COEFFICIENTE PRODUZIONE = Kp 83,54%		
	RVP	RLP	PRODUZIONE SPECIFICA TOTALE	PRODUZIONE SPECIFICA TOTALE CORRETTA DAL COEFFICIENTE DI PRODUZIONE	
	TEMPO SEMITRASFORMAZIONE				
	3,18	9,54			
anni	m ³ /t/anno	m ³ /t/anno	m ³ /t/anno	Nm ³ /t/anno	Nm ³ /t
1	4,36	1,81	6,17	5,15	5,15
2	13,08	5,42	18,51	15,46	20,61
3	10,52	5,04	15,56	13,00	33,62
4	8,46	4,69	13,15	10,99	44,60

Tab. 14.31 (segue) - Risultati della prospezione produttiva - 1^ sezione

T	PRODUZIONE SPECIFICA		COEFFICIENTE PRODUZIONE = k_p 83,54%		
	R V P	R L P	PRODUZIONE SPECIFICATA TOTALE	PRODUZIONE SPECIFICA TOTALE CORRETTA DAL COEFFICIENTE DI PRODUZIONE	
	TEMPO SEMITRASFORMAZIONE				
	3,18	9,54			
anni	m ³ /t/anno	m ³ /t/anno	m ³ /t/anno	Nm ³ /t/anno	Nm ³ /t
5	6,80	4,36	11,16	9,33	53,93
6	5,47	4,06	9,53	7,96	61,89
7	4,40	3,77	8,17	6,83	68,71
8	3,54	3,51	7,04	5,88	74,60
9	2,84	3,26	6,11	5,10	79,70
10	2,29	3,03	5,32	4,44	84,14
11	1,84	2,82	4,66	3,89	88,03
12	1,48	2,62	4,10	3,43	91,46
13	1,19	2,44	3,63	3,03	94,49
14	0,96	2,27	3,22	2,69	97,19
15	0,77	2,11	2,88	2,40	99,59
16	0,62	1,96	2,58	2,15	101,74
17	0,50	1,82	2,32	1,94	103,68
18	0,40	1,70	2,10	1,75	105,43
19	0,32	1,58	1,90	1,59	107,02
20	0,26	1,47	1,72	1,44	108,46
21	0,21	1,36	1,57	1,31	109,77
22	0,17	1,27	1,44	1,20	110,97
23	0,13	1,18	1,31	1,10	112,07
24	0,11	1,10	1,20	1,01	113,08
25	0,09	1,02	1,11	0,92	114,00
26	0,07	0,95	1,02	0,85	114,85
27	0,06	0,88	0,94	0,78	115,64
28	0,05	0,82	0,87	0,72	116,36
29	0,04	0,76	0,80	0,67	117,03
30	0,03	0,71	0,74	0,62	117,64
31	0,02	0,66	0,68	0,57	118,21
32	0,02	0,61	0,63	0,53	118,74
33	0,02	0,57	0,59	0,49	119,23

Tab. 14.31 (segue) - Risultati della prospezione produttiva - 1[^] sezione

T	PRODUZIONE SPECIFICA		COEFFICIENTE PRODUZIONE = K_p 83,54%		
	R V P	R L P	PRODUZIONE SPECIFICA TOTALE	PRODUZIONE SPECIFICA TOTALE CORRETTA DAL COEFFICIENTE DI PRODUZIONE	
	TEMPO SEMITRASFORMAZIONE				
	3,18	9,54			
anni	m ³ /t/anno	m ³ /t/anno	m ³ /t/anno	Nm ³ /t/anno	Nm ³ /t
34	0,01	0,53	0,54	0,45	119,68
35	0,01	0,49	0,50	0,42	120,10
36	0,01	0,46	0,47	0,39	120,49
37	0,01	0,43	0,43	0,36	120,86
38	0,01	0,40	0,40	0,34	121,19
39	0,00	0,37	0,37	0,31	121,50
40	0,00	0,34	0,35	0,29	121,79

Sempre nella tabella di esposizione temporale dei risultati del modello, nella parte centrale, viene rappresentata l'applicazione della produzione "specifica" di biogas alla cronologia dei conferimenti dei rifiuti consentendo la definizione della produzione oraria di biogas.

Tab. 14.32 - Risultati della prospezione produttiva - 2[^] sezione

T	1° ANNO 1.998	N° ANNI 14	PRODUZIONE TEORICA		
	CRONOLOGIA SCARICO RIFIUTI	SCARICO ANNUO RIFIUTI	PRODUZIONE ANNUA	PRODUZIONE PROGRESSIVA	PRODUZIONE ORARIA
anni	anni	t / anno	Nm ³ / anno	Nm ³	Nm ³ / h
1	1.998	52.660	271.377	271.377	31
2	1.999	75.860	1.205.065	1.476.442	138
3	2.000	84.500	2.292.950	3.769.392	262
4	2.001	85.920	3.313.978	7.083.370	378
5	2.002	110.450	4.320.678	11.404.049	493
6	2.003	150.550	5.655.393	17.059.441	646
7	2.004	65.000	6.793.655	23.853.096	776
8	2.005	48.900	6.729.182	30.582.278	768
9	2.006	150.900	7.038.307	37.620.585	803
10	2.007	170.600	8.549.763	46.170.348	976



Tab. 14.32 (segue) - Risultati della prospezione produttiva - 2^ sezione

T	1° ANNO 1.998	N° ANNI 14	PRODUZIONE TEORICA		
	CRONOLOGIA SCARICO RIFIUTI	SCARICO ANNUO RIFIUTI	PRODUZIONE ANNUA	PRODUZIONE PROGRESSIVA	PRODUZIONE ORARIA
anni	anni	t / anno	Nm³ / anno	Nm³	Nm³ / h
11	2.008	120.480	9.794.569	55.964.917	1.118
12	2.009	133.780	10.368.377	66.333.294	1.184
13	2.010	120.000	10.947.152	77.280.446	1.250
14	2.011	120.000	11.299.421	88.579.867	1.290
15	2.012	0	10.996.227	99.576.094	1.255
16	2.013	0	9.424.184	109.000.278	1.076
17	2.014	0	8.119.272	117.119.550	927
18	2.015	0	7.032.030	124.151.580	803
19	2.016	0	6.122.481	130.274.061	699
20	2.017	0	5.358.294	135.632.354	612
21	2.018	0	4.713.296	140.345.650	538
22	2.019	0	4.166.279	144.511.929	476
23	2.020	0	3.700.040	148.211.969	422
24	2.021	0	3.300.606	151.512.575	377
25	2.022	0	2.956.609	154.469.185	338
26	2.023	0	2.658.791	157.127.975	304
27	2.024	0	2.399.591	159.527.566	274
28	2.025	0	2.172.828	161.700.393	248
29	2.026	0	1.973.433	163.673.826	225
30	2.027	0	1.797.240	165.471.066	205
31	2.028	0	1.640.817	167.111.883	187
32	2.029	0	1.501.323	168.613.206	171
33	2.030	0	1.376.405	169.989.611	157
34	2.031	0	1.264.100	171.253.710	144
35	2.032	0	1.162.768	172.416.479	133
36	2.033	0	1.071.034	173.487.512	122
37	2.034	0	987.735	174.475.247	113
38	2.035	0	911.887	175.387.135	104
39	2.036	0	842.653	176.229.788	96
40	2.037	0	779.314	177.009.102	89

A destra della valutazione della produzione "teorica" di biogas viene rappresentata la captabilità in funzione del Coefficiente Kc definito dal modello.



Tab. 14.33 - Risultati della prospezione produttiva - 3^a sezione

T	1° ANNO	COEFFICIENTE CAPTAZIONE = Kc		
	1.998	63,85%		
	CRONOLOGIA SCARICO RIFIUTI	PRODUZIONE CAPTABILE CH ₄ = 50%	PRODUZIONE CAPTABILE CH ₄ = 40%	PRODUZIONE CAPTABILE CH ₄ = 30%
anni	anni	Nm ³ /h	Nm ³ /h	Nm ³ /h
1	1.998	20	24	28
2	1.999	88	105	123
3	2.000	167	201	234
4	2.001	242	290	338
5	2.002	315	378	441
6	2.003	412	495	577
7	2.004	495	594	693
8	2.005	490	589	687
9	2.006	513	616	718
10	2.007	623	748	872
11	2.008	714	857	999
12	2.009	756	907	1.058
13	2.010	798	958	1.117
14	2.011	824	988	1.153
15	2.012	801	962	1.122
16	2.013	687	824	962
17	2.014	592	710	829
18	2.015	513	615	718
19	2.016	446	536	625
20	2.017	391	469	547
21	2.018	344	412	481
22	2.019	304	364	425
23	2.020	270	324	378
24	2.021	241	289	337
25	2.022	216	259	302
26	2.023	194	233	271
27	2.024	175	210	245

Tab. 14.33 (segue) - Risultati della prospezione produttiva - 3^a sezione

T	1° ANNO	COEFFICIENTE CAPTAZIONE = Kc		
	1.998	63,85%		
	CRONOLOGIA SCARICO RIFIUTI	PRODUZIONE CAPTABILE CH ₄ = 50%	PRODUZIONE CAPTABILE CH ₄ = 40%	PRODUZIONE CAPTABILE CH ₄ = 30%
anni	anni	Nm ³ /h	Nm ³ /h	Nm ³ /h
28	2.025	158	190	222
29	2.026	144	173	201
30	2.027	131	157	183
31	2.028	120	144	167
32	2.029	109	131	153
33	2.030	100	120	140
34	2.031	92	111	129
35	2.032	85	102	119
36	2.033	78	94	109
37	2.034	72	86	101
38	2.035	66	80	93
39	2.036	61	74	86
40	2.037	57	68	80

La captabilità viene riportata come flusso (Nm³/h) di biogas considerato con diverse ipotesi di concentrazione di metano.

L'ipotesi elaborata nel modello BIO-5 è quella di una concentrazione di metano al 50% (LFG₅₀) ma vengono rappresentate altre ipotesi basate sul fattore di diluizione del biogas LFG₅₀ con aria aspirata forzosamente dal sistema di captazione.

Nell'ipotesi con metano al 40% si considera un "incremento" di flusso dovuto all'aria pari al 20%, mentre nell'ipotesi con metano al 30% si considera un "incremento" di flusso dovuto all'aria pari al 40%.

Tali considerazioni di incremento di flusso saranno molto utili nelle valutazioni di dimensionamento delle sezioni "volumetriche" della rete di aspirazione, regolazione e trasporto del biogas.

Infine la tabella riporta nella sezione destra alcuni dati indicativi sulla recuperabilità energetica del biogas, inserendo il rendimento di trasformazione del potenziale energetico (valore di default = 35% corrispondente ad un rendimento medio di un recupero di energia elettrica) e le ore di funzionamento

annue (default: 7.500 ore/anno) è possibile valutare la potenza equivalente di trasformazione (kW) e l'energia annua ricavabile (MWh).

Nel foglio "grafico" viene rappresentata graficamente la produzione oraria teorica e captabile di biogas.

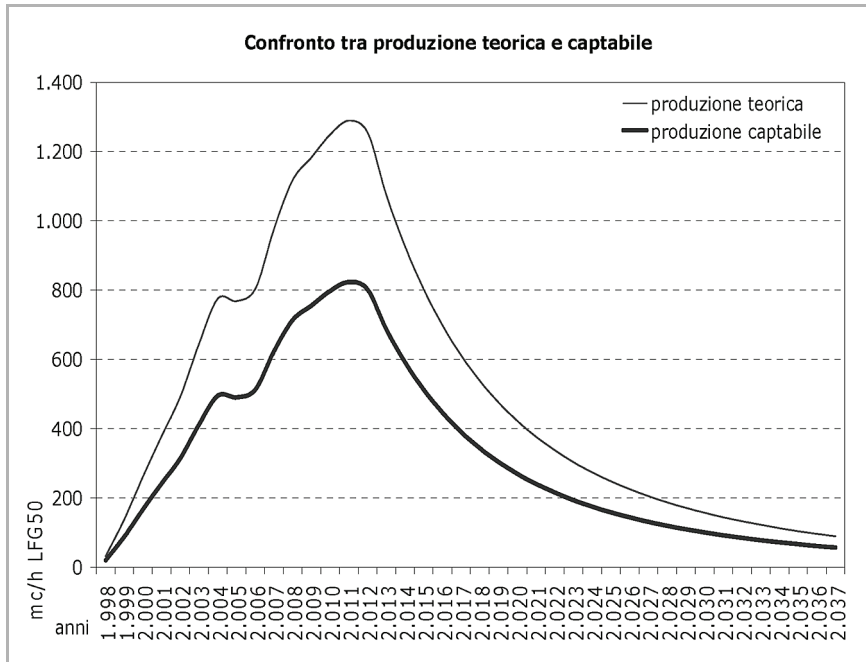


Figura 14.3
Grafico rappresentativo della produzione di biogas

Il foglio di calcolo potrà essere "salvato" nel PC dell'utente ed elaborato per applicazioni più specifiche.

Ad esempio elaborando due, o più modelli su uno stesso caso potranno essere valutate le variabilità probabilistiche in funzione delle variabili introdotte; osservando i casi "estremi" potranno essere definite le proiezioni "best case" e "worst case".

Una seconda elaborazione potrà essere relativa a casi in cui la discarica è composta da più lotti con conferimenti ben definiti nel tempo e nelle quantità; ogni lotto potrà essere considerato come una "sub-discarica" e per esso potrà essere valutata una specifica proiezione. Sovrapponendo gli effetti (con il metodo di "taglia ed incolla" in un nuovo foglio excel) potrà essere elaborata la proiezione complessiva come la somma dei singoli lotti. Tale applicazione è molto utile quando si vuole considerare la produzione "cronologica" dei singoli lotti valutando come più produttivi i lotti più recenti.

Lo stesso concetto potrà essere applicato a discariche non necessariamente

suddivise in lotti ma per le quali sono intervenute variazioni di conferimenti qualitativi importanti; ad esempio le discariche che fino ad un certo anno hanno smaltito rifiuti "tal quali" e dopo hanno ricevuto rifiuti provenienti da pre-trattamenti o raccolta differenziata. In questo caso le sub-discariche sono riferibili alla tipologia qualitativa del rifiuto.

Una ulteriore elaborazione consigliata è quella della valutazione "variabile nel tempo" del coefficiente di captabilità. Il modello propone un K_c riferito alle informazioni inserite nel questionario ma non può tenere conto delle variazioni quantitative e qualitative della tipologia del sistema di captazione.

Un esempio classico è quello della realizzazione di un sistema di captazione del biogas al completamento della discarica e l'inserimento dei dati caratteristici nel questionario riferiti al "progetto" di captazione: il modello valuterà un K_c riferito ai dati di progetto inseriti che verrà applicato a tutti gli anni di produzione del biogas, compresi quelli precedenti alla realizzazione dell'impianto di captazione anche se nella realtà prima dell'anno di chiusura della discarica l'efficienza di captazione sarà ovviamente nulla.

Una ultima considerazione: il modello BIO-5 valuta una finestra temporale di 40 anni alla quale corrisponde una produzione complessiva di biogas (121,79 Nm^3/t RS nell'esempio riportato nella tabella 14.30 a pag. 488), ma tale somma non corrisponde alla produzione totale (145,78 Nm^3/t RS nell'esempio) poiché si ritiene che dopo 40 la cinetica del fenomeno non si sia ancora completamente conclusa; la differenza tra i due valori si ritiene quindi possa corrispondere alla produzione di biogas negli anni successivi al quarantesimo.

Finito di stampare
nel mese di maggio 2010
presso la Tipolitografia Trullo S.r.l. - Roma
per conto della EPC S.r.l.
Via dell'Acqua Traversa 187-189 - 00135 Roma