

## **Bioenergia de residus i subproductes orgànics biodegradables**

Xavier Flotats i Ripoll

GIRO Unitat Mixta IRTA-UPC. Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia. Universitat Politècnica de Catalunya, UPC-BarcelonaTECH. Campus del Baix Llobregat, Edifici D4, C/ Esteve Terradas, 8. E-08860 Castelldefels.

### **RESUM**

La producció de metà (CH<sub>4</sub>), i el seu aprofitament energètic, a partir de residus i subproductes orgànics mitjançant el procés de digestió anaeròbia té un paper clau en la gestió sostenible d'aquests materials, té un efecte significatiu en la reducció de gasos d'efecte hivernacle, en la mineralització dels residus i en la depuració d'aigües residuals d'alta càrrega, i és sinèrgic amb processos de recuperació de recursos dels materials residuals orgànics.

El potencial de producció energètica a Catalunya s'estima entre 500 i 600 ktep/any, segons diferents hipòtesis. La realització d'aquest potencial en un horitzó determinat depèn de polítiques de gestió de residus, de reducció de gasos d'efecte hivernacle i, sobretot, de superar algunes limitacions actuals, entre les quals l'elevat cost de producció i transformació energètica del biogàs en comparació amb altres energies renovables.

Per superar les limitacions hom creu que cal avançar en el concepte de biorefineria o de plantes de producció de productes de valor afegit a partir de residus i subproductes orgànics, en els que la unitat de producció energètica ha de tenir un paper important, però no únic. Les línies d'investigació i innovació haurien d'anar en aquesta direcció, incidint tant en l'optimització del procés de digestió anaeròbia com en els processos de recuperació de compostos d'interès, amb una visió global i integrada.

### **INTRODUCCIÓ**

En termes energètics, la biomassa està constituïda per tot aquell material orgànic sintetitzat a partir del procés de fotosíntesi, fixant CO<sub>2</sub> atmosfèric, de manera que el seu aprofitament és un ús indirecte de l'energia solar incident sobre la superfície agrícola i forestal. La biomassa pot ser primària, producció forestal i agrícola, i ja siguin restes de cultius alimentaris o cultius energètics específics, o secundària, resultat d'un procés de transformació, com els residus orgànics (purins i fems del bestiar, fangs de depuració, residus orgànics industrial, fracció orgànica de residus municipals, ...). El seu aprofitament energètic incideix en el cicle dels materials i per tant cal trobar un equilibri entre el concepte de reciclatge d'aquests i la producció d'energia. L'aprofitament energètic d'aquest recurs no té efecte sobre l'increment de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera i, encara, ha de tenir un efecte positiu en la reducció de gasos d'efecte hivernacle, com el metà, el qual és alliberat a l'atmosfera durant processos de descomposició anaeròbia incontrolada de residus biodegradables i que seria transformable en CO<sub>2</sub> si es controla i s'aprofita energèticament. Aquest doble efecte (reducció d'emissions incontrolades i reducció de les emissions corresponents a la font no renovable que es substitueix) té importància estratègica per a qualsevol país, amb efectes econòmics i ambientals.

Hi ha tres grans grups de processos a aplicar: la transformació energètica mitjançant processos termoquímics (incineració, gasificació, piròlisi); els processos biològics (digestió anaeròbia amb producció de biogàs, producció d'hidrogen o producció de bioelectricitat) que cal considerar conservatius per als nutrients (nitrogen, fòsfor, potassi i altres oligoelements), els quals seran reciclables en els sòls agrícoles; i la producció de biocombustibles líquids a partir de sucres, o residus i cultius susceptibles de ser

hidrolitzats a sucres (per produir bioetanol), o a partir de cultius oleaginosos i olis residuals (per produir biodièsel). Llevat de la producció de bioelectricitat, el qual és un procés en el què encara hi ha un llarg camí de recerca i desenvolupament per recórrer, aquests processos són prou madurs, i amb sistemes coneguts per evitar impactes ambientals, com per afirmar que no hi ha una limitació tecnològica important per a la seva implantació, tot i que no es pot oblidar la necessitat de mantenir un nivell alt de dedicació en R+D+I per assegurar el continu increment en l'eficiència energètica i econòmica.

Centrant en la producció de biogàs, la qual tecnologia és prou madura i amb multitud d'experiències pràctiques exitoses, al 2011 representava a Europa 10,1 milions de tones equivalents de petroli (Mtep) d'energia primària, amb 35,9 TWh d'energia elèctrica produïda i abocada a la xarxa elèctrica (Euroserv'er, 2012). Alemanya disposa d'unes 7500 plantes de biogàs, processant principalment cultius energètics, dejeccions ramaderes i residus orgànics industrials, amb una producció d'energia primària de 5,1 Mtep i unes vendes d'energia elèctrica de 19,4 TWh durant 2011. Els cultius energètics, principalment ensitjat de blat de moro, i dejeccions representen el 90% dels substrats a digerir, mentre que tan sols 120 plantes processen residus municipals (Lorenz *et al.*, 2013). Apart dels usos clàssics del biogàs de producció d'energia elèctrica i tèrmica, l'ús com carburant per vehicles o com substitut del gas natural, després d'un procés d'upgrading del biogàs per obtenir biometà, està guanyant interès arreu. La injecció a la xarxa de gas natural permet el ús remot del biometà allí on pugui ser consumit amb la màxima eficiència energètica, enlloc de ser transformat en electricitat allí on es produeix sense una eficient utilització de l'energia tèrmica recuperada a la cogeneració. Aquesta pràctica possiblement signifiqui el proper gran salt de desenvolupament industrial, sent actualment Alemanya el país capdavanter, amb més de 130 plantes de biometà amb una capacitat de 70.000 Nm<sup>3</sup>/h (equivalent a 154 GWh de producció elèctrica), seguit de Suècia amb 47 plantes de biometà, de les quals tan sols 7 injecten a la xarxa de gas natural. Suècia és el país capdavanter en l'ús com biocarburant, amb molt autobusos a la ciutat de Stockholm consumint biometà. Altres països on la producció de biometà està prenent importància són Suïssa, amb 17 plantes, i Holanda, amb 13 plantes (Euroserv'er, 2012).

Segons la mateixa font anterior, a l'any 2011 la contribució d'Espanya va ser de 875 GWh elèctrics procedents de biogàs i 246 ktep d'energia primària, majoritàriament procedent de l'aprofitament de biogàs de dipòsits controlats de residus municipals. El Pla d'Energies Renovables d'Espanya (PER, 2011) assenyala com objectiu pel 2020 una producció d'energia elèctrica del biogàs de 2.600 GWh.

Donada la dispersió territorial en la disponibilitat del recurs i la multitud de sectors d'activitat que el generen, per al seu màxim aprofitament són més limitants els aspectes econòmics, organitzatius i de gestió que els aspectes tecnològics. Per aquest motiu, cal integrar polítiques en els àmbits agrícola, ramader, forestal, ambiental, energètic i industrial, com a mínim. El principal repte es troba en aconseguir aquesta necessària integració transversal, les quals dificultats són intrínseques a la complexitat que comporta.

## LA TECNOLOGIA DE PRODUCCIÓ DE BIOGÀS

La descomposició microbiològica anaeròbia de la matèria orgànica produeix un gas combustible o biogàs, amb un 60-70 % de metà (CH<sub>4</sub>). És un dels processos idonis per a

la reducció d'emissions d'efecte hivernacle i de males olors, l'aprofitament energètic dels residus orgànics i el manteniment del valor fertilitzant dels productes tractats. Està caracteritzada per l'existència de varies fases consecutives diferenciades (Figura 1), cada una amb diferents velocitats de reacció, que requerirà d'un equilibri que eviti l'acumulació de compostos intermedis inhibidors (àcids). Per fer possibles algunes reaccions és necessària l'associació sintròfica entre les poblacions microbianes, la qual es facilita si es creen agregats densos de microorganismes o biopel·lícules. En reactors on es facilita aquesta agregació són possibles altes concentracions de biomassa activa, la qual cosa permet velocitats de càrrega orgànica fins a 35 kg DQO/m<sup>3</sup>·d, superiors a molts sistemes aerobis de tractament d'aigües residuals (van Lier *et al.*, 2002).

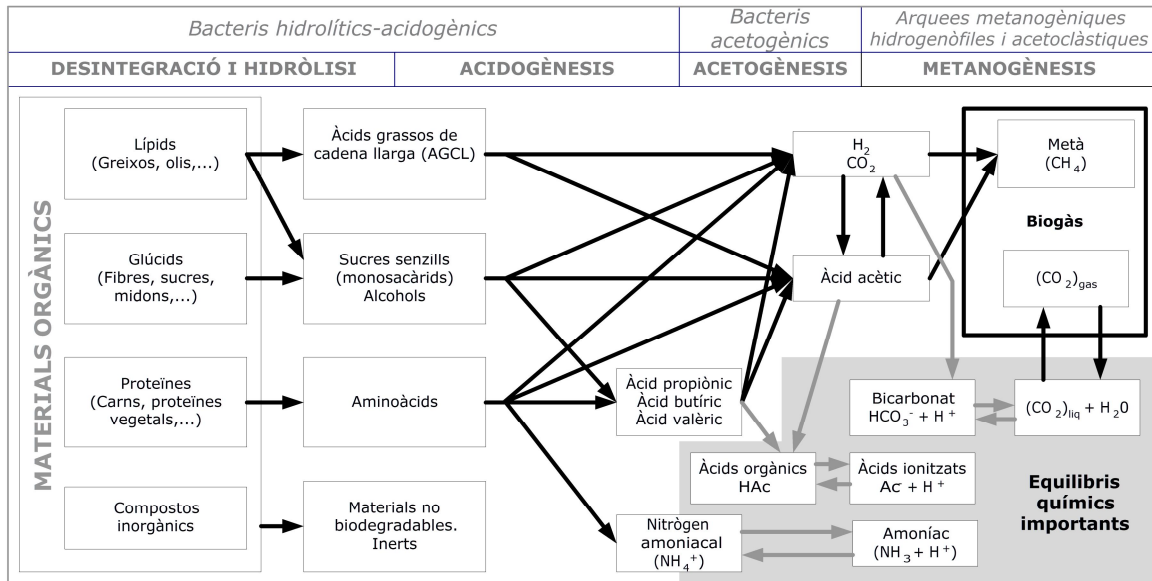


Figura 1. Fases de la digestió anaeròbia, poblacions de microorganismes implicats i equilibris químics importants.

A diferència dels microorganismes aerobis, els anaerobis utilitzen poca energia de la total disponible com energia química, presenten una baixa velocitat de creixement i utilitzen poc material orgànic per construir la seva massa cel·lular. Això presenta l'avantatge d'alliberar molta energia de la disponible en forma de CH<sub>4</sub> i una transformació baixa en llots residuals (Figura 2). La relació entre producció de metà i eliminació de DQO (Demanda Química d'Oxígen) és de 0,35 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO<sub>elim.</sub>, amb un equivalent energètic de l'ordre de 14 MJ/kg DQO<sub>elim.</sub>.

La biodegradabilitat anaeròbia es defineix com el percentatge de la DQO del substrat que es pot transformar en CH<sub>4</sub> en condicions d'operació ideals i amb un temps de procés prou elevat, seguint un protocol acurat de mesura en laboratori. A la Taula 1 es mostren valors de biodegradabilitat anaeròbia de mostres d'alguns subproductes. Els valors de producció de metà o biogàs són potencials màxims, i tan sols són realitzables en condicions de composició del medi específiques. Així, l'alt potencial de la gallinassa es veu limitat per l'alt contingut de nitrogen amoniacal d'aquest subproducte, que actua com inhibidor dels microorganismes i que obliga a elevades taxes de dilució per reduir la seva concentració; o l'elevat potencial de les terres filtrants tan sols es podrà realitzar si es mescla amb subproductes que permetin reduir la concentració d'àcids grassos de cadena llarga (inhibidors a altes concentracions) procedents dels olis i aportin alcalinitat i nutrients pel creixement dels microorganismes.

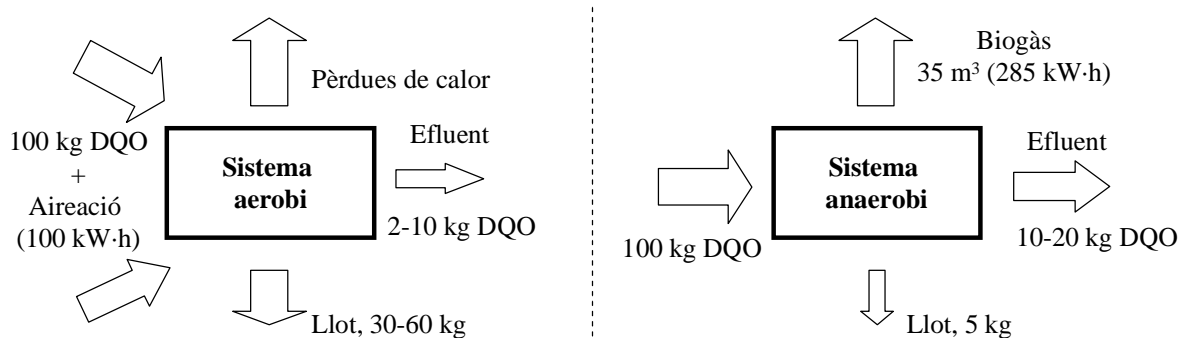


Figura 2. Balanç genèric de DQO i energia en sistemes aerobis i anaerobis (adaptat de van Lier et al., 2002)

Taula 1. Resultats d'assajos de biodegradabilitat anaeròbia per alguns residus o subproductes (producció de biogàs suposant un contingut del 65% en CH<sub>4</sub>)

	Purins		Terres		Fangs		Residu vegetal
	porc	Gallinassa	Purins boví	filtrants olis	Residus d'escorxador	depuració amb greixos	de procés industrial
SV (g/kg)	33,9	200,8	90,2	323,2	239,2	100,8	352,3
DQO (g/kg)	56,2	264,8	80,0	491,6	323,3	167,0	652,1
% biodegradabilitat	54,9	59,0	56,7	84,4	68,3	63,9	45,4
m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg SV	0,347	0,272	0,196	0,449	0,319	0,373	0,293
m <sup>3</sup> biogàs/ton res.	18,1	84,1	27,2	223,3	117,6	57,8	158,9

Les reaccions anaeròbies presenten la desavantatge de ser molt lentes, en comparació a les aeròbies, i requerir un elevat temps de procés, molt volum dels digestors, o bé requerir d'una alta concentració de microorganismes per a poder aconseguir el mateix objectiu de descomposició amb menys temps i volum.

Mentre que en les fases d'hidròlisi-acidogènesi, els microorganismes acostumen a ésser facultatius (tant poden estar en ambient aerobi com anaerobi), per a la fase metanogènica els microorganismes són anaerobis estrictes i amb taxes de creixement de l'ordre de 5 vegades menors als acidogènics. Això significa que si els bacteris metanogènics tenen algun problema per reproduir-se i consumir els àcids, per efecte d'algun inhibidor o per manca de temps de procés suficient, es produirà una acumulació d'àcids, una baixada de pH i un aturament del procés. Per assegurar un procés estable cal que el medi tingui suficient alcalinitat, la qual és una mesura de la capacitat tampó i podria considerar-se equivalent, en una primera aproximació, a la concentració de bicarbonat en el medi. L'equilibri entre CO<sub>2</sub> i bicarbonat (veieu Figura 1) és clau per mantenir el pH a l'entorn de la neutralitat.

En general, la velocitat global del procés està limitada per la de l'etapa més lenta, la qual depèn de la composició de cada residu. Per a substrats solubles, la fase limitant acostuma a ser la metanogènesi. Per augmentar la velocitat, s'adopten dissenys que permetin una elevada concentració de microorganismes, amb temps de procés de l'ordre d'hores. Per residus amb consistència particulada, la fase limitant és la desintegració i hidròlisi, requerint temps de procés de l'ordre de setmanes. Per a augmentar les taxes d'hidròlisi i reduir temps de retenció, una estratègia a aplicar és el pretractament per ajudar a la solubilització (trituració, maceració, ultrasons, tractament tèrmic, etc.). A la Figura 3 es mostren els esquemes dels reactors anaerobis més habituals.

La digestió anaeròbia es pot combinar amb sistemes de post-tractament per a constituir sistemes complets de recuperació d'energia i de compostos valoritzables. S'ha comprovat que la recuperació de nitrogen amoniacal, mitjançant stripping/absorció o mitjançant concentració tèrmica per evaporació, es veu afavorida per una digestió anaeròbia prèvia (Bonmatí i Flotats, 2003a, 2003b). Per dejeccions ramaderes són efectes importants l'eliminació de llavors de males herbes, d'ous i larves d'insectes i de paràsits (Johansen *et al.*, 2013), la reducció significativa de males olors (Wilkie, 1998), l'homogenització i reducció de la mida de partícula, que afavoreix la infiltració en el sòl i la reducció de les pèrdues de nitrogen amoniacal per volatilització, i en general la millora de les qualitats com fertilitzants. Per les seves característiques, la digestió anaeròbia és una peça clau en un esquema de gestió sostenible de materials residuals orgànics (Lettinga *et al.*, 2001; Lema i Omil, 2001).

La configuració usual de reactor per a residus sòlids és el continu de mescla completa (CSTR) o el continu de flux pistó (veieu Figura 3a i 3b), amb velocitats de càrrega orgànica (VCO) fins a 3,5 kg<sub>DQO</sub>/m<sup>3</sup>·d. Els potencials de producció de biogàs de residus de la indústria alimentària solen ser alts (Taula 2), però alguns d'aquests presenten una composició deficient en nutrients o en capacitat tampó. En alguns casos es requereix la mescla amb altres residus (codigestió). La codigestió en plantes centralitzades té per objectiu: 1) aprofitar la complementarietat de les composicions; 2) compartir instal·lacions de tractament; 3) unificar metodologies de gestió; 4) esmortir les variacions temporals en composició i producció dels residus; 5) reduir costos d'inversió i explotació.

Taula 2. Potencials de producció de biogàs d'alguns residus orgànics de la indústria alimentària (Angelidaki i Ahring, 1997).

Tipus	Contingut orgànic	Sòlids volàtils (%)	Producció de biogàs (m <sup>3</sup> /tona)
Intestins (i contingut)	H. carboni, proteïnes, lípids	15-20	50-70
Llots de flotació	65-70% prot., 30-35% lípids	13-18	90-130
Terres filtrants d'olis	80% lípids, 20% altres org.	40-45	350-450
Olis de peix	30-50% lípids	80-85	350-600
Sèrum	75-80% lactosa, 20-25% prot.	7-10	40-55
Sèrum concentrat	75-80% lactosa, 20-25% prot.	18-22	100-130
Hidrolitzat de carn i ossos	70% proteïnes, 30% lípids	10-15	70-100
Melmelades	90% sucres, àcids orgànics	50	300
Oli de soja/ margarines	90% olis vegetals	90	800-1000
Begudes alcohòliques	40% alcohol	40	240
Llots residuals	H. carboni, lípids, proteïnes	3-4	17-22
Llot residual concentrat	H. carboni, lípids, proteïnes	15-20	85-110

Per al tractament d'aigües, l'estratègia d'operació més usual es basa en el control del temps de retenció cel·lular o de sòlids (TRS). Per mantenir una concentració de microorganismes elevada els reactor mes habituals son:

- Reactor de contacte anaerobi, o reactor de mescla completa amb sedimentador extern, recirculant la fracció decantada cap al reactor (Figura 3c). Aquest sistema és competitiu per aigües amb un contingut alt en sòlids o de greix i/o proteïna. La VCO és 1- 4 kg<sub>DQO</sub>/m<sup>3</sup>·d (Kassam *et al.*, 2003).
- Upflow anaeròbic sludge blanket (UASB, Figura 3f), on la biomassa activa es troba en forma granular, retinguda mitjançant sedimentació. A la part superior, un separador trifàsic aigua – sòlid – gas assegura el confinament dels grànuls i un TRS elevat, permetent VCO mitjanes de 10 kg<sub>DQO</sub>/m<sup>3</sup>·d (Lettinga, 1996).

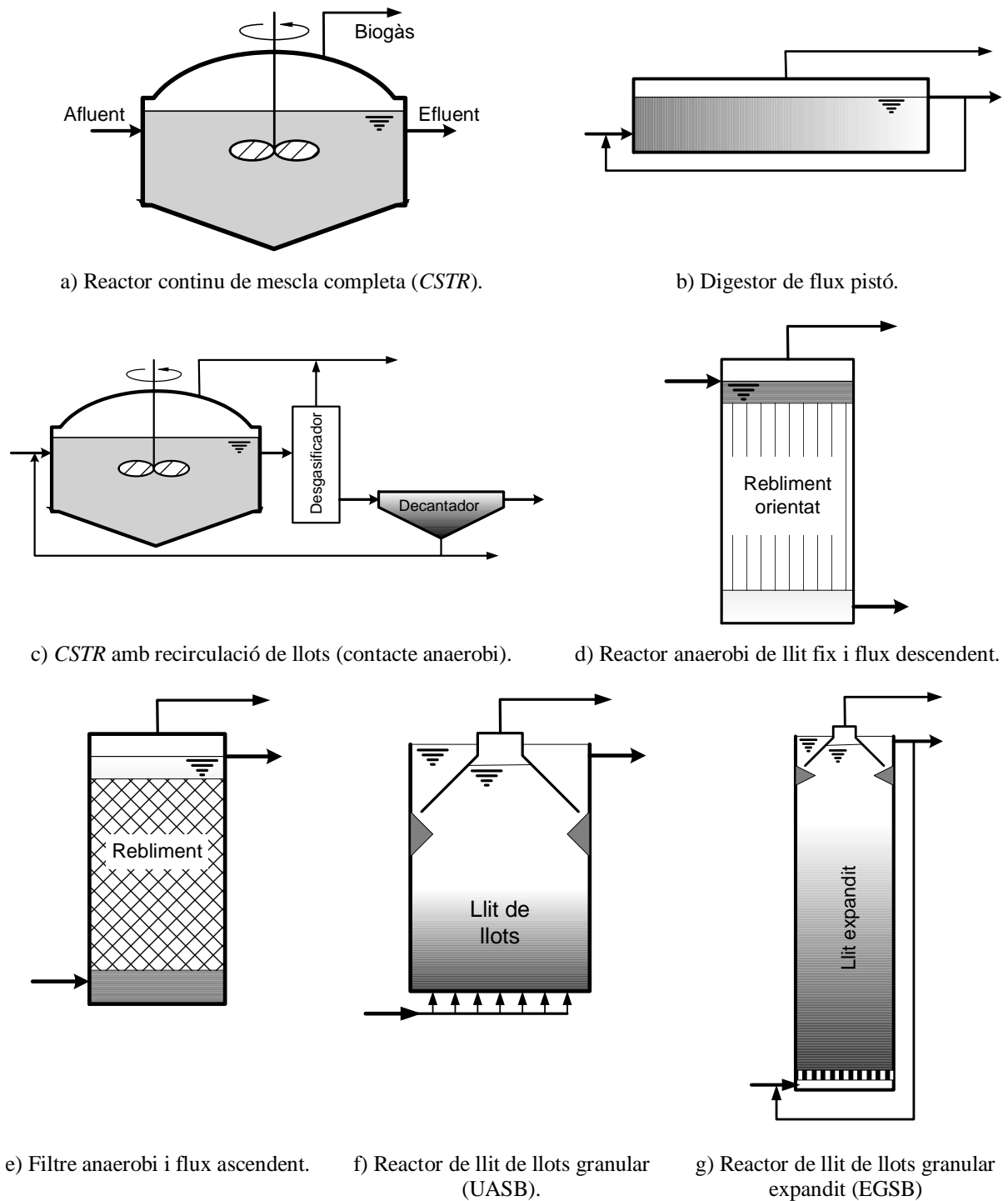


Figura 3. Esquemes de reactors anaerobis, sense retenció interna de biomassa activa (a, b i c) i amb retenció formant biopel·lícules sobre rebliment interior (d i e) o formant grànuls (f i g).

- Filtre anaerobi i llit fix (FA, Figura 3d i 3e), es basa en la immobilització dels microorganismes en un suport fix (rebliment) en forma de biopel·lícula. En reactors de flux ascendent el rebliment sol ser desordenat i la biomassa activa es troba fixada i atrapada en els intersticis; en reactors de flux descendent el



rebliment es troba de forma ordenada i la biomassa tan sols fixada, constituint els filtres de llit fix. La VCO es 5-7 kg<sub>DQO</sub>/m<sup>3</sup>·d (Kassam *et al.*, 2003).

- Sistemes híbrids (FH), els quals combinen a la part inferior un llit granular o UASB amb un filtre anaerobi (zona de biopel·lícules) a la part superior.
- Expanded Granular Sludge Bed (EGSB, Figura 3g), es la darrera generació de reactors anaerobis amb biomassa granular, fluiditzant els grànuls mitjançant el flux ascendent de gas o aigua. Una variant són els sistemes amb circulació interna (CI). Encara que els UASB són la configuració més freqüent, la tendència és la substitució per EGSB i CI, degut a la seva major efectivitat i viabilitat econòmica, amb VCO de 15-30 kg<sub>DQO</sub>/m<sup>3</sup>·d (Kassam *et al.*, 2003), amb màximes de fins a 45 kg<sub>DQO</sub>/m<sup>3</sup>·d (Van Lier, 2008).

Darrerament s'han desenvolupat els reactors de membrana anaerobis, amb resultats encoratjadors quan es manté el llit fluiditzat a l'entorn de les membranes per tal d'evitar l'embrutament d'aquestes (Bae *et al.*, 2013)

La digestió anaeròbia té un camp molt ampli d'aplicació en pràcticament tots els tipus d'aigües residuals, inclús aquelles amb una baixa concentració de matèria orgànica, a qualsevol escala i temperatura (Lettinga, 1996; Bae *et al.*, 2013). A l'any 2007, s'estimava l'existència de 2700 plantes anaeròbies d'alta càrrega (van Lier, 2008), principalment al sector alimentari, la indústria química i la indústria de la polpa i paper. Els països amb més implantació són la Índia, el Japó, EEUU, Holanda, Alemanya i Brasil (Frankin, 2001).

Els paràmetres més importants per al disseny són la VCO, especialment per efluents de baixa càrrega orgànica, i el temps de retenció hidràulic (TRH). La Taula 3 mostra algunes referències de reactors d'alta càrrega. L'interval de temperatures d'operació és ampli, però la majoria dels sistemes estan entre 25-40°C i es necessiten temps de retenció cel·lular i de sòlids alts (mínim de 10-15 dies).

*Taula 3. Algunes referències de sistemes anaerobis d'alta càrrega de tractament d'aigües residuals (Flotats i Fernández, 2009).*

Aigua residual/ Reactor	T <sup>a</sup> (°C)	Càrrega (kg <sub>DQO</sub> /m <sup>3</sup> ·d)	Degradació DQO (%DQO in)	TRH (h)
Ac. Grassos Vol. / EGSB	10-12	10-12	90	1,6-2,5
Malteria / EGSB	16	4,4-8,8	56	2,4
Aigua Res. Mun. / EGSB	6-20	5-6	50-95	1-3
Frigorífic carn / FA	---	4,2	80-85	12,5
Conserves / UASB	---	0,5-1,2	80	12-18
Oli palma / FH	38	3-23	89-97	1,5-3
Destil·leria whisky / UASB	35	30-39	90-96	20
Lactis / UASB	35	4-20	72-90	2
Patata / UASB	35	2,5-10	85-95	0,75
Paper / UASB	40	17-20	60-80	6-24

## ELS RECURSOS I POTENCIAL

La determinació del potencial de producció de biogàs dels residus o subproductes orgànics és un exercici basat en múltiples hipòtesis que poden ser variables en el temps i aplicables en funció de la informació disponible en cada moment.

El primer estudi de prospectiva en la producció de biogàs a Catalunya es va fer l'any 1983 pel sector ramader (Flotats, 1983). Aquest donava com a conclusió que en aquell

moment el mercat d'aquestes instal·lacions era tan limitat que no es preveien noves instal·lacions fins que el paràmetre econòmic de producció d'energia no fos complementat amb una valoració econòmica de la reducció de l'impacte ambiental que produeixen aquests residus, i no fossin possibles implantacions de tractament col·lectiu de granges, enlloc de plantejaments individuals. Efectivament, després de les primeres instal·lacions posades en funcionament l'any 1983 a Catalunya, no hi va haver més implantacions. Aquestes conclusions eren conseqüència dels següents factors:

- a) Inversions molt afectades per l'escala o cabal de purins a tractar.
- b) De les granges de porcs, tan sols les granges de cicle tancat podien produir residus prou carregats de matèria orgànica per produir quantitats elevades de gas i alhora presentar demandes d'energia tèrmica per calefacció. Les granges d'engreix no presenten demanda per calefacció i les granges de maternitat, amb forta demanda, produeixen residus molt diluïts i poc adequats.
- c) L'estimació del llinar de rendibilitat preveia que aquesta era presumible en granges grans, amb més de 400 mares en cicle tancat, les quals representaven menys del 4% del mercat potencial.
- d) L'únic ingrés econòmic comptabilitzable era el corresponent a producció i consum d'energia, amb una evolució de preus incerta, els quals a la fi van evolucionat a la baixa en relació als preus de les inversions, d'operació i de manteniment per aquestes plantes. L'única forma d'apaivagar aquest aspecte era la implantació de plantes grans que tractessin residus de diverses granges, fins i tot d'engreix, però que venguessin l'energia en la forma més econòmicament interessant.

A l'any 1988 es va repetir l'estudi, actualitzant les dades, i les conclusions van ser les mateixes (ESPREC, 1989).

A l'any 2001 es va fer un estudi de potencial total i realitzable, a 10 anys vista, de producció de biogàs per a tots els sectors productius (veieu Taula 4), en el marc del Pla d'Energia de Catalunya 2001-2010. A l'any 2007 es va fer un estudi prospectiu en l'horitzó 2030 a nivell espanyol, discernint per comunitats autònomes (Flotats, 2007) i a l'any 2011 es va publicar un estudi (Pascual et al., 2011) realitzat en el marc del projecte singular i estratègic PROBIOGAS. En tots aquests es discerneix entre potencial total, realitzable, disponible o accessible. El potencial total és el que s'obtidria si tots les fonts orgàniques considerades es transformessin en metà amb un rendiment del 100%; el disponible seria el potencial que s'obtidria considerant que en el moment present o en l'horitzó establert no tots els recursos són disponibles i que el rendiment és l'habitual amb la tecnologia considerada; el accessible o realitzable seria el potencial possible en l'horitzó considerat si s'estableixen una sèrie accions per fer-ho possible.

En la Taula 4, síntesi dels estudis citats, cal fer notar:

1. La variació en el potencial disponible, la qual és explicable per les diferents bases de dades utilitzades i el tractament d'aquestes. Mentre que a l'estudi de Flotats i Casañé (2001) es consideren en el potencial disponible els fems de bestiar boví de carn, tot i que després no es consideren com accessibles, en els dos estudis posteriors de 2007 i 2011 ja no es tenen en compte, encara que sí es tenen en compte els fems d'aviram



(gallinassa) amb un baix potencial energètic via biogàs, degut a l'alta concentració en amoníac. A l'estudi de 2001 es proposava que en l'horitzó 2010 totes les plantes centralitzades de tractament de purins mitjançant concentració tèrmica adoptessin el procés de digestió anaeròbia en capçalera de planta, aplicant també codigestió.

*Taula 4. Estudis sobre prospectiva de la producció de biogàs a Catalunya. Estimació del potencial energètic dels recursos i de la seva realització (ktep) en l'horitzó de l'any que s'indica.*

Referència		Flotats i Casañé (2001)	Flotats (2007)	Pascual et al. (2011)	Vilamajó i Flotats (2011)
Dejeccions ramaderes	Disponible	361,9	263,5	243,1	
	Accessible	141,8	197,6	201,8	
Residus municipals	Disponible	94,5	190,2	270,0	
	Accessible	68,2	154,0	42,0	
Fangs de depuració	Disponible	26,2	34,9	34,9	
	Accessible	20,7	26,2	26,2	
Residus orgànics Ind.	Disponible	17,2	43,7	50,4	118,1
	Accessible		43,7	28,3	24,6
Potencial disponible		499,7	532,3	598,4	
Potencial accessible		230,7	421,5	298,3	
Horitzó de realització (any)		2010	2030	2020	-

2. La bona evolució de les pràctiques de recollida selectiva de la fracció orgànica de residus municipals ha fet que el potencial disponible estimat fos creixent. La gran diferència entre el realitzable en els horitzons 2020 o 2030 radica en el fet que es va considerar que al 2030 la implantació de la tecnologia de digestió anaeròbia hauria de ser generalitzada i que s'haurien superat les limitacions a l'obtenció d'una fracció orgànica d'elevada qualitat. Es pot comprovar que els escenaris de futur a adoptar tenen una gran importància en l'avaluació dels potencials realitzables, per la qual cosa són clau les polítiques públiques que facin possibles aquests escenaris.

3. A l'any 2001 moltes plantes de digestió anaeròbia de fangs no tenien connectat els equips de cogeneració elèctrica a la xarxa, ni es comptava que plantes depuradores municipals petites poguessin disposar de digestors. Tot i així, per estimar el potencial accessible ja s'adopten els conceptes que els pretractament i el pas a règim termofílic puguin aportar més rendiment energètic i un grau més elevat d'higienització, i als estudis posteriors s'adopta el concepte que puguin haver plantes de biogàs de gestors de residus que digereixin fangs procedents de plantes depuradores petites. L'acceptació del que és tècnicament possible modifica els valors de l'estimació dels potencials.

4. L'estimació dels potencials dels residus orgànics industrials és una tasca complexa i sotmesa a un elevat grau d'incertesa. Això és degut a que les declaracions de residus no contemplen descripcions de la biodegradabilitat anaeròbia d'aquests, ni necessàriament quantificació de tots els paràmetres químics que els caracteritzen. Així mateix, alguns residus poden deixar de ser-ho si poden ser matèries primeres per altres processos productius, i per tant aparèixer en les declaracions d'un any i no en anys posteriors.

A l'estudi de 2001, pels residus orgànics industrials es va adoptar la hipòtesi que tan sols era disponible allò que era accessible, i que aquest era realitzable tan sols mitjançant pràctiques de codigestió amb dejeccions ramaderes, incrementant el

potencial accessible d'aquestes, a partir de dades de les declaracions de residus aportats per l'Agència de Residus de Catalunya (ARC) de 1998 i 1999. L'estudi de 2007 es va basar en estimacions de la producció de residus de la indústria alimentària a nivell espanyol i l'estudi de Pascual *et al.* (2011) es va basar en una anàlisi acurada de diferents sectors productius per comarques per tot l'estat espanyol. Vilamajor i Flotats (2011) van introduir el concepte de grau d'incertesa en l'estudi de potencials dels residus orgànics industrials, estudiant el detall de la declaració de residus de 2008 aportada per l'ARC i caracteritzant aquests amb intervals probables de composició i de potencial de producció de metà. El resultat va ser que el potencial disponible a Catalunya dels residus orgànics industrials era de 118,1 ktep, amb un grau d'incertesa del 33,2%, i que el potencial accessible baixava a 24,6 ktep, amb un grau d'incertesa del 32,4%, això és, un potencial comprès en l'interval 16,7 - 32,4 ktep. La implicació immediata d'aquests valors de potencial accessible de residus orgànics industrials és que si el sector ramader tan sols pot obtenir produccions rendibles de biogàs (amb preus de venda d'energia elèctrica segons el RD 661/2007) a través de codigestió amb residus industrials, a Catalunya tan sols el 10% de la producció de purins de porc pot digerir-se en condicions econòmiques favorables, i que aquest valor es podria incrementar si entren en el circuit de les matèries primeres per produir biogàs els cultius energètics, com a Alemanya. A grans trets, doncs, no hi ha prou producció de residus orgànics industrials per suportar el concepte de codigestió a tot el sector ramader.

Tots els estudis anteriors no contemplen l'adopció de sistemes anaerobis de tractament d'aigües residuals d'alta càrrega. D'aquests ja comencen a haver-hi implantacions a algunes poques indústries a Catalunya i caldria promoure l'adopció d'aquesta tecnologia en el sector.

L'estimació del grau d'incertesa, o l'avaluació dels potencials per intervals, ha estat el mètode adoptat en un estudi recent sobre potencials a la UE-27, realitzat per Lorentz *et al.* (2013). Aquests autors estimen que el potencial dels residus municipals orgànics a Europa està entre 175 i 3.421 ktep, del sector de la indústria cervesera entre 301 i 950 ktep i del sector de la indústria del paper entre 524 i 6.407 ktep, adoptant la digestió anaeròbia tant per residus sòlids com les aigües residuals d'aquests sectors. L'amplitud dels intervals dona idea del grau d'incertesa en la determinació del potencial energètic dels recursos, sobretot degut a la definició de quins estan disponibles per ser tractats mitjançant digestió anaeròbia, si aquests recursos poden tenir una via de valorització més interessant mitjançant pràctiques de reutilització o ús com matèries primeres per altres processos productius, i si econòmicament la transformació en biogàs pot ser més interessant que altres alternatives, la qual cosa depèn de conjuntures de preus de l'energia i de les matèries primeres.

A l'any 2009 la producció d'energia primària procedent del biogàs era de 45,5 ktep, amb un creixement molt pronunciat en el període 2000-2004 (veieu Figura 4) i el Pla d'Energia i Canvi Climàtic de Catalunya 2012-2020 programa que la contribució arribi a 203,2 ktep a l'any 2020 (PECAC, 2012).

En un horitzó molt més llunyà, la contribució neta podria apropar-se al potencial total, que podria ser de l'ordre de com a molt el doble de l'estimat actualment com accessible, o realitzable, si hi ha una aposta coordinada i decidida en canvis en processos productius i de gestió, i en desenvolupament tecnològic. Per a això, cal dotar-se dels mecanismes incentivadors adequats.

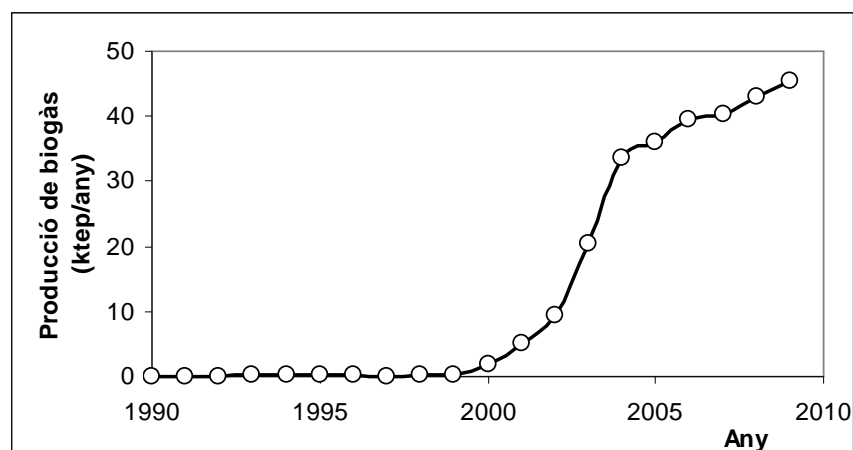


Figura 4. Evolució de la producció de biogàs a Catalunya en unitat d'energia primària (ktep/any). Font: ICAEN (2013)

El PER (2011) estima que les plantes de biogàs amb produccions específiques superiors a 50 m<sup>3</sup> biogàs/tona de substrat tractat podrien ser competitives sense incentius cap a l'any 2030, i amb produccions menors cap al 2050.

#### LES LIMITACIONS

La producció de biogàs a partir de residus i subproductes orgànics està prioritzada per diverses normatives europees, tant per reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle com per produir energia renovable. El mateix Parlament Europeu (2008) exhorta al països membres a remoure traves administratives i potenciar la producció de biogàs a partir de dejeccions ramaderes i de residus de la indústria alimentària, a fi de contribuir a una agricultura sostenible.

Les barreres a superar per tal que les instal·lacions de biogàs es converteixin en usuals en el paisatge del país són moltes, i el Pla de l'Energia i Canvi Climàtic de Catalunya 2012-2020 en fa un bon repàs:

- Costos de les instal·lacions,
- Dificultats per establir col·laboracions amb els productors de residus pel seu ús en plantes de biogàs,
- Variabilitat en la producció de biogàs,
- Ús de determinats cosubstrats,
- Preus dels productes en el sector ramader,
- Gestió de les dejeccions a les granges,
- Gestió del biodigerit,
- Ubicació de plantes de biogàs col·lectives.

La rendibilitat econòmica de les plantes de biogàs per produir energia elèctrica mitjançant codigestió de dejeccions ramaderes i residus orgànics industrials és molt sensible a la producció específica per unitat de substrat tractat, movent-se el mínim necessari per fer viable les instal·lacions entre 30 i 40 m<sup>3</sup> biogàs/tona, amb la tecnologia actual i les primes a la producció elèctrica promulgades pel RD 661/2007 (Flotats i Sarquella, 2008). La rendibilitat econòmica es considera el principal limitant a la implantació d'aquestes instal·lacions.

La producció específica màxima per purins de porc no supera mai els 18 m<sup>3</sup> biogàs/tona, i encara menys si han estat emmagatzemats prèviament (Bonmatí *et al.*,

2001), mentre que molts residus de la indústria alimentària, sobretot amb alt contingut en greixos, tenen potencials que poden superar fàcilment els 100 m<sup>3</sup> biogàs/tona, però amb composicions que dificulten la seva digestió sols. L'única forma de fer viables les instal·lacions és mitjançant codigestió, això és, la digestió anaeròbia de mescles, usualment dejeccions amb residus de la indústria alimentària. Si les instal·lacions es fan a nivell de granja, i a Catalunya ja en hi ha 10 en operació a l'estiu de 2013, implica una diversificació de l'activitat del ramader, qui ha de ser també un gestor de residus. Si les instal·lacions son centralitzades o col·lectives, poden donar servei a una zona geogràfica contribuint a la gestió integral dels residus i subproductes que s'hi generen, podent incorporar processos de recuperació de components valoritzables i sent fàbriques de nous productes. En els dos casos, s'obren oportunitats econòmiques i ambientals, però també grans reptes a resoldre. En el cas de plantes col·lectives amb entrada de dejeccions, el principal limitant és la distància mínima a mantenir amb la granja més propera, per motius sanitaris, apart d'altres factors de tipus organitzatius, fent que en zones amb alta densitat ramadera els projectes tinguin un grau elevat de complexitat (Flotats *et al.*, 2009).

Donada la relació de potencials energètics accessibles entre les dejeccions i els residus de la indústria alimentària, de l'ordre de 10 a 1 (Vilamajó i Flotats, 2011), és fàcil adonar-se que no es produeixen prou residus industrials per codigerir de forma rendible totes les dejeccions ramaderes. Per aquest motiu, cal plantejar els cultius energètics susceptibles de produir biogàs com una opció seriosa per la codigestió de purins i fems.

La derogació del RD 661/2007 al 2013 dificulta la potenciació del mercat de les plantes de biogàs, i caldrà trobar mecanismes econòmics i esquemes de presa de decisions que puguin promoure aquestes instal·lacions al nivell de països de l'entorn europeu, evitant conjuntures de preus tan canviants com en els darrers 10 anys.

Un limitant no ben avaluat encara a Catalunya és l'efecte d'increment de la competència en el mercat de la gestió dels residus que representa la pràctica de la codigestió amb finalitats d'optimització en la producció energètica. Aquesta competició per obtenir els millors residus per produir biogàs pot produir una baixada en el preu de la gestió d'aquests, afectant directament als gestors tradicionals ben establerts que disposen de les eines de logística, i creant una guerra soterrada de preus. Aquest efecte va ser caracteritzat ja a l'any 1995 per l'Agència de l'Energia de Dinamarca (DEA, 1995), que va dictaminar que en els estudis de viabilitat econòmica de plantes de biogàs no s'havien de considerar ingressos per tractament de residus industrials. Gregersen (2002) avalua el interès econòmic de la producció de biogàs i venda d'energia en la reducció de costos que representa l'adopció del procés respecte d'altres mètodes de tractament de les dejeccions i els residus, en el marc d'una gestió encaminada a reduir el impacte ambiental d'aquests i a recuperar-ne recursos.

En aquest marc de competència, hom creu que la millor opció seria la d'integrar als gestors de residus en els projectes de producció energètica.

## EL PAPER DE LA INNOVACIÓ TECNOLÒGICA I SOCIAL

La recerca i el desenvolupament tecnològic ha d'ajudar a superar les limitacions actuals a la implantació del procés, sent la més important el cost d'inversió i operació. Aquest depèn de tres factors importants: 1) la velocitat a la que es produeix el procés; 2) el

cabal de materials a tractar i gestionar; 3) esquema local de gestió de residus que s'implanta.

En un model de gestió dirigit a recuperar recursos dels residus i subproductes, la gestió col·lectiva i la implantació del concepte de biorefineria en les instal·lacions de processat dels materials ha de portar a un esquema de negoci basat en la qualitat dels productes obtinguts, entre els quals el biogàs, hidrogen o altra vector energètic, però no únicament aquests. Extreure nitrogen o fòsfor, per exemple, dels purins per la producció de fertilitzants minerals o altres productes químics ha d'aportar un valor afegit al negoci, apart que els processos de mineralització es veuen afavorits per la digestió anaeròbia. Un esquema de treball d'aquest tipus implica una innovació social i un direccionament de línies d'investigació per fer-ho possible. Implica també la combinació de processos i l'optimització de les combinacions, per exemple la combinació digestió anaeròbia i compostage, a fi d'aconseguir el màxim potencial energètic de la fracció orgànica fàcilment biodegradable i compost de la lentament biodegradable, la que pot aportar matèria orgànica al sòl. Així, les tendències a Europa en la gestió de dejeccions ramaderes van en la línia de processar-les per obtenir productes amb valor afegit, més que tan sols tractar-les (Flotats *et al.*, 2011; Foged *et al.*, 2011)

Les línies de treball per aconseguir velocitats de procés més elevades s'han de traduir en reduir volums de digestors i costos d'inversió. Formen part d'aquestes línies l'estudi dels processos de pretractament per augmentar la biodegradabilitat, les tècniques per superar la inhibició per amoníac, o altres compostos presents en els substrats, o el desenvolupament de reactors d'alta càrrega, com els aplicats a aigües residuals, aplicats a residus sòlids.

Moure un elevat cabals de subproductes amb baix potencial energètic implica un cost difícil de cobrir amb ingressos deguts a producció energètica, apart del que representa d'emissions equivalents de CO<sub>2</sub> deguts a transport. Una línia de treball que pot ser efectiva és la de desenvolupament de tècniques de separació que permetin transportar a plantes centralitzades de producció de biogàs les fraccions amb més potencial energètic, i aplicar reactors d'alta càrrega a la fracció restant.

Tot l'anterior implica també el desenvolupament d'eines de presa de decisions, basades en el coneixement d'experiències prèvies, el qual tan sols és possible amb informació pública actualitzada i transparent sobre aquestes.

## SÍNTESI

El procés de digestió anaeròbia aplicat a residus, subproductes i, en general, a substrats orgànics biodegradables produeix un gas combustible, biogàs, amb elevat contingut energètic i susceptible de substituir fons fòssils d'energia. El cost de l'energia produïda és relativament elevat en comparació amb altres energies renovables, i està molt relacionat amb el cost de gestió del cabal de materials a gestionar, tant d'entrada a procés com de productes tractats, i la producció específica de biogàs d'aquests. Per aquest motiu, la unitat de producció energètica ha d'estar integrada en projectes i marcs més amplis de gestió de residus i subproductes, amb un enfocament de recuperació de recursos o producció de productes amb valor afegit, no tan sols energètics. Les línies d'investigació i desenvolupament a promoure han d'anar dirigides tant a reduir costos de producció energètica com d'obtenció de productes de valor afegit, en un marc en que les plantes de biogàs siguin unitats dins de plantes amb objectius més amplis de gestió i



producció. La integració de la producció d'energia i el processat de residus ha de permetre esquemes de treball sostenibles, amb el valor econòmic assignable a cada funció.

## REFERÈNCIES

- Angelidaki, I., Ahring, B.K. (1997). Anaerobic digestion in Denmark. Past, present and future. In: X. Flotats, ed., *III curso de Ingeniería Ambiental*, Univ. de Lleida, octubre 1997, pp 336-342.
- Bae, J.H., Shin, C.H., Yoo, R.H., Lee, R.K., Kim, J.H., McCarty, P.L. (2013). High-Efficiency Carbon-Neutral Anaerobic Domestic Wastewater Treatment at Any Temperature. In: *Proceedings of the 13th World Congress on Anaerobic Digestion*. Santiago de Compostela, 25-28 juny 2013.
- Bonmatí, A., Flotats, X., Mateu, L., Campos, E. (2001). Study of thermal hydrolysis as a pre-treatment to mesophilic anaerobic digestion of pig slurry. *Water Science and Technology*, 44(4), 109-116.
- Bonmatí, A., Flotats, X. (2003a). Air stripping of ammonia from pig slurry: characterization and feasibility as a pre- or post-treatment to mesophilic anaerobic digestion. *Waste Management* 23, 261-272.
- Bonmatí, A., Flotats, X. (2003b). Pig slurry concentration by vacuum evaporation: influence of previous mesophilic anaerobic digestion process. *Journal of the Air and Waste Management Assoc.* 53, 21-31.
- DEA (1995). Progress report on the Economy of Centralized Biogas Plants. *Danish Energy Agency*, Feb.'95.
- ESPREC (1989). Estudio espacial y prospectivo de la energía en Catalunya. A. Gurgui, E. Figuerola, A. Casanova. Ed. Comisión de las Comunidades Europeas y Departamento de Industria y Energía de la Generalitat de Catalunya, Vol. 2, pp 226-248.
- Euroserv'er (2012). Biogas Barometer, December 2012 <http://www.euroserv'er.org/pdf/baro212biogas.pdf>
- Flotats, X. (1983). Estudi de l'aplicabilitat dels sistemes de producció de biogàs a Catalunya. Estudi de TApS (Tecnologies d'Aprofitament Solar) per la Direcció General d'Energia de la Generalitat de Catalunya. Agost 1983.
- Flotats, X., Casañé, A. (2001). Producció d'energia per digestió anaeròbia de residus biodegradables a Catalunya. *Horitzó 2010*. Informe per ICAEN, juny 2001.
- Flotats, X. (2007). Análisis prospectivo de la producción y aprovechamiento energético de biogás en España. Informe per IDAE, juliol 2007.
- Flotats, X., Bonmatí, A., Fernández, B., Magrí, A. (2009). Manure treatment technologies: on-farm versus centralized strategies. NE Spain as case study. *Bioresource Technology*, 100(22), 5519-5526.
- Flotats, X., Fernández, B. (2009). Tractament anaerobi de residus de la indústria alimentària. *TECA: Tecnología i Ciència dels Aliments*, 11 (2), 19-24. DOI: <http://dx.doi.org/10.2436/20.2005.01.33>.
- Flotats, Xavier, Henning Lyngsø Foged, August Bonmati Blasi, Jordi Palatsi, Albert Magri and Karl Martin Schelde (2011). Manure Processing technologies. Technical Report No. II concerning "Manure Processing Activities in Europe" to the European Commission, Directorate-General Environment. Project reference: ENV.B.1/ETU/2010/0007, 184 pps. <http://hdl.handle.net/2117/18944>.
- Foged, Henning Lyngsø, Xavier Flotats, August Bonmati Blasi, Jordi Palatsi and Albert Magri (2011). End and by-products from livestock manure processing - general types, chemical composition, fertilising quality and feasibility for marketing. Technical Report No. III concerning "Manure Processing Activities in Europe" to the European Commission, Directorate-General Environment. Project reference: ENV.B.1/ETU/2010/0007, 78 pps. <http://hdl.handle.net/2117/18945>.
- Frankin, R. (2001). Full-scale experiences with anaerobic treatment of industrial wastewater. *Water Science and Technology* 44(8), 1-6.



- Gregersen, K.H. (2002). Development and implementation of the Danish centralised biogas concept-Financial aspects. In: *E.C. van Ierland and O. Lansink (eds.); Economics of Sustainable Energy in Agriculture*. Luwer Academic Publishers (The Netherlands), pp 177-188.
- ICAEN (2013). Estadístiques energètiques. Balanç energètic de Catalunya. Sèrie homogènia 1990-2009. Web ICAEN, accés 11.07.2013.
- Johansen, A., Nielsen, H.B., Hansen, C.M., Andreasen, C., Carlsgart, J., Hauggard-Nielsen, H., Roepstorff, A. (2013). Survival of weed seeds and animal parasites as affected by anaerobic digestion at meso- and thermophilic conditions. *Waste Management*, 33(4), 807-812.
- Kassam, Z., Yerushalmi, L., Guiot, S. (2003). A market study on the anaerobic wastewater treatment systems. *Wat Air Soil Pollut* 143, 179-192.
- Lema, J., Omil, F. (2001). Anaerobic treatment: a key technology for a sustainable management of wastes in Europe. *Water Science and Technology* 44(8), 133-140.
- Lettinga, G. (1996). Sustainable integrated biological wastewater treatment. *Water Science and Technology* 33(3), 85-98.
- Lettinga, G., van Lier, J.B., Van Buuren, J., Zeeman, G. (2001). Sustainable development in pollution control and the role of anaerobic treatment. *Water Science and Technology* 44(6), 181-188.
- Lorenz, H., Fisher, P., Schumacher, B., Adler, P. (2013). Current EU-27 technical potential of organic waste streams for biogas and energy production. *Waste Management* (en premsa, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.06.018> )
- PER (2011). Plan de Energías Renovables de España. Ministerio de Industria, Energia y Turismo. <http://www.idae.es/index.php/id.670/re/menu.303/mod.pags/mem.detalle>
- Pascual, A., Ruiz, B., Gómez, P., Flotats, X., Fernández, B. (2011). Situación y potencial de generación de biogás. *Estudio Técnico PER 2011-2020*. IDAE, Madrid. Internet: [http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos\\_11227\\_e16\\_biogas\\_db43a675.pdf](http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_11227_e16_biogas_db43a675.pdf)
- Parlament Europeu (2008). Sustainable agriculture and biogas: a need for review of EU-legislation. *Resolució del Parlament Europeu de 12 de març de 2008*. Diari Oficial de la Unió Europea de 20 de març de 2009 (2009/C 66 E/05)
- PECAC (2012). Pla d'Energia i Canvi Climàtic de Catalunya 2012-2020, <http://www20.gencat.cat/portal/site/icaen/menuitem.897a4be85d3b580ec644968bb0c0e1a0/?vgnnextoid=4e2bad73a2ba6310VgnVCM1000008d0c1e0aRCRD&vgnnextchannel=4e2bad73a2ba6310VgnVCM1000008d0c1e0aRCRD&vgnnextfmt=default>
- PROBIOGAS (2012). Proyecto Singular y Estratégico PROBIOGAS 2007-2012. <http://www.probiogas.es/>
- Van Lier, J.B., Huibers, F., Zeeman, G. (2002). Anaerobic treatment for the recovery of resources from waste streams. In *S. Kalyuzhnyi (Ed.), Proceedings of the 7th FAO/SREN workshop on "Anaerobic digestion for sustainability in waste (water) treatment and re-use"*. Moscow State University. Vol. 1, pp 13-22.
- Van Lier, J.B. (2008). High-rate anaerobic wastewater treatment: diversifying from end-of-the-pipe treatment to resource-oriented conversion techniques. *Water Science and Technology* 57(8), 1137-1148.
- Vilamajó, C., Flotats, X. (2011). Avaluació energètica de residus industrials biodegradables a Catalunya. *TECA (Revista de Tecnologia i Ciència dels Aliments)*, 13(2), 3-10. DOI: <http://dx.doi.org/10.2436/20.2005.01.53>.
- Wilkie, A.C. (1998). Anaerobic Digestion of Livestock Wastes: A Suitable Approach to Odor Abatement. *The North Carolina 1998 Pork Conference and Beef Symposium*; Raleigh, North Carolina. Raleigh, NC: North Carolina Pork Council, pp. 5-16.