

3.4. Digestió anaeròbia

La digestió anaeròbia, també anomenada biometanització, és un **procés biològic** que té lloc en absència d'oxigen (**condicions anaeròbies**) durant el qual part de la matèria orgànica es transforma, per l'acció dels microorganismes, en una barreja de gasos coneguda com a **biogàs**. El biogàs està constituït principalment per metà i diòxid de carboni amb una riquesa en metà que oscil·la entre el 60% i 70%, motiu pel qual és un gas combustible (en termes energètics, 1 m³ de biogàs equival aproximadament a 0,6 L de gasoil). També s'obté un producte orgànic, conegut com a **digerit**, que és més estable i amb un volum lleugerament inferior al cabal d'entrada del digestor, ja que part del material processat es transforma en biogàs, però que reté els nutrients presents inicialment.

La valorització del biogàs es pot dur a terme in situ, via combustió o **cogeneració elèctrica**, tot aprofitant l'energia tèrmica per a escalfar el digestor. També hi pot haver altres usos del biogàs, com ara la **injecció a la xarxa** de gas natural, o com a **combustible en vehicles**, però llavors cal tenir en compte els requeriments legals que exigeixen certs límits per a la eliminació dels gasos no desitjats (principalment el diòxid de carboni i el sulfur d'hidrogen). Això s'assoleix mitjançant un procés de tractament del biogàs conegut com *up-grading*, que té per objectiu generar un producte enriquit en metà conegut com a **biometà**. Pel que fa al digerit, aquest es pot valoritzar agronòmicament com a fertilitzant orgànic, ja sigui directament o mitjançant la seva transformació a d'altres productes (per exemple, per via del compostatge o mitjançant l'asseccament solar).

3.4.1. Fonament científic-tècnic

La digestió anaeròbia és un bioprocés complex en el qual intervenen diferents grups de microorganismes. La matèria orgànica es descompon en compostos més senzills (**hidròlisi**), que són transformats en àcids grassos volàtils (**acidogènesi**), i finalment a àcid acètic (**acetogènesi**) com a principals compostos intermediaris del procés. Aquests àcids són consumits pels microorganismes metanogènics que produeixen metà i diòxid de carboni (**metanogènesi**). Totes les etapes esmentades tenen lloc de forma simultània dins del reactor, també anomenat digestor. En general, els digestors operen amb un màxim contingut de matèria seca del 12% a una temperatura relativament constant de 30-45°C quan es treballa en **condicions mesòfiles**, o a una temperatura de 52-55°C (amb una variació màxima de 0,5°C) quan ho fan en **condicions termòfiles**. En aquest darrer cas, és possible augmentar la capacitat de tractament i generar un **digerit higienitzat** (sense microorganismes patògens).

La digestió anaeròbia és un procés altament tecnificat que, més enllà del sector agrari, s'aplica a una varietat molt gran de residus orgànics, tant sòlids com líquids, provinents de la indústria i de l'àmbit urbà. Per aquest motiu, hi ha una gran varietat de dissenys i configuracions dels reactors en funció de cada situació (Taula 3.4.1). La forma més senzilla d'implementar la digestió anaeròbia a la granja consisteix en aprofitar la pròpia bassa d'acumulació de les dejeccions tot tancant-la per recollir el biogàs que s'hi generi (**llacunatge anaerobi i basses cobertes**). S'aprofiten, doncs, infraestructures preexistents i gairebé no s'actua sobre el procés, motiu pel qual es considera com un sistema passiu. Pel que fa als digestors anaerobis pròpiament dits, aquests es classifiquen en funció de si els microorganismes flueixen amb les dejeccions o de si es retenen dins el digestors. Dintre dels primers trobem els **reactors de mescla completa** (CSTR), que bàsicament consisteixen en un tanc on les dejeccions s'escalfen i es barregen amb els microorganismes metanogènics. Per tant, les dejeccions han de tenir consistència líquida (purí) de forma que la quantitat entrant desplaça un volum equivalent de sortida (digerit). Els microorganismes metanogènics surten del digestor conjuntament amb el líquid desplaçat, amb la qual cosa el temps de residència d'ambdues fraccions coincideix (temps de residència hidràulic per a les dejeccions i cel·lular per als microorganismes). És necessari, doncs, ajustar el cabal a tractar en funció del volum del reactor, de manera que el temps de residència hidràulic/cel·lular sigui com a mínim d'uns 20-30 dies en condicions mesòfiles, per tal de donar temps suficient per al manteniment de les poblacions microbianes dins el reactor. Pel que fa als **reactors de flux pistó**, les dejeccions introduïdes per un extrem d'un digestor de configuració lineal es desplacen lentament formant un front o "pistó" pràcticament sense barrejar-se, fins que assoleixen la sortida a l'altre extrem del reactor. El contingut de sòlids totals de les dejeccions ha de ser almenys del 10%-15% i fins a un 20%, motiu pel qual el flux pistó s'aplica principalment als fems. El temps de retenció recomanat en aquest darrer cas és de 15 a 20 dies.

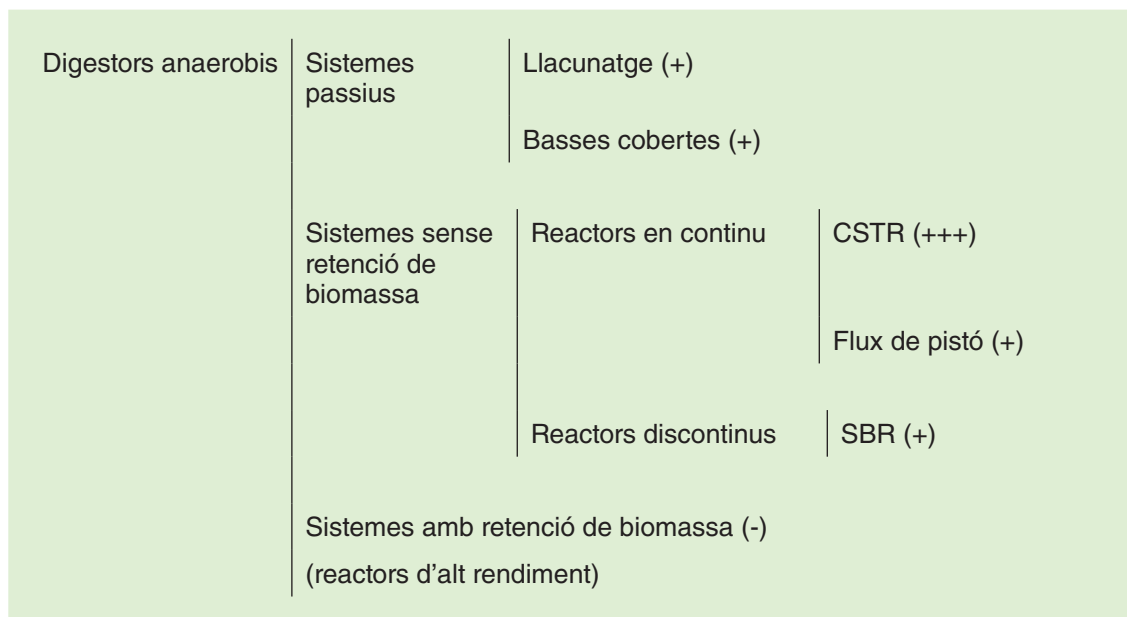


Figura 3.5.1. Classificació dels sistemes de digestió anaeròbia i nivell d'implementació en el marc agrari: alt (+++), mitjà (++), baix (+), no utilitzat (-). Tipus de reactor: reactor de mescla completa (CSTR) i reactor discontinu seqüencial (SBR).

Els **reactors d'alt rendiment** es caracteritzen pel fet que s'apliquen diferents estratègies per retenir els microorganismes metanogènics dins del reactor, per tal d'incrementar la capacitat de tractament amb un volum més petit del digestor. L'opció més immediata és la de recuperar els microorganismes a la sortida del digestor mitjançant un clarificador extern, i tornar-los a reintroduir. Una opció per fer els digestors més compactes és la de promoure la fixació dels microorganismes sobre un suport inert, que pot ser una estructura fixa (filtre) o mòbil (llit fluïditzat) dins del reactor. En alguns casos, es pot prescindir del material de suport de forma que els microorganismes formin per ells mateixos grànuls que són prou densos com per mantenir-se per gravetat dins del digestor. Aquest és el cas dels reactors coneguts com a **llit de llots (UASB i EGSB)**. La principal vulnerabilitat d'aquests sistemes ve donada pel contingut de sòlids poc biodegradables presents a les dejeccions i que, en no tenir temps de degradar-se, també s'acumulen al digestor. Per aquest motiu, aquests reactors anaerobis, no s'han tractat en aquesta Guia.

La configuració més habitual del procés de la digestió anaeròbia per al tractament de les dejeccions ramaderes es basa generalment en reactors tipus CSTR. L'operació d'aquests reactors es du a terme amb un temps de residència hidràulic d'un mínim de 20 dies, que és el que necessiten les poblacions microbianes per mantenir-se en condicions ideals, fins a 70 dies en el cas que s'hi afegixin substrats que són lentament biodegradables, com per exemple les restes de cultius, o quan és necessària l'adaptació a elevades concentracions d'amoni i d'altres inhibidors. Després del procés, cal mantenir el digerit en un dipòsit cobert, per tal de recuperar el biogàs residual que s'allibera en aquesta fase, i que pot representar entre el 10% i el 15% de la producció total.

3.4.2. Implementació a la granja

La complexitat i els costos de la digestió anaeròbia comporta una elevada sensibilitat d'aquesta tecnologia a les economies d'escala. Això en dificulta la seva implementació en explotacions relativament petites (**plantes descentralitzades**) mentre que, en l'altre extrem, afavoreix la possibilitat de construir **plantes centralitzades** de digestió anaeròbia que donen servei a nombroses granges situades en proximitat.

Aquest darrer model està fora del marc agrari i, en la mesura que la planta es constitueixi com a gestor de residus, també pot gestionar altres residus orgànics per millorar l'eficiència del procés (**codigestió anaeròbia**).



Figura 3.4.2. Imatge superior: Digestor anaerobi en una granja relativament petita, consistent en una bassa de purins coberta per a la recuperació del biogàs generat. Imatge inferior: Planta de digestió anaeròbia consistent en dos reactors CSTR per al tractament de purins en una gran explotació.

El principal limitant de les plantes centralitzades ve donat pels costos de transport de les dejeccions ramaderes, motiu pel qual cal establir un pla de gestió integral entre tots els usuaris i la disponibilitat d'al-



tres residus orgànics per a dur a terme una codigestió eficient. Les plantes centralitzades han estat operatives durant molts anys a Catalunya per al tractament dels purins en zones d'elevada concentració de granges. Aquestes plantes es basaven en la complementació del biogàs produït pels digestors amb gas natural per a la cogeneració i injecció de l'electricitat a la xarxa, de forma que la calor generada servia per a l'assecatge i pel·letització del digerit, com a pas previ a la seva exportació com a fertilitzant orgànic. No obstant això, la dependència d'aquestes plantes al gas natural, a les subvencions a la cogeneració i els elevats costos han comportat que no siguin viables a llarg termini. La tendència actual, doncs, és la d'implementar plantes de digestió anaeròbia descentralitzades dins el marc agrari, en granges que tenen la dimensió adequada per assegurar-ne la viabilitat tècnica i econòmica (Figura 3.4.2). Cal, però, complir una sèrie de requisits tècnics mínims (Taula 3.4.1).

Taula 3.4.1. Elements bàsics d'una planta de digestió anaeròbia per al tractament de les dejeccions ramaderes.

Infraestructures

- **Sistemes d'emmagatzematge:** Cal un mínim de dues basses impermeables: per al purí d'entrada i per al digerit. Cada bassa ha de disposar de la seva tanca de protecció. La capacitat de la bassa del digerit dependrà del destí final d'aquest. Si el destí final és l'ús agrícola com a fertilitzant, el dimensionament de la capacitat de la corresponent bassa es farà d'acord amb els mateixos criteris que si la bassa hagués d'emmagatzemar purí. També és necessari un sistema d'emmagatzematge de subproductes adequat quant a volum i impermeabilització, en cas d'utilitzar subproductes com a cosubstrat.
- **Digestor anaerobi:** Ha de ser dissenyat i dimensionat segons el cabal anual de purí i altres cosubstrats a digerir. Cal assegurar uns temps de retenció hidràulic i cel·lular adequats per a una conversió eficient.
- **Gasòmetre:** Dipòsit per a l'emmagatzematge del biogàs en condicions segures.

Equips

- **Equips del digestor:** Agitadors, bombes d'impulsió de les dejeccions/digestat, sistema de calefacció.
- **Vàlvules de seguretat i torxa:** Sistema per cremar l'excés de biogàs de forma segura i evitar la seva emissió a l'atmosfera.
- **Infraestructura per a la valorització del biogàs:** Sistema de tractament del biogàs (per protegir els equips o per *l'up-grading*, si escaigués), caldera o motor de cogeneració en cas que es prevegi l'aprofitament energètic del biogàs.

Elements de control

- **Cabalímetres:** És obligatori disposar d'un cabalímetre a la sortida del digestor per a mesurar el flux de digerit, i es recomana tenir un segon cabalímetre per mesurar el biogàs produït.
- **Sensors:** Es recomana portar un registre del pH i la temperatura del digestor, així com de la composició del biogàs.
- **Comptador de la producció elèctrica:** Necessari en cas que el biogàs es destini a la producció d'electricitat.

Additius i altres materials

- **Co-substrats:** Conreus energètics, residus de la indústria alimentària, etc.
- **Additius:** Correctors de pH/alcalinitat.

3.4.3. Eficiència del procés

La digestió anaeròbia de les dejeccions ramaderes comporta la degradació de la matèria orgànica i la consegüent conversió de bona part del nitrogen orgànic a amoníac, però té un impacte relativament baix des de la perspectiva de la concentració o eliminació del nitrogen. Si no hi ha pèrdues per volatilització,

tot el nitrogen dels purins tractats roman al digerit, això sí, amb una major proporció del nitrogen amoniacal. A la Taula 2.4.2 es mostren els rendiments típics de recuperació al digerit de diverses fraccions i compostos del purí d'una granja de porc d'engreix, tractat amb un digestor tipus CSTR operat en condicions mesòfiles. El rendiment d'aquesta tecnologia, des de la perspectiva del balanç del nitrogen a l'explotació ramadera, vindrà donada pels usos i la destinació final del digerit.

Taula 3.4.2: Rendiments màssic típic de la digestió anaeròbia^a de purins de porc d'engreix (Font: Campos *et al.*, 2004).

Paràmetre	Recuperació al digerit (%)
Cabal	95-98
Sòlids totals (matèria seca)	20-45
Sòlids volàtils (matèria orgànica)	40-60
Nitrogen	100
Nitrogen orgànic	60-40
Nitrogen amoniacal	140-160
Fòsfor	100
DQO	40-60

^a Reactors de mescla completa operats a 35°C i un temps de retenció de 20 dies.

Pel que fa a l'eficiència energètica, la producció de biogàs dependrà de la configuració del digestor, la temperatura d'operació i el material a tractar. Una bassa coberta pot arribar a produir uns 4-6 m³ de biogàs per tona de purí tractat. En aquest cas, la temperatura de la bassa coberta serà propera a l'ambiental, fet pel qual la producció de biogàs serà més gran a l'estiu i menor a l'hivern. Per a la situació més habitual d'un digestor tipus CSTR operat en condicions mesòfiles i que tracti purins de porc d'engreix, es poden obtenir uns 11-18 m³ de biogàs per tona de purí tractat. Aquest biogàs contindrà un 65%-70% de metà. En aquest mateix exemple, per a una granja que produeixi 20 tones de purins per dia i que aquests siguin tractats amb a un temps de residència hidràulica de 20 dies, el volum del digestor haurà de ser de 400 m³. Per tal de tenir una referència a l'hora de fer una estimació de la quantitat màxima biogàs que es produirà en funció del tipus de dejeccions, es poden fer servir valors de referència determinats en condicions de laboratori (Taula 3.4.3).

Taula 3.4.3: Potencial metanogènic (producció de biogàs) típic de les dejeccions ramaderes, segons diferents fonts.

Tipus de dejeccions	ICAEN ^a (m ³ biogàs/kgSV)	Pla de l'energia de Catalunya ^b (m ³ biogàs/kgSV)	USEPA ^c (m ³ CH ₄ /kgSV)
Vacum d'engreix	0,538	0,30	0,35
Vacum de llet	0,308	0,30	0,20
Purins de porc	0,533	0,41	0,45
Gallinassa	0,418	-	0,39

^a Flotats i Sarquella (2008).

^b Generalitat de Catalunya (2005).

^c U.S. Environmental Protection Agency (2001).



3.4.4. Ús agronòmic dels productes obtinguts

En general, el digerit és un líquid dens i ric en minerals, que conté menys matèria orgànica i que a la vegada és relativament estable i higienitzat comparat amb les dejeccions abans de ser tractades. El digerit es pot aplicar directament al camp o pot ser deshidratat mitjançant processos de separació fisicoquímica o d'assecatment tèrmic (vegeu els apartats 3.1 i 3.3, respectivament). L'aplicació directa del digerit és més beneficiosa per als sòls, els cultius i el medi ambient en general que la de les dejeccions sense digerir per diversos motius:

- El digerit **té un format més homogeni que** les dejeccions, motiu pel qual hi ha menys problemes en la utilització de maquinària d'aplicació directa (tancs amb mànegues, o amb sistemes d'injecció), i es produeixen menys pèrdues de nitrogen per volatilització de l'amoniac.
- El **major grau d'estabilització** del digerit implica que la matèria orgànica romanent és poc biodegradable, amb la qual cosa es generen menys emissions de metà i males olors, i contribueix a la formació d'humus. La mineralització dels nutrients millora la disponibilitat del nitrogen per a les plantes.
- El procés de la digestió anaeròbia comporta una important **reducció dels microorganismes patògens** per a les plantes, els animals i els humans, així com de les llavors de males herbes, sobretot si el procés es fa en condicions termòfiles. També té un impacte positiu sobre la diversitat dels microorganismes al sòl.

3.4.5. Control de les emissions

Tot i que la producció i l'aprofitament del biogàs és una pràctica sostenible que resulta en una disminució de les emissions de gasos d'efecte hivernacle, tant pel confinament com per la generació d'energia renovable, cal prestar molta atenció a les fuites de metà que es puguin produir a les instal·lacions. Els punts més crítics en aquest sentit es produeixen durant l'emmagatzematge del digerit i del propi biogàs (gasòmetre), als motors de cogeneració, així com a les juntes dels conductes del biogàs i a les vàlvules de pressió. Els paràmetres que més influeixen les emissions de metà es divideixen en les estructurals, en funció de la tecnologia implementada i materials utilitzats, i les operatives relacionades amb la gestió de la planta. Les principals mesures per reduir les emissions són: (i) tancar el dipòsit del digerit de forma que sigui estanc; (ii) revisar regularment les instal·lacions per assegurar que la combustió del metà generat sigui completa, tant en calderes com en motors de cogeneració; (iii) monitoritzar freqüentment els components que contenen el biogàs per identificar possibles fuites (cada 1 a 3 anys); i (iv) la gestió de les plantes ha de tenir l'objectiu d'evitar l'activació dels dispositius d'alleujament de pressió i la crema en torxa del biogàs. Finalment, també cal minimitzar el temps d'emmagatzematge de les dejeccions, per causa de la descomposició de la matèria orgànica abans d'entrar al digestor. Això comporta una baixada del rendiment en termes de producció de biogàs. Per altra banda, l'emmagatzematge del digerit també pot contribuir a les emissions d'amoniac.

3.4.6. Costos d'inversió i operació

L'aplicació més o menys intensiva de la digestió anaeròbia comporta costos molt variables. Els terminis d'amortització també varien molt segons tipus, mida i necessitats energètiques de cada instal·lació, però els valors típics oscil·len entre 10 i 20 anys. L'opció més econòmica és la del cobriment de les basses i l'aprofitament del biogàs produït. Aquesta alternativa té un cost que, per a una bassa de 1.500 m³ de capacitat amb una àrea de 375 m², és aproximadament de 18.000 €. En aquest cas, el cost total de la instal·lació, incloent-hi la bassa coberta, un reactor petit per inocular la bassa i les instal·lacions de recollida i aprofitament del biogàs, es corresponen aproximadament a un cost unitari de 3,77 € per tona de purí tractat. Pel que fa als beneficis econòmics, aquests depenen de la producció de biogàs i del seu

aprofitament. En el cas d'utilització en caldera, l'estalvi d'energia tèrmica equival aproximadament a 9 litres de gasoil per cada metre cúbic de biogàs. Suposant una producció de 5 m³ de biogàs per tona de purí en una bassa coberta i un preu del gasoil C de 0,8 €, es produiria un estalvi de 4 € per tona de purí tractat, amb la qual cosa es poden arribar a compensar una part important dels costos de tractament.

Taula 3.4.1. Exemple d'aplicació del procés de la digestió anaeròbia pel tractament dels purins d'una granja de producció de llet.

Dimensionament

- La granja en qüestió té 400 places de vaques de producció lletera (exemple D de la Taula 3.1), i cada any genera 8.525 tones de purins que contenen un 12,19% de matèria seca i 4,80 kg per tona de nitrogen total.
- Aquests purins alimenten de forma contínua un digestor anaerobi de mescla completa operat en règim mesòfil, dimensionat amb un volum de 800 m³, per tal que el temps de retenció hidràulica sigui d'uns 35 dies.
- Pel que fa al biogàs produït, i tenint en compte el potencial metanogènic dels purins de vacum de 0,3 m³ de biogàs per cada quilo de matèria seca, cada any es generaran uns 312.000 m³ de biogàs (Taula 3.5.3).
- Tenint en compte que aquest tipus de biogàs conté un 70% de metà, i que aquesta molècula que té una energia de combustió (35,8 MJ/m³ de poder calorífic inferior) semblant a la del gas natural, la quantitat de biogàs produïda anualment equivaldrà a uns 213.400 m³ de gas natural, o uns 2,17 GWh per any.
- El biogàs produït es valoritza mitjançant un equip de cogeneració amb un rendiment elèctric del 35% i un rendiment tèrmic del 30%, aquest darrer dedicat íntegrament a escalfar el digestor.
- Es produeixen uns 8.184 tones de digerit a l'any (equivalent al 96% dels purins inicials).

Costos d'instal·lació

- Els costos de construcció es corresponen principalment al digestor anaerobi i la infraestructura auxiliar (conduccions, vàlvules, gasòmetre, etc.), que s'estimen en 350.000€ a amortitzar segons una vida útil de 20 anys.
- La instal·lació de cogeneració completa, incloent-hi els motors, així com la generació i transformació elèctrica, té un cost de 160.000€, a amortitzar en 10 anys.

Costos de consumibles

- La principal despesa d'aquesta planta és l'energia elèctrica necessària per impulsar les bombes, agitadors, i altres elements mecànics, així com els costos de manteniment d'aquests equips i que s'ha estimat en 55.000€ per any.

Beneficis de la venda

- D'acord amb un rendiment del 35%, la producció anual d'energia elèctrica de la planta serà de 759,5 MWh, que si consideréssim un preu de venda equivalent al de compra (0,1246€/kWh), suposaria un ingrés de 94.634€.
- El digerit es gestiona com a adob orgànic per a la producció de farratges a la pròpia explotació, però l'estalvi en l'estalvi en fertilitzants no s'ha tingut en compte en aquest exemple.

Cost unitari del tractament

- D'acord amb els nombres anteriors i la taxa d'interès aplicada del 3%, el cost anual equivalent serà de 0,31€ per cada tona de purí tractada (0,06 € per quilo de nitrogen recuperat en forma de digerit). Cal tenir en compte que sense la venda de l'electricitat el cost unitari pujaria fins a 11,41 € per tona de purí tractat (2,38 € per quilo de nitrogen recuperat).

Taula resum del balanç econòmic

Concepte	Costos		Ingrés (€)
	Total	CAE	
Obra civil	350.000	23.525	
Maquinària	160.000	18.757	
Funcionament	-	55.000	
Costos totals	510.000	97.282	
Venda d'energia elèctrica			94.634
Balanç anual (€/any)		2.648	
Cost unitari de tractament (€/t)		0,31	
Cost del digerit (€/t)		0,32	
Cost del nitrogen gestionat (€/kg)		0,06	
Cost del fòsfor gestionat (€/kg)		0,49	

^a Cost anual equivalent.

Els costos d'inversió i d'operació seran majors en una planta de tractament més intensiva, en funció de les característiques i la grandària de la instal·lació, però aquests es poden veure compensats per un major rendiment i per la generació d'energia tèrmica i elèctrica. No obstant això, la viabilitat econòmica dependrà en gran mesura de la normativa i els incentius a la producció d'energia elèctrica de fonts renovables, o del biometà per a usos en automoció o la injecció en xarxa de gas natural. El rang de costos unitaris disponibles a la bibliografia per a aquest tipus d'instal·lacions també és molt variable i pot arribar fins a 5,02€ per tona de purí tractat, un cop descomptats els ingressos per l'estalvi i la venda energètica, en una granja de 2.950 porcs d'engreix i 500 mares instal·lada a Dinamarca que no rep cap mena de subvenció. A la Taula 3.4.1 s'ofereix un exemple per a l'estimació dels costos de tractament d'una instal·lació hipotètica per al tractament dels purins d'una granja de vacum de llet en unes condicions més properes a les del nostre entorn.