

Resum

Durant el període setembre 2007 – maig 2008 es va dur a terme una investigació sobre els accessoris necessaris per al correcte funcionament d'un sistema de producció de biogàs de baix cost. La investigació va tenir lloc en el marc d'una actuació de la ONG peruana Ciudad Saludable en el *Parque Porcino de Ventanilla*. El Projecte d'aquesta ONG contempla la remodelació de les granges per tal de millorar les condicions de vida dels grangers, dels animals i els problemes ambientals relacionats amb aquesta activitat. A tal efecte es van construir 3 biodigestors, dos de tipus tubular de plàstic i un d'obra amb cúpula de plàstic.

L'objecte d'aquest PFC ha estat la construcció dels 2 biodigestors tubulars de plàstic. Aprofitant la seva construcció es van dissenyar i avaluar una sèrie d'accessoris per tal de millorar el funcionament del sistema global.

Es van construir dos tipus de filtre de H_2S , amb rebliment de encenalls de ferro oxidats. No es presenten resultats quantitius, però sí una comparativa dels filtres instal·lats, així com un estudi d'alternatives previ, on es van considerar altres solucions.

Es va construir també dos tipus de dipòsits d'emmagatzematge del biogàs. Aquests inclouen un sistema de compressió del dipòsit, per a poder abastir als cremadors amb el biogàs a una certa pressió, per tal de millorar-ne la combustió.

Per últim es van fer una sèrie d'experiments amb cuines de GLP modificades per a biogàs. L'objectiu d'aquests experiments era determinar quina configuració era la més eficient per a aquesta modificació.





Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
GLOSSARI	5
PREFACI	7
INTRODUCCIÓ	11
1. DIGESTIÓ ANAERÒBIA	13
1.1 Biologia de la digestió anaeròbia	14
1.2 Tecnologies de biodigestors rurals	17
1.2.1 Biodigestor de cúpula fixa	19
1.2.2 Biodigestor de cúpula flotant	19
1.2.3 Biodigestor tubular de plàstic	20
1.2.4 Comparativa dels diferents tipus de biodigestors	21
1.3 Impacte dels biodigestors en l'àmbit rural	22
2. EI PARQUE PORCINO DE VENTANILLA I EL SISTEMA DE BIODIGESTIÓ	27
2.1 El Parque Porcino de Ventanilla	27
2.1.1 Marc geogràfic i històric	27
2.1.2 Problemàtiques	28
2.2 Sistemes de biodigestió implantats	34
2.2.1 Biodigestor tubular de plàstic	34
2.2.2 Biodigestor d'obra de flux pistó	35
2.2.3 Accessoris de la instal·lació de biodigestió	36
2.2.4 Aiguamolls artificials	39
2.2.5 Corral i canals de recollida	40
2.3 Granges	42
2.3.1 Alejandro	43
2.3.2 Sixto	46
2.3.3 Jorge	49
3. ACONDICIONAMENT DEL BIOGÀS	53
3.1 Formació de l'H ₂ S	54
3.2 Característiques de l'H ₂ S	55
3.2.1 Propietats físico-químiques	55
3.2.2 Toxicitat	55
3.2.3 Reactivitat de l'H ₂ S	56
3.3 Tecnologies disponibles per a l'eliminació de H ₂ S	56
3.3.1 Processos en medi sòlid	57
3.3.2 Processos en medi líquid	60
3.3.3 Processos in-situ	60
3.3.4 Processos biològics	61
3.4 Estudi d'alternatives	62
3.4.1 Filtres avaluats	62
3.4.2 Estudi comparatiu	65
3.4.3 Conclusions de l'estudi d'alternatives	71
3.5 Disseny dels filtres	71
3.5.1 Rebliment	72
3.5.2 Disseny Alejandro	74



3.5.3 Disseny Sixto	77
3.5.4 Conclusions	79
4. EMMAGATZEMATGE DEL BIOGÀS	83
4.1 Característiques i requisits de l'emmagatzematge de biogàs en instal·lacions de baix cost	84
4.1.1 Seguretat	84
4.1.2 Pressió	85
4.1.3 Dipòsit regulador (dimensions)	85
4.2 Tecnologies disponibles	86
4.2.1 Cúpula flotant	86
4.2.2 Dipòsit de plàstic	86
4.3 Disseny dels dipòsits instal·lats	88
4.3.1 Dipòsit ALEJANDRO	88
4.3.2 Dipòsit SIXTO	92
4.3.3 Conclusions	94
5. COMBUSTIÓ DEL BIOGÀS	97
5.1 Introducció a la combustió	97
5.2 Propietats principals dels combustibles	98
5.3 Propietats del biogàs	99
5.4 Cremadors parcialment airejats	100
5.4.1 Descripció	100
5.4.2 Aspectes de disseny	101
5.4.3 Problemes d'estabilitat de la flama	106
5.4.4 Adaptació de cremadors convencionals per a l'ús amb biogàs	107
5.5 Calefactors	107
5.5.1 Experiències de calefactors usats amb biogàs	108
5.6 Experiments	110
5.6.1 Metodologia	111
5.6.2 Cremadors	115
5.6.3 Resultats i discussió	119
5.6.4 Conclusions	124
6. AVALUACIÓ ECONÒMICA	127
7. IMPACTE SOCIAL DEL PROJECTE	131
8. AVALUACIÓ DE L'IMPACTE AMBIENTAL DEL PROJECTE	133
8.1 Aire	133
8.2 Aigua	134
8.3 Sòl	135
CONCLUSIONS	137
AGRAÏMENTS	139
BIBLIOGRAFIA	141

ANNEX A / MANUAL PARA LA INSTALACIÓN DE UN BIODIGESTOR EN EL PARQUE PORCINO DE VENTANILLA

ANNEX B/ ALTRES TECNOLOGIES D'ELIMINACIÓ DE H₂S

ANNEX C / RECULLS DE PREMSA



Glossari

CS: Ciudad Saludable

DBO: Demanda Biològica d'Oxigen

GLP: Gasos Liguats de Petroli

PE: Polietilè

PTD: Biodigestor tubular de plàstic (Plastic Tubular Digester)

PVC: Clorur de Polivinil (PolyVinyl Chloride)

WBT: Test d'Ebullició d'Aigua (Water Boiling Test)





Prefaci

Aquest projecte s'origina en el marc de la cooperació entre la UPC i la ONG peruana CIUDAD SALUDABLE (CS). Aquesta col·laboració s'inicia l'any 2006, amb la participació d'un estudiant de la ETSEIB en un projecte de CS. Des d'aleshores, fins a 3 estudiants més de la UPC i alguns professors, s'han anat desplaçant periòdicament fins al Perú per a proporcionar suport a nivell tècnic en aquest projecte, a més d'un impuls considerable al seu desenvolupament. Fruit d'aquesta prolongada cooperació és un Conveni Marc de Cooperació entre CS i UPC de 2007, pel qual les dues institucions van acordar col·laborar en àrees d'interès mutu i posar en marxa programes que inclourien la mobilitat de personal, la realització conjunta de projectes de desenvolupament humà i sostenible, la recerca en comú i la formació d'estudiants. Amb aquest Conveni Marc i un Conveni Específic per al desenvolupament del *Parque Porcino de Ventanilla* es pretén donar suport i reconeixement oficial a la relació interinstitucional i enfortir de cara el futur les pròximes actuacions en comú.

La meva col·laboració amb CS ha consistit en una estada de 9 mesos a Lima, entre setembre de 2007 i maig de 2008, treballant no tan sols en tasques purament d'investigació i redacció del meu projecte acadèmic, sinó també en la planificació i organització del projecte, fins i tot en les tasques de treball no qualificat que eren necessàries per al seu correcte desenvolupament. La present memòria es centra, però, més en els aspectes acadèmics i tecnològics de la feina duta a terme, més que en les tasques de coordinació i gestió del projecte.

Aquesta estada ha estat possible gràcies a l'ajut econòmic del Centre de Cooperació per al Desenvolupament (CCD) de la UPC, dins el marc de la *XV Convocatòria per a ajuts a accions de cooperació (2007)*.

Origen del projecte

CS és una ONG peruana creada fa uns 5 anys, però amb un personal directiu amb més de 15 anys d'experiència treballant en projectes de desenvolupament. El seu eix de treball és la gestió dels residus sòlids. Realitzen assessories ambientals per a moltes municipalitats de diferents ciutats arreu del Perú, alhora que reben finançament



d'organismes internacionals de cooperació i fundacions privades d'arreu del món per dur a terme projectes de desenvolupament, sempre lligats a temes ambientals i de gestió de residus. Alguns dels seus projectes amb més èxit han estat la creació de microempreses de recicladors d'escombraries a la ciutat de Pucallpa o el Pla de Gestió Sostenible dels Residus Sòlids a Carhuaz. Actualment estan duent a terme un ambiciós projecte de desenvolupament d'un Pla Integral de Gestió de Residus Sòlids per a 10 districtes de l'extraradi de Lima (Ventanilla, Puente Piedra, Comas, San Juan de Lurigancho, Ate Vitarte, Lurín, San Juan de Miraflores, Villa María del Triunfo, Villa El Salvador i Pachacamac), que engloben uns 3,5 milions d'habitants.

La recerca que s'ha dut a terme en aquest Projecte de Final de Carrera s'emmarca dins un projecte de desenvolupament d'abast més ampli i pràctic, que és el que duu per títol "*Mejora de las condiciones de vida de las familias porcicultoras del Parque Porcino de Ventanilla, mediante la implementación de un sistema piloto de biodigestión, Lima, Perú*", finançat per la Fundació ROVIRALTA a través de la Fundació CODESPA i executat per Ciudad Saludable. Aquest al seu torn, forma part del programa *Mejora de las condiciones de vida de los porcicultores del Parque Porcino de Ventanilla* de Ciudad Saludable, al qual la UPC s'ha compromès a donar suport mitjançant la signatura de l'esmentat Conveni

El projecte en que s'emmarca aquest PFC és la segona fase del que CS va iniciar al *Parque Porcino de Ventanilla* l'estiu de l'any 2006. Aquesta primera fase va consistir en un estudi de viabilitat de la tecnologia de digestió anaeròbia com a tractament per als residus orgànics de les granges del *Parque*. Fruit d'aquesta recerca van resultar-ne dos PFCs, un de l'estudiant d'Enginyeria Industrial de l'ETSEIB, Manel Gà Miz, i l'altra de Mabel Almeida, estudiant d'Enginyeria Ambiental a la Universidad Nacional Agraria de La Molina (UNALM).

Els objectius d'aquesta segona fase del projecte són:

- Enfortiment de les famílies i associacions del *Parque Porcino*
- Millora de les granges i dels plans de cria i alimentació dels porcs
- Millora de la gestió de residus per a la millora de les condicions sanitàries, aprofitament de les excretes per a la generació de biogàs, per al seu ús com a font d'energia domèstica, i la producció d'adob orgànic



- Creació d'horts ecològics familiars orientats a la millora de l'alimentació

El projecte s'inicia amb els treballs en tres granges pilot. En aquestes granges es desenvolupen els biodigestors, es rehabiliten els corrals, es creen horts ecològics que aprofitin l'adob orgànic, es construeixen aiguamolls artificials per depurar les aigües domèstiques, es capacita als grangers en cria de porcs i se'ls implica com a promotors de la tecnologia dintre del *Parque Porcino*. Posteriorment, es seleccionen 5 noves famílies on es duran a terme les millores investigades i desenvolupades en aquestes primeres granges pilot.

A dia d'avui, s'han dut a terme les següents etapes d'aquest projecte:

- Disseny dels biodigestors familiars per a cadascuna de les 3 granges pilot, dos biodigestors tubulars de plàstic i un d'obra amb cúpula flexible (PFC Cristina Cugat, no presentat, ETSEIB-UPC).
- Nou disseny de la distribució dels corrals i altres instal·lacions en una de les granges (PFC Maria Domingo, no presentat, ETSECCPB-UPC)
- Rehabilitació dels corrals en les 3 granges pilot.
- Construcció i posada en marxa dels 3 biodigestors (TFC Elena San Juan, 2008, IQS)
- Construcció de 3 aiguamolls artificials (TFC Ivan Gilgado, 2008, IQS)
- Capacitació a 25 famílies del *Parque Porcino* sobre cria d'animals, biodigestió i aiguamolls artificials. Selecció de 5 d'aquestes famílies com a nous beneficiaris del projecte.

Actualment, l'equip de CS que continua treballant en el projecte, es troba instal·lant els 5 nous biodigestors. Les obres de remodelació dels corrals de les 5 noves granges ja han estat acabades i estan en l'etapa de posada en marxa dels biodigestors. El compromís de la Fundació Roviralta com a finançadora, dels beneficiaris fins ara del projecte i de les associacions del *Parque Porcino* semblen assegurar la continuïtat d'aquest projecte.





Introducció

Objectius del projecte

Els objectius generals d'aquest projecte són:

- Estudiar les diferents aplicacions del combustible (biogàs) obtingut de la fermentació anaeròbia en entorns agropecuaris empobrits amb l'objectiu de millorar la qualitat de vida dels usuaris
- Analitzar i valorar la viabilitat de la aplicació del biogàs per a cobrir les necessitats energètiques d'una granja en el *Parque Porcino de Ventanilla*.
- Dissenyar diversos equips per l'aprofitament del biogàs, optimitzant la relació entre eficiència del dispositiu i recursos invertits en la seva construcció i ús (tecnologia apropiada).

Els objectius particulars del projecte són els següents:

- Estudi de la combustió del biogàs. Adaptació de cuines convencionals per al seu ús amb biogàs. Comparació entre diversos dissenys.
- Disseny i construcció de diferents sistemes d'emmagatzematge del biogàs. Disseny de sistemes de compressió d'aquest dipòsit.
- Disseny i construcció de diferents filtres d'àcid sulfhídric. Anàlisi i comparació dels sistemes.
- Redacció d'un manual de disseny i construcció d'un biodigestor tubular de plàstic (PTD).

Abast del projecte

Aquest Projecte de Final de Carrera s'ha dut a terme en dues fases: una primera fase comprèn l'estada a Lima (Perú), des de setembre de 2007 fins a maig de 2008. En aquesta fase es va dur a terme la construcció dels biodigestors que es presentaran en el capítol 2, així com tota la feina experimental que és objecte d'aquesta Memòria. En aquesta estada vaig formar part de l'equip del projecte de Ventanilla de Ciudad Saludable. Es tractava d'un equip multidisciplinar, sota la direcció de la cap de projecte, una estudiant peruana de Enginyeria Ambiental. L'equip el completavn una altra estudiant



d'Enginyeria Ambiental, dos estudiants més de Zootècnia i quatre cooperants: un enginyer civil anglès i tres estudiants d'Enginyeria Química espanyols (jo entre ells). La meva responsabilitat es va centrar, junt amb una Enginyera Química, en la construcció dels biodigestors i sobretot en els sistemes necessaris per als seu ús eficient. Tot i així vaig dur a terme moltes altres tasques i vaig assumir moltes altres responsabilitats. Vaig ajudar activament a la construcció dels dos biodigestors tubulars de plàstic, a la construcció dels tres aiguamolls artificials, a la instal·lació de la conducció de biogàs en les tres granges, em vaig encarregar de la construcció de dos filtres d'H₂S, vaig dur a terme l'adaptació de les cuines per al seu ús amb biogàs i l'adaptació d'un calefactor per a garrins. Vaig redactar també un manual d'instal·lació del biodigestor, amb l'ajut d'altres col·laboradors de CS, que serveix actualment de guia per a la instal·lació dels nous biodigestors que s'estan implantant actualment. Així mateix vaig col·laborar en les tasques de programació, planificació i seguiment del projecte, incloent una reformulació del projecte per tal d'adequar els objectius inicials als avenços assolits i a la realitat que ens varem trobar conforme avançàvem amb el desenvolupament del projecte.

Amb l'objectiu d'aprofundir en el context tècnic i social de l'entorn del Projecte, es van realitzar diverses visites a diferents indrets del Perú. Al setembre de 2007 es va fer una visita a una granja ecològica de les afores de Lima, on operen un biodigestor de tipus xinès. Es va assistir posteriorment al curs *Taller práctico: diseño y construcción de biodigestores familiares de bajo costo* a càrrec de ITDG, al *Centro de Demostración y Capacitación en Tecnologías Alternativas* (CEDECAP) a Cajamarca a l'octubre de 2007. Finalment es va fer una visita al Centre Productiu Agropecuari *La Calera*, a Chincha, on generen biogàs amb els excrements de les gallines i l'utilitzen en calefactores per als pollets.

La segona fase d'aquest PFC ha tingut lloc a Barcelona, entre els mesos de maig a desembre de 2008, enfocada en la redacció de la present Memòria i els diferents Annexos.

La investigació efectuada no es pot considerar molt rigorosa degut a les especials característiques del projecte i del context en que s'ha dut a terme. Tanmateix, s'ha procurat en la mesura del possible aplicar els conceptes i metodologies adquirits al llarg dels Estudis Universitaris.



1. Digestió anaeròbia

La digestió anaeròbia és un procés biològic de degradació de la matèria orgànica que dóna com a producte energètic el biogàs i té lloc en ambients anaerobis, és a dir, en absència d'oxigen. El biogàs consisteix en una mescla de gasos, principalment metà i diòxid de carboni, però també conté traces d'altres gasos, com l'àcid sulfhídric o l'hidrogen. La composició típica del biogàs sol ser la següent:

Component	%
CH ₄	50-70
CO ₂	30-50
H ₂ S	0-3
H ₂	0-1

Taula 1.1: Composició del biogàs ([1], pg.4)

El substrat d'aquest procés és, habitualment, una barreja d'excrements d'origen animal (vaca, porc, ovella,...) i aigua o orins. Sovint aquesta mescla es fa en unes proporcions excrements-líquid de 3:1 o 4:1, en funció de la quantitat de sòlids totals i el nivell de sequedat dels excrements. La concentració de sòlids totals de la mescla ha d'estar al voltant del 6-8%.

Des de un punt de vista energètic, és un procés molt eficient, ja que de l'energia química que contenen les matèries primeres del procés, un 90% queda retinguda en els enllaços químics del metà, mentre que l'altre 10% és consumit en el creixement dels microorganismes. Comparant aquest procés amb la degradació de la matèria orgànica per via aeròbia, en la qual el 60% de l'energia inicial es consumeix en el creixement cel·lular i l'altre 40% es transforma en calor, s'observa el potencial que té la digestió anaeròbia en la recuperació energètica dels residus orgànics [2].

A banda del biogàs, la digestió anaeròbia genera un altre producte, que consisteix en un efluent líquid, molt ric en nutrients, amb una càrrega orgànica molt menor a la del substrat inicial i amb un nombre de patògens, sinó nul, molt reduït. Aquest efluent, anomenat *biol*, al tenir tots els nutrients completament hidrolitzats, és un fertilitzant excel·lent per als



conreus, ja que les plantes els assimilen amb molta més facilitat que si, per exemple, s'adoben els camps amb els fems directament. A vegades, però, la generació d'aquest efluent pot superar el seu consum, produint-se una descompensació que pot comportar problemes alhora de desfer-se d'aquests llots.

1.1. *Biologia de la digestió anaeròbia*

Aquest procés és molt complex, ja que hi intervenen un gran nombre d'enzims, bacteris i productes intermedis. A grans trets, es pot classificar el procés en tres etapes:

- Hidròlisi
- Etapa fermentativa (acidògenesi i acetogènesi)
- Metanogènesi

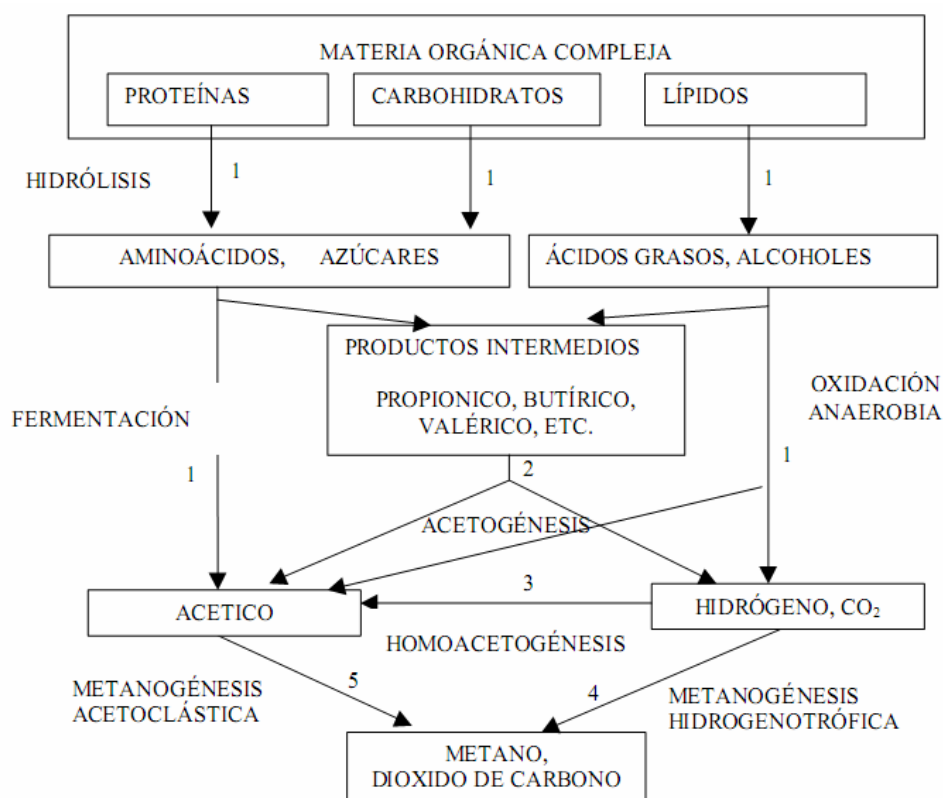


Figura 1.1- Esquema de reaccions de la digestió anaeròbia [3]

- I. **HIDRÒLISI:** En aquest primer pas, les macromolècules orgàniques (carbohidrats, lípids, proteïnes) són descomposades per efecte d'enzims extracel·lulars, com la



amilasa, la lipasa o la proteasa, de manera que esdevenen molècules més senzilles com ara pèptids o monosacàrids.

- II. **FERMENTACIÓ:** La següent etapa després de la hidròlisi és la fermentació, o etapa *acidogènica*. Els productes d'aquesta etapa són l'àcid acètic, així com hidrogen i diòxid de carboni. Altres subproductes d'aquesta fermentació són alguns àcids grassos volàtils com ara el propiònic, butíric, valèric, etc. En aquest segon cas, com no són uns substrats aptes per als bacteris metanogènics, aquestes molècules encara pateixen un altre degradació, que s'anomena *acetogènesi*. Els productes de la acetogènesi són l'àcid acètic, l'hidrogen i el diòxid de carboni. Un altre tipus d'acetogènesi és la que produeix àcid acètic a partir de l'hidrogen i el diòxid de carboni, anomenant-se en aquest cas *homoacetogènesi*.
- III. **METANOGÈNESI:** L'última etapa del procés de fermentació anaeròbia és la formació de metà, o etapa de *metanogènesi*. En aquesta etapa els bacteris metanogènics formen molècules de metà a partir dels substrats com l'àcid acètic, l'hidrogen i el diòxid de carboni, o en menor mesura a partir de metanol o àcid fòrmic. Aproximadament un 70% del metà generat es forma a partir de l'àcid acètic [3].

La digestió anaeròbia és el resultat del treball de tot un consorci de bacteris, que treballen de manera simbiòtica. Per exemple, els bacteris acidogènics que són anaerobis facultatius (tant poden sobreviure en condicions anaeròbies com aeròbies) reaccionen amb l'oxigen present, creant així les condicions anaeròbies necessàries per als bacteris metanogènics, que són anaerobis estrictes. Aquests últims, per contra, eliminen l'hidrogen en la reacció de producció de metà, essent l'hidrogen un component inhibidor de l'activitat dels bacteris acidogènics [1].

Aquest tipus de fermentació és present de manera natural en diverses situacions. Així la podem trobar com a responsables del gas dels pantans, on es produeixen aquestes reaccions en els ambients anaerobis de l'interior dels fangs dels pantans. També a l'interior de l'estómac dels ruminants trobem aquesta fermentació i fins i tot en els sòls dels boscos, en petits microambients anaerobis.



Temperatura

La temperatura té una gran influència en la fermentació anaeròbia, pel que fa a la velocitat de digestió. En principi el procés es pot dur a terme des de 0°C fins als 97°C ([3], pg. 50), reconeixent-se però tres rangs principals de temperatura:

- Psicrofílic: per sota de 25°C
- Mesofílic: entre 25°C y 45°C
- Termofílic: entre 45°C i 65°C

La temperatura influeix en la velocitat de reacció tant en aspectes fisico-químics com en aspectes bioquímics. La velocitat del procés depèn en gran mesura de la velocitat de creixement dels microorganismes, i aquesta taxa de creixement augmenta al fer-ho la temperatura, com és habitual en la majoria de processos biològics. D'altra banda, un augment de la temperatura implica una menor solubilitat de gasos com NH_3 , H_2S o H_2 , que poden actuar com a inhibidors de certs bacteris. D'aquesta manera el procés s'accelera, ja que la concentració d'aquests gasos disminueix en la fase aquosa. A més les sals augmenten la seva solubilitat amb la temperatura, de manera que els nutrients són més accessibles per als microorganismes. Per altra banda, també augmenta la solubilitat d'alguns àcids grassos volàtils, que també poden actuar com a inhibidors en un cert rang de concentracions.

pH

Els microorganismes responsables de la fermentació necessiten un pH neutre o lleugerament alcalí, permetent algunes petites oscil·lacions. Per sota d'un pH 6 o per sobre de 8,3, el procés s'inhibeix, tot i que aquesta inhibició és reversible, però pot variar molt el temps de recuperació. Sembla que el pH influeix sobre l'activitat enzimàtica dels microorganismes, canviant l'estat dels seus grups ionitzables com ara els grups carbonil o amino. També afecta alguns equilibris químics decisius pel correcte funcionament de tot el procés, com són els equilibris diòxid de carboni – bicarbonat ($\text{CO}_2 - \text{HCO}_3^-$) o el de l'amoniac – amoni ($\text{NH}_3 - \text{NH}_4^+$).

Inhibidors

Tant l'amoni com l'amoniac lliure poden actuar com a inhibidors dels bacteris metanogènics a partir de determinades concentracions, que depenen de diversos factors



com la temperatura, el tipus de substrat, l'adaptació dels bacteris, el tipus de reactor, etc. [3]. En general es considera que una concentració da partir de 1700mg/l de N-NH₄ pot provocar inhibició, tot i que els bacteris, amb el temps, poden adaptar-se i tolerar concentracions de fins a 5000-7000 mg/l [1]. En el cas del nitrogen amoniacal, les concentracions tolerables arriben fins als 200-300 mg N-NH₃/l¹.

Uns altres inhibidors importants poden ser els àcids grassos volàtils. Si la taxa d'acidogènesi i acetogènesi s'accelera en relació a la metanogènesi, pot produir-se una acumulació d'aquests productes intermedis que provoqui la acidificació del medi, i pot acabar inhibint l'acció dels bacteris metanogènics. És habitual en fer la càrrega inicial d'un biodigestor, afegir una petita quantitat de calç, per tal de compensar l'acidificació inicial del medi dins el digestor degut a la producció d'àcids grassos abans que els bacteris metanogènics s'hagin activat i comencin a descomposar-los [3].

Òbviament, al tractar-se d'un procés biològic, compostos com antibiòtics, desinfectants o detergents, utilitzats habitualment en les tasques agrícoles i ramaderes, poden inhibir completament el procés.

1.2. Tecnologies de biodigestors rurals

Els biodigestors són els reactors on és provoca de manera controlada la digestió anaeròbia per a l'obtenció del biogàs i del biol. La mescla d'excrements i aigua s'introdueix en el reactor, on es manté a una certa temperatura i amb un cert temps de retenció. La composició i naturalesa del substrat condiciona els paràmetres de funcionament del digestor, a nivell de rati de càrrega òptim i temps de retenció. La majoria d'aquests reactors són de tipus continu de mescla perfecta (CSTR), però n'existeixen també de flux pistó així com d'altres configuracions més complexes, amb reactors en sèrie (Figura 1.2). En els últims anys s'han desenvolupat nous tipus de reactors, que treballen amb la biomassa fixa i no en suspensió, com el reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Aquests nous tipus de biodigestors redueixen els temps de retenció de 20-30 dies dels digestors convencionals a unes poques hores [4]. La seva efectivitat està

¹ N-NH₄ correspon al nitrogen en forma d'amoni (NH₄⁺) mentre el N-NH₃ correspon a la forma amoniacal de l'amoni (NH₃)



demostrada amb corrents amb una càrrega orgànica mitjana, però tenen problemes d'obturació tractant purins, degut a la seva elevada densitat i contingut de sòlids en suspensió.



Figura 1.2 – Biodigestor CSTR de 750 m³ a La Calera (Chinchá, Perú)

Per a la producció de biogàs a nivell domèstic o rural, els biodigestors han de ser més senzills. La gran majoria d'ells no tenen agitació mecànica ni control o regulació de la temperatura interior, per l'estalvi econòmic d'instal·lació que això implica i per l'absència d'energia elèctrica en la majoria dels casos. Treballen sempre amb la biomassa en suspensió. Els dos tipus de biodigestors rurals més habituals són el tanc de mescla perfecta i el de flux pistó.

Els biodigestors rurals es poden classificar de dues maneres. La primera manera seria en funció del mètode de càrrega, on hi trobem tres tipus:

- **Discontinu o “batch”**: s'alimenten un cop i es deixa que produeixi biogàs fins que s'esgoti el substrat. Es buida sencer el digestor, i es torna a omplir.
- **Continu**: el biodigestor s'alimenta regularment (diàriament, setmanalment) i es va buidant automàticament a la mateixa velocitat.
- **Semi-discontinu o “semi-batch”**: el biodigestor s'alimenta en períodes de temps molt llargs (per exemple, un cop al mes) alhora que es buida automàticament.



L'elecció d'un tipus de biodigestor o un altre s'adaptarà al règim de generació del substrat. En el cas concret del *Parque Porcino*, com que les granges generen una quantitat suficient d'excrements cada dia, es va optar per uns biodigestors en règim continu.

L'altra classificació, que potser resulta més útil, és segons el tipus de construcció del biodigestor. Principalment es troben tres tipus de biodigestors rurals:

1.2.1. Biodigestor de cúpula fixa

El biodigestor de cúpula fixa, conegut com a *tipus xinès*, consisteix en una cambra enterrada construïda amb maons o amb formigó, amb dos conductes, un d'entrada i un de sortida, i una obertura superior per on es pot entrar quan cal buidar-lo i on va adaptada la sortida del gas (Figura 1.3). A l'interior del recinte es crea un ambient anaerobi i hi té lloc la fermentació. El seu funcionament s'assimila al de un tanc de mescla perfecta. La seva forma cilíndrica i la lleugera agitació que es provoca amb cada càrrega fan que la mescla sigui força homogènia. La peculiaritat d'aquest tipus de digestor és que la pressió del biogàs al seu interior és variable, en funció de la producció i consum del mateix. És més econòmic que el digestor de cúpula flotant (apartat 1.2.21.2.2), però pot donar més problemes d'estanqueïtat.

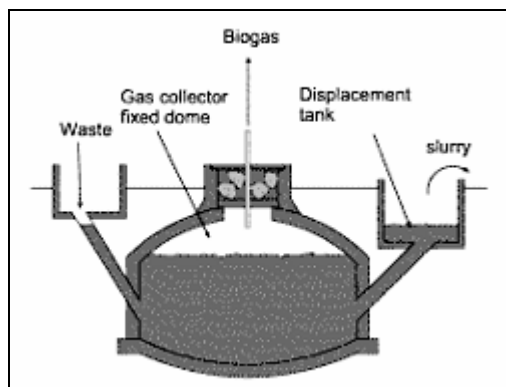


Figura 1.3 – Biodigestor de cúpula fixa [5]

1.2.2. Biodigestor de cúpula flotant:

El biodigestor de cúpula flotant, conegut com a *model hindú*, és molt semblant al *xinès*, amb la diferència que la seva cúpula és mòbil (Figura 1.4). Així, quan es genera gas, la



cúpula s'eleva, i al ser consumit, la cúpula baixa, per l'interior d'unes guies verticals que eviten que es desequilibri. Aquesta mobilitat permet que la cúpula exerceixi sempre una pressió aproximadament constant sobre el volum de gas emmagatzemat. L'absència de fluctuació en la pressió del gas provoca que la seva combustió posterior sigui més eficient. La hermeticitat de l'espai d'emmagatzematge del gas es sol assegurar amb un segell hidràulic, que consisteix en un canal perimetral ple d'aigua a la boca superior del biodigestor, on s'introdueix la cúpula. Com a aspecte negatiu, cal esmentar l'alt cost que té la cúpula, que sol ser d'acer inoxidable per tal d'evitar els efectes de la corrosió. És per això que habitualment ha de ser reparada i/o substituïda periòdicament.

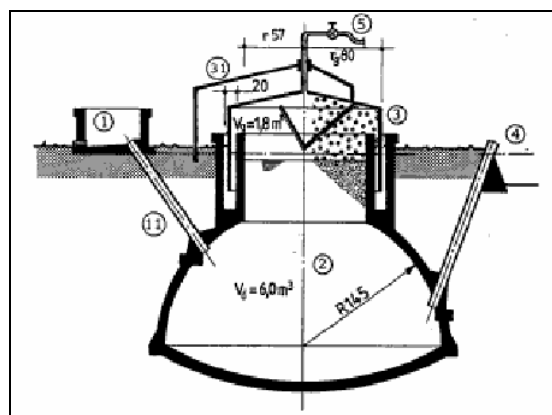


Figura 1.4 – Biodigestor de cúpula flotant [5]

1.2.3. Biodigestor tubular de plàstic:

El biodigestor tubular de plàstic (PTD, Plastic Tubular Digester) consisteix en una mànega de plàstic, que sol ser polietilè, amb els extrems lligats de manera ben hermètica a uns tubs (habitualment de PVC) que funcionen com a entrada i sortida del digestor. D'aquesta manera s'obté un recinte totalment aïllat de l'exterior, un cop els tubs estiguin plens amb la barreja d'aigua i excreta amb que s'alimenta el digestor. Especialment important és la col·locació del tub de sortida, ja que el nivell del líquid al interior del biodigestor serà el nivell de sobreiximent del tub de sortida, de manera que elevat o descendint aquest tub, es pot regular el nivell intern de líquid. El biogàs s'extreu per un orifici practicat a la part superior del plàstic (Figura 1.5). A l'interior del biodigestor es poden identificar 3 estrats: l'estrat inferior acumula els sediments. La fase líquida, que ocupa un 75-80% del volum total del biodigestor, és el medi on té lloc la fermentació anaeròbica. I l'espai superior, generalment un 20-25% del total, serveix com a volum de emmagatzematge del



biogàs generat. El funcionament d'aquest biodigestor és de flux pistó.

Aquest biodigestor es va començar a desenvolupar a finals dels anys 60 al Sud-est Asiàtic, a països com Taiwan i Vietnam, però recentment s'ha estès pel continent sud-americà, sobretot a Colòmbia, Brasil, Costa Rica, Bolívia, Perú,... L'avantatge més clar d'aquest tipus de biodigestor és el seu baix cost. És especialment adequat per a climes tropicals, on la temperatura sol ser elevada (per sobre de 20-25°C tot l'any), ja que la seva inèrcia tèrmica és molt petita, però les experiències als altiplans de Perú i Bolívia, demostren que també pot ser molt útil en climes més freds [6] [7].

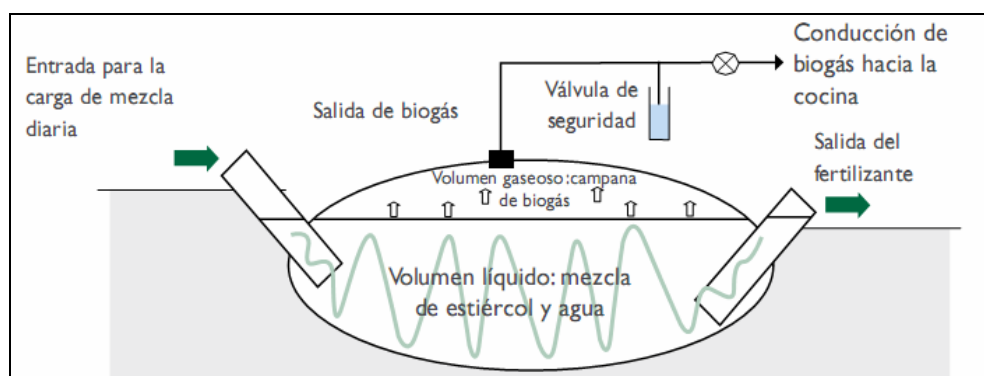


Figura 1.5 – Biodigestor tubular de plàstic (PTD) [7]

1.2.4. Comparativa dels diferents tipus de biodigestors

En la següent taula comparativa, es recullen els avantatges i desavantatges principals dels biodigestors presentats fins aquí:

	Biodigestor cúpula fixa (xinès)	Biodigestor cúpula flotant (hindú)	Biodigestor tubular plàstic (PTD)
Avantatges	<ul style="list-style-type: none"> • Cost moderat • Vida útil: 20 anys • No ocupa molt espai (enterrat) • Disseny compacte, sense parts mòbils, ni susceptibles a la corrosió • Crea llocs de treball locals 	<ul style="list-style-type: none"> • Vida útil: 15 anys • Pressió de sortida del gas constant • No presenta problemes d'estanqueïtat a la cúpula • Quantitat de gas emmagatzemat fàcilment visible 	<ul style="list-style-type: none"> • Baix cost • No necessita mà d'obra experta • Aprofita millor els climes càlids • Es pot construir amb materials del mercat local



Desavantatges	<ul style="list-style-type: none"> • Necessitat de mà d'obra experta • Problemes de fugues a la part de la cúpula • Pressió de sortida del gas variable • Dificultat d'excavació si el sòl es rocós 	<ul style="list-style-type: none"> • Cost elevat, principalment degut a la cúpula • Manteniment costós de la cúpula per evitar la corrosió 	<ul style="list-style-type: none"> • Vida útil curta (depenent del manteniment, pot assolir 5 anys màxim) • Possibilitat de trencament del plàstic • No genera llocs de treball locals
---------------	---	--	---

Taula 1.2 – Comparativa dels diferents tipus de biodigestors

Cal esmentar que els temps de vida útil presentats en la Taula 1.2 es refereixen a la durabilitat dels materials constructius. És habitual, però, que els biodigestors deixin de funcionar abans d'aquest període, per altres raons de caràcter tècnic, o d'altres de socials, culturals, etc...

1.3. *Impacte dels biodigestors en l'àmbit rural*

En els últims 40 anys la producció de biogàs ha despertat molt d'interès en molts països en vies de desenvolupament i en organismes internacionals dedicats a temes d'Energia i Desenvolupament (IEA [8], Banc Mundial [9], FAO [10]).

En l'àmbit rural, aquesta tecnologia té un gran potencial en molts aspectes. En el marc dels Objectius de Desenvolupament del Mil·lenni (ODM), que impulsa el Programa de les nacions Unides per al Desenvolupament (UNDP), la producció de biogàs pot contribuir en almenys 3 dels 8 punts que presenta aquesta Campanya [11]:

- Objectiu 1: Eradicar la pobresa extrema i la gana.
- Objectiu 4: Reduir la mortalitat infantil.
- Objectiu 7: Garantir la sostenibilitat del medi ambient.

Energia ecològica

El biogàs és una energia renovable, ja que les seves emissions de CO₂ són *neutres*, al tractar-se d'un combustible provinent de la biomassa. A més a més, és un procés de reciclatge i revalorització dels residus, en aquest cas orgànics, evitant els problemes ambientals que es deriven de la seva deposició final. Es tracta d'una tecnologia de *cicle*



tancat, on els residus esdevenen noves matèries primeres, emmarcant-se perfectament en el concepte de desenvolupament sostenible tant necessari de cara al futur. Els biodigestors eviten la contaminació de l'aigua i del sòl que provoquen els lixiviats provinents de excrements de la indústria agropecuària. També eviten la contaminació de l'aire, ja que si la digestió anaeròbia tingués lloc en condicions no controlades resultaria en emissions de metà, que és 21 vegades més contaminant que el CO₂ (en termes volumètrics) respecte l'impacte en l'Efecte Hivernacle [12]. En el cas concret del *Parque Porcino*, la contaminació de l'aire també es deguda a la incineració generalitzada per part dels *porcicultores* dels excrements generats a les seves granges, tal i com s'exposa en el capítol següent (veure 2.1.2.5.). Així mateix, en zones on el combustible habitual és la llenya, els biodigestors eviten els processos de desforestació. També el biol és un producte més adequat per als conreus en termes nutritius, sanitaris i ambientals, que no pas l'aplicació directa dels fems. A més, d'aquesta manera es contribueix a un balanç ecològic, ja que els nutrients retornen al sòl, cosa que no succeeix si els excrements o els residus vegetals són cremats [9].

Generació d'energia descentralitzada

Els biodigestors són plantes generadores d'energia que es poden ubicar pràcticament en qualsevol lloc, sense necessitat de grans infraestructures, sempre i quan tinguin a l'abast suficient matèria primera. D'aquesta manera la generació de l'energia es pot dur a terme en el mateix punt de consum. Així s'evita el transport de l'energia, que necessita d'unes grans infraestructures, com la xarxa elèctrica en el cas de l'electricitat o les carreteres en el cas dels combustibles, estalviant així les pèrdues energètiques que aquests sistemes comporten. A més es guanya en autonomia i autosuficiència.

Món rural

La tecnologia de la biodigestió és especialment apropiada per al món rural per diverses raons. D'entrada la matèria primera (fems animals) es troba a les granges i aquestes estan en les zones rurals. Els biodigestors s'integren perfectament en el cicle productiu agropecuari (Figura 1.6), aprofitant els residus animals i produint, a més del biogàs, fertilitzant orgànic per als conreus. A més, és en aquestes zones on sol haver-hi més escassetat de recursos energètics, per tant la producció de biogàs pot pal·liar aquesta mancança. Relacionat amb el punt anterior, la autogeneració de l'energia i la independència que això crea respecte als nuclis urbans genera una major confiança en si



mateixos en els habitants d'aquestes zones.

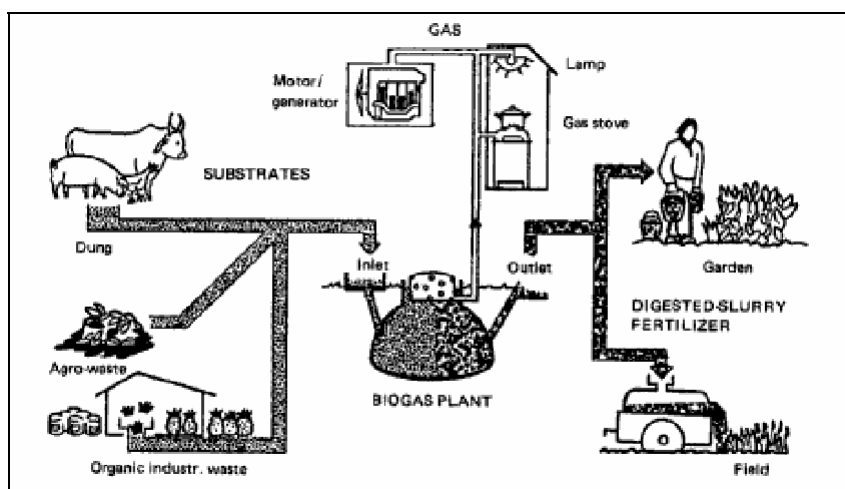


Figura 1.6 – Integració del biodigestor dins el cicle productiu agropecuari [2]

Salut i higiene

Un dels aspectes més positius del biodigestor són les millores en la higiene i en la salut que produeix en els seus usuaris. La millor gestió dels excrements dels animals redueix la possibilitat d'infeccions i contagis, degut a la disminució en la presència de vectors transmissors de malalties com ara mosques, mosquits, larves, cucs,... En el cas del *Parque Porcino* el costum habitual és acumular els excrements per tal que s'assequin i quan n'hi hagi prou, cremar-los. Aquestes piles d'excrements acumulats són un important focus de patògens. D'altra banda, la combustió del biogàs, en tractar-se d'un combustible gasós, és molt més neta que no pas la d'altres combustibles sòlids usats habitualment en àrees rurals empobrides, com són la llenya o la *bosta* (excrements assecats al sol). Els fums que genera la combustió d'aquests darrers, al ser aquesta més incompleta, contenen un percentatge de monòxid de carboni (CO) més elevat, així com una gran quantitat de partícules en suspensió i cendres, que els fa molt perjudicials per a la salut², sobretot de les dones, que són les que cuinen habitualment. Amb l'ús del biogàs, les malalties respiratòries així com les irritacions oculars degudes a la inhalació d'aquests

² S'estima que cada any moren 1,6 milions de persones al món degut a malalties respiratòries causades per els fums de focs oberts i cuines convencionals [13]



gasos, es redueixen considerablement [14].

Aspectes econòmics

A nivell econòmic un biodigestor també té un impacte important (obviant el fet clar de la inversió inicial necessària). D'entrada, comporta un estalvi en la compra de combustible. A més, la possibilitat d'usar el biol en comptes de fertilitzants químics artificials també redueix les despeses dels propietaris d'aquests sistemes. Així mateix, el seu ús pot afavorir l'obtenció de millors collites i per tant, majors ingressos. Un altre aspecte important, en el cas que el combustible usat fos llenya o excrement assecat, és l'estalvi de temps que suposa no haver d'anar a buscar llenya o recol·lectar els excrements i assecar-los, tasques que majoritàriament duen a terme les dones i els nens. Ara aquest temps es pot invertir en altres funcions, com ara més treball productiu que augmenti els ingressos de la família. Val a dir que aquest no és el cas dels *porcicultores* del *Parque Porcino*, que habitualment fan servir bombones de GLP per a cuinar.

Una implantació generalitzada de biodigestors pot tenir també un impacte macroeconòmic. La millor higiene i salubritat de les granges es tradueix en menys malalties i això en una menor despesa sanitària. També la pròpia generació d'energia, comporta una menor demanda de combustibles que molt sovint son importats, reservant així més divises al país per adquirir altres béns que no es puguin fabricar dintre les pròpies fronteres. Tanmateix, cal destacar que el benefici econòmic no sol ser un dels punts més favorables alhora de plantejar un programa d'implantació de biodigestors, on prevalen altres aspectes com el sanitari i l'ambiental.





2. El Parque Porcino de Ventanilla i el sistema de biodigestió

El treball objecte d'aquest PFC es va dur a terme en 3 granges del *Parque Porcino de Ventanilla*, a Lima, Perú. L'objectiu d'aquest capítol és presentar breument el *Parque Porcino* i les seves problemàtiques, i descriure després les actuacions que es van realitzar en les granges, i que van permetre l'estudi dels sistemes descrits més endavant en aquesta Memòria.

2.1. El Parque Porcino de Ventanilla

2.1.1. Marc geogràfic i històric

El *Parque Porcino de Ventanilla* es troba en el Districte de Ventanilla, Província Constitucional del Callao, en el Departament de Lima, Perú. Està situat uns 10 km al nord de Lima, al costat de l'Oceà Pacífic, a la riba nord del riu Chillón. Ocupa una superfície de 845 ha, amb unes 1228 parcel·les o *lotes*.



Figura 2.1 – Mapa de Lima i els seus districtes



Figura 2.2 – Imatge aèria del Parque Porcino de Ventanilla

Els terrenys del *Parque* van començar a ser ocupats de manera il·legal als anys 60, i els ocupants es van dedicar principalment a la cria de porcs de manera informal. L'any 1967, un Decret Suprem, declara aquests terrenys aptes per a aquesta activitat

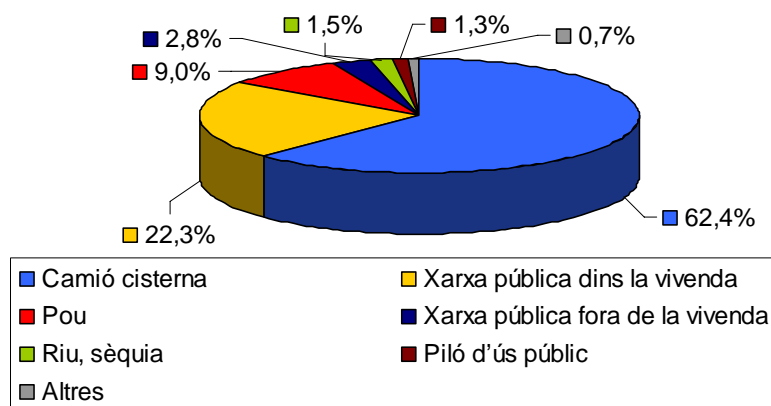


econòmica, i el *Parque Porcino de Ventanilla* s'inaugura oficialment l'any 1974. Tot i aquest reconeixement governamental, el *Parque* mai ha comptat amb la implicació de les autoritats a nivell de millores d'infraestructures i, fins al dia d'avui, les seves mancances en aquest àmbit són severes.

2.1.2. Problemàtiques

2.1.2.1. Aigua i sanejament

L'abastament d'aigua en el *Parque Porcino* és molt precari. Només algunes zones del *Parque* estan connectades a una xarxa d'abastament d'aigua, mentre que la gran majoria de les granges es fan dur l'aigua en camions cisterna i l'emmagatzemen en dipòsits de formigó o en bidons (Figura 2.4). Aquesta pràctica comporta molts problemes: d'entrada el preu de l'aigua dels camions cisterna és més de 4 vegades més car que l'aigua de la xarxa; l'emmagatzematge comporta molts cops pèrdues degut a fissures o fuites; i tot i que hi apliquen tractaments desinfectants (bàsicament clor) pot tenir lloc una proliferació d'insectes o patògens. Aquesta aigua l'usen principalment per al bestiar, per la neteja de la granja i per regar els vegetals que puguin conrear. Al Gràfic 2.1 podem veure com es reparteixen els tipus d'abastament d'aigua existents al *Parque Porcino*.



Gràfic 2.1 – Tipus d'abastament d'aigua al *Parque Porcino* [15]

No existeix cap xarxa de sanejament en els terrenys del *Parque Porcino* (Figura 2.3). El més habitual és que cada granja tingui el seu propi pou negre o fosa sèptica.



En aquestes condicions es fa molt difícil l'establiment i desenvolupament d'activitats econòmiques, siguin o no de caràcter pecuari.



Figura 2.3 – Abocament incontrolat d'aigües residuals



Figura 2.4 – Abastament d'aigua amb camió cisterna

2.1.2.2. Subministrament elèctric

El subministrament elèctric al *Parque Porcino* és molt limitat. Tan sols les vivendes més properes a l'entrada del Parc tenen connexió elèctrica, en la majoria dels casos, de forma il·legal. Els carrers i camins del Parc no estan electrificats i la manca d'il·luminació a les nits és una de les raons de les elevades taxes de delinqüència (sobretot robatoris d'animals) de la zona.

Un dels impediments de caràcter legal per a l'electrificació del *Parque Porcino* és la falta de titularitat dels grangers sobre les seves parcel·les. La majoria d'ells no tenen cap títol de propietat dels terrenys on desenvolupen les seves activitats i això els impedeix l'accés als serveis bàsics.

L'electrificació del Parc és factible, ja que en els mateixos terrenys del *Parque Porcino* es troba una central tèrmica de gas, de 300 MW de potència.

En aquestes condicions de precarietat del subministrament elèctric el desenvolupament d'activitats econòmiques es fa molt complicat.



2.1.2.3. Vivenda

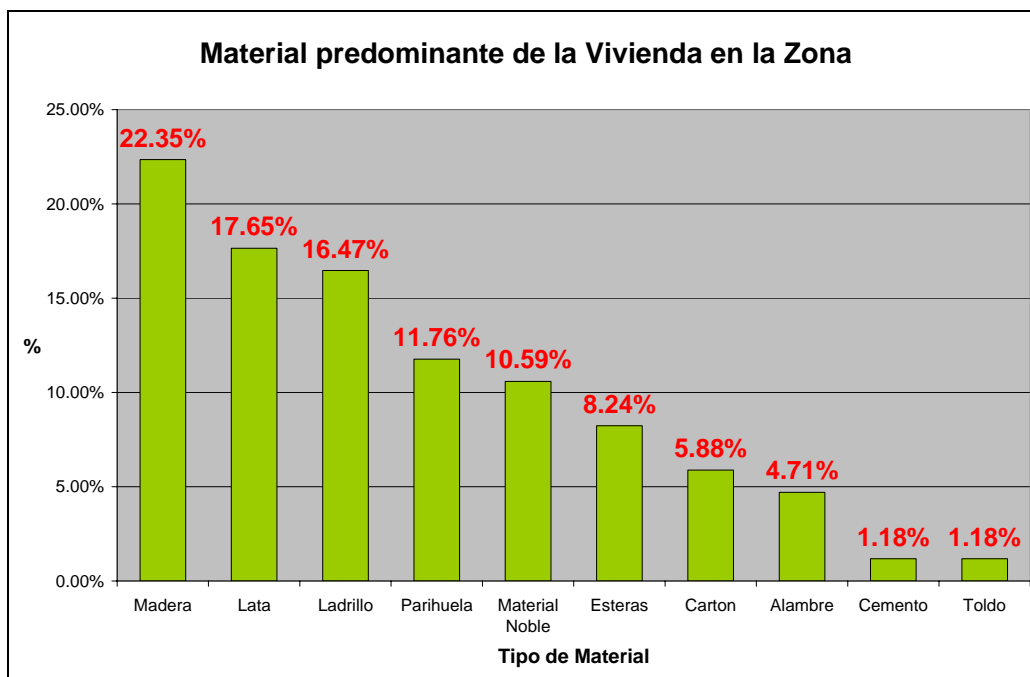
La gran majoria de grangers viu i treballa al *Parque Porcino*, tot i que molts d'ells tenen una vivenda en altres districtes de Lima (sovint molt lluny), però és molt habitual que sempre es quedi com a mínim una persona a la granja per evitar robatoris. Per tant es tracta de granges-vivenda. Les construccions de les granges solen ser molt precàries (Figura 2.5), amb una gran presència de fusta, metalls, palets (*parihuelas*) i d'altres materials reciclats, que precisament per això tenen una baixa qualitat (Gràfic 2.2).

En la majoria dels casos, la distància entre l'habitatge i els corrals dels animals no és la adequada, contribuint això a les condicions de insalubritat i poca habitabilitat generalitzades al *Parque Porcino*.



Figura 2.5 – Materials de construcció en el *Parque Porcino*





Gràfic 2.2 – Materials de construcció al *Parque Porcino* [15]

2.1.2.4. Seguretat

Existeix un servei de policia irregular i deficient, sense horari. Els robatoris són molt habituals degut a aquesta manca de seguretat, a la precarietat de les granges i les seves mesures de seguretat i a la nul·la il·luminació de les vies a les nits. En alguns casos, els propis *porcicultores* s'agrupen i organitzen grups de vigilància nocturna.

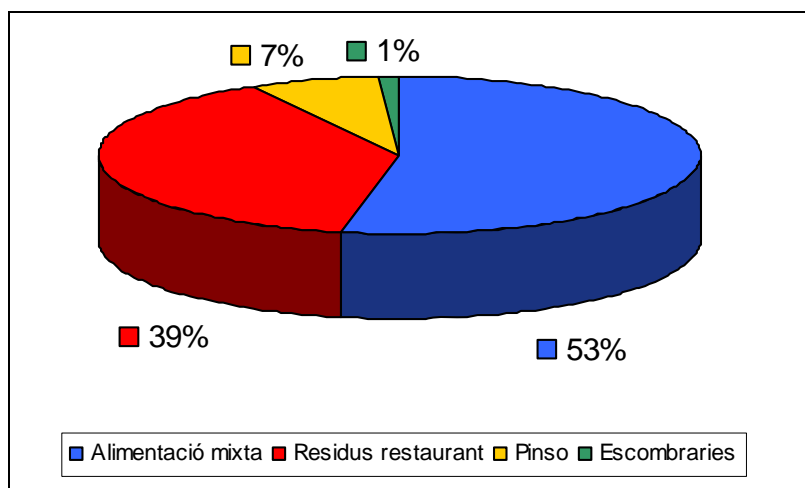
2.1.2.5. Activitat pecuària

La principal activitat econòmica del *Parque Porcino* és la cria de porcs, tot i que a vegades es complementa amb d'altres animals, com pollastres, *cuys* (conills d'índies) o galls d'indi. En general la cria és molt informal, poc o gens tecnificada, i als *porcicultores* els hi manquen els coneixements tècnics per tal de millorar la productivitat de les seves granges.

L'alimentació dels porcs habitualment consisteix en residus orgànics de restaurant, que es porten des de Lima i es venen granja per granja (Figura 2.6b). El preu d'aquest aliment es



troba al voltant dels S./20¹ per un cilindre d'uns 200L (0,07 S./kg). Gairebé sempre aquests residus, tot i ser majoritàriament orgànics, contenen plàstics, papers i altres elements no comestibles pels porcs. A més, aquest menjar arriba a vegades en un estat d'incipient putrefacció, amb els problemes sanitaris que això comporta per als animals, els seus criadors i els consumidors finals. Un altra modalitat d'alimentació, més adequada però molt més cara, és el pinso balancejat, però el seu preu, que ronda 1 S./kg, fa que sigui una opció molt minoritària. Actualment ja quasi cap *porcicultor* alimenta els seus porcs directament amb escombraries provinents dels abocadors (*botaderos*), pràctica que era molt habitual alguns anys enrere (Figura 2.6a). La majoria dels *porcicultores* es decanta per una alimentació mixta, on els porcs més grans mengen residus orgànics de restaurant i els garrins són alimentats amb pinso. Al Gràfic 2.3 es pot veure la distribució de les modalitats d'alimentació existents en el *Parque Porcino*.



Gràfic 2.3 – Tipus d'alimentació dels porcs al *Parque Porcino*

Respecte de les excretes generades pels porcs, el seu destí sol ser la acumulació en algun punt de la granja, fins que sigui ben seca, per ser incinerada posteriorment (Figura 2.7). En d'altres casos, les excretes són acumulades fora dels límits de la granja, i aleshores ni tan sols són incinerades. D'altres les enterren en algun punt de la seva granja. Una minoria sí comercialitza les seves excretes com a adob, però sense haver-ne

¹ Cotització Nuevo Sol Peruano (S./) – US Dollar (\$) S./3.00 = \$1 (1-nov-2008)



fet cap procés de compostatge previ. Els residus domèstics (plàstics, envasos,...) molts cops tenen el mateix destí que les excretes, ja que tot i que el districte de Ventanilla té un sistema de recollida pública d'escombraries, el *Parque Porcino* queda exclòs del seu circuit habitual.



Figura 2.6 – Alimentació dels porcs: (a) Escombraries. (b) Residus de restaurant



Figura 2.7 – Incineració d'excrements i residus

Veient totes aquestes mancances, Ciudad Saludable es va decidir a actuar en aquesta zona. La visió de Ciudad Saludable de la millora de la qualitat de vida de les persones i la protecció ambiental, mitjançant la millora en la gestió dels residus sòlids, encaixava perfectament en el context del Parque Porcino. El projecte contempla l'actuació en molts dels àmbits deficitaris del Parque (Taula 2.1).



Àmbit	Actuació	Impacte
Abastiment d'aigua	Aiguamolls artificials	Reutilització de l'aigua de rentat de corrals per a reg. Estalvi d'aigua per a reg degut a ús de l'aigua clarificada.
Sanejament	Biodigestor	Eliminació ambientalment apropiada dels residus orgànics
Infraestructures	Remodelació corrals	Millora de la salut i higiene dels animals i dels <i>porcicultores</i>
Energia	Biodigestor	Estalvi del combustible gràcies a la substitució amb biogàs

Taula 2.1 – Actuacions i impactes del Projecte de Ciudad Saludable al *Parque Porcino*

2.2. Sistemes de biodigestió implantats

Tot i que no és objecte d'aquest PFC l'explicació detallada del disseny i la construcció dels dos tipus de biodigestors instal·lats, a continuació s'exposarà breument el seu funcionament, per tal de situar en context les dades presentades en els capítols successius.

2.2.1. Biodigestor tubular de plàstic

Dos dels tres biodigestors instal·lats són del tipus tubular de plàstic (PTD). La construcció, tal i com s'ha descrit en l'apartat 1.2.3, és molt senzilla i no necessita ma d'obra experta. Les especials característiques del terreny, arenós i desèrtic, van fer que s'haguessin de fer algunes adaptacions respecte als PTD convencionals, per tal d'assegurar el correcte funcionament del digestor en aquest emplaçament. Principalment aquesta adaptació va consistir en la construcció de la rasa on s'ubica el digestor, que es va haver de reforçar amb la col·locació de *parihuelas* (palets) folrades amb plàstics, per tal de mantenir l'estabilitat de les parets i evitar el contacte directe del plàstic del biodigestor amb la sorra. L'altra variació considerable va ser el material del biodigestor, que no era polietilè com sol ser habitual, sinó una geomembrana de PVC, que es va escollir per conferir molta més resistència i durabilitat al biodigestor (Figura 2.8). Més detalls sobre el disseny, dimensionament i construcció del biodigestor es troben als treballs de Cugat [16] i San Juan [17]. A l'Annex A es presenta un manual d'instal·lació que l'autor d'aquest PFC va redactar per a la construcció d'aquest tipus de biodigestors adaptats al *Parque Porcino*.





Figura 2.8 – Biodigester tubular de plàstic del *Parque Porcino*

2.2.2. Biodigester d'obra de flux pistó

En una de les granges es va instal·lar un altre tipus de biodigester, amb l'objectiu de poder comparar amb l'anterior disseny i escollir-ne un per a dur a terme la replicació de la granja model a la resta del *Parque Porcino*. Aquest biodigester era d'obra, de planta rectangular, amb un cobriment amb geomembrana de PVC, que s'unia als murs amb uns perns encastats en el formigó i una platina d'acer en perfil L (Figura 2.9). Aquest muntatge anava submergit en un canal perimetral ple d'aigua, que constituïa el segell hidràulic que assegurava l'estanquitat. El biodigester estava equipat també amb tres agitadors transversals d'acer inoxidable, amb tres àleps cadascun, amb l'objectiu d'agitar i evitar la formació d'una escuma superficial que es pot crear en certes condicions i que perjudica el procés. El biodigester també té una purga de sediments, gràcies als pendents del fons del digester cap a un canal central, que es dirigeix a una canonada regulada per una vàlvula de bola de 2". El biodigester comptava amb una cambra de mescla a l'entrada i una cambra de recollida del biol a la sortida, amb capacitat per a la producció del biol de 7 dies.

Per a més informació sobre el disseny d'aquest biodigester, es pot consultar el treball de Cugat [16].





(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.9 – Biodigestor d'obra de flux pistó. (a) Vista de l'interior. (b) Biodigestor cobert amb geomembrana de PVC inflada pel biogàs. (c) Agitador abans de ser instal·lat. (d) Canal perimetral per al segell hidràulic.

2.2.3. Accessoris de la instal·lació de biodigestió

El sistema de biodigestió, a més del propi biodigestor, inclou una sèrie d'accessoris, l'estudi dels quals centra aquest PFC. Aquests elements són necessaris per a un ús correcte i segur de la instal·lació. A la Figura 2.10 es pot veure un diagrama de la instal·lació estàndard dissenyada per aquests sistemes de producció de biogàs.



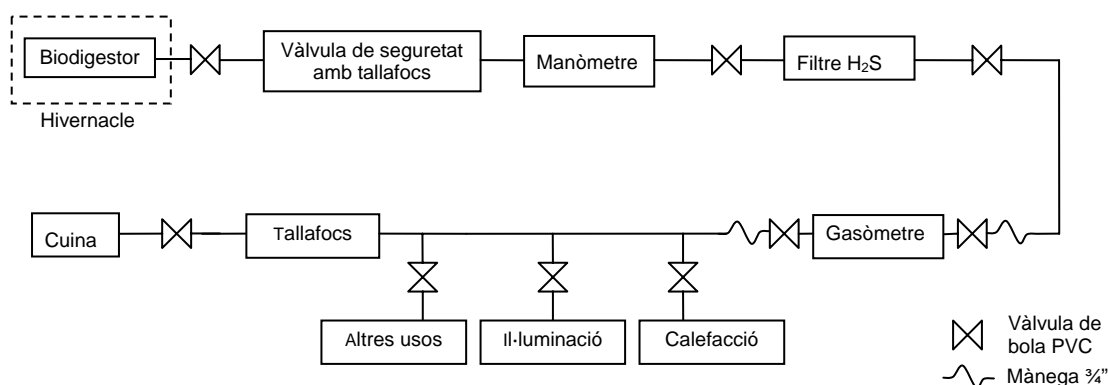


Figura 2.10 – Diagrama de la conducció i els accessoris de la instal·lació de biogàs

Hivernacle

La funció de l'hivernacle és doble: ajuda a mantenir l'escalfor, acumulada durant les hores d'irradiació solar, per augmentar el rendiment del biodigestor. A més serveix com a protecció del biodigestor davant de la caiguda accidental de qualsevol element i evita la excessiva proximitat de petits animals (gallines, gossos) o de nens, que podrien malmetre accidentalment el biodigestor (Figura 2.11).

Vàlvula de seguretat

La vàlvula de seguretat consisteix en una ampolla de plàstic parcialment plena d'aigua, on s'introdueix un tram de tub connectat a la conducció, de manera que la columna d'aigua que hi ha dintre del tram de tub es tradueix en la pressió màxima del sistema (quan la pressió sigui superior, desplaçarà aquesta columna d'aigua i el gas s'escaparà a través del tub). Així s'evita que en períodes de no utilització del biogàs (per qualsevol raó) pugui donar-se una sobrepressió que pugui malmetre el plàstic del biodigestor (Figura 2.12).

Tallafocs

A l'interior de la conducció es col·loca una espongeta d'acer o de ferro, de manera que si hi hagués un retrocés de la flama per la conducció, al arribar aquí es dissiparia, sense arribar la flama a l'interior del biodigestor. D'aquests tallafocs se'n col·loca un abans de cada cremador que s'instal·li i un altre a la sortida del biodigestor (Figura 2.13).



Manòmetre

El manòmetre consisteix en una mànega de plàstic transparent en forma de "U", plena d'aigua i connectada a la conducció en un dels seus extrems. Serveix per saber la pressió interna del sistema i és de gran ajuda alhora de detectar fuites en la conducció (Figura 2.14).



Figura 2.11 - Hivernacle



Figura 2.12 - Vàlvula de seguretat



Figura 2.13 - Tallafocs



Figura 2.14 - Manòmetre

Filtre H₂S

L'H₂S contingut en el biogàs pot ser un component perillós per a la durabilitat dels elements metàl·lics de la conducció (cremadors, etc...), degut a la corrosió i pot ser-ho també per a la salut de les persones, per culpa de la seva toxicitat. És per això que s'instal·la en línia un equip que redueixi la concentració d'H₂S. Aquest s'exposa àmpliament en el capítol 3.



Dipòsit de biogàs

El biogàs produït s'emmagatzema per tal que els seu ús pugui ser més eficient, i no es perdi en cas que no es consumeixi durant un període llarg de temps. Un estudi més detallat d'aquest equip es troba en el capítol 4.

Cuina, calefacció, il·luminació

El biogàs allibera la seva energia en el procés de combustió, on es transforma en un altre tipus d'energia més útil, habitualment calor. Així es pot usar el biogàs en cremadors per a cuinar, o en calefactores per escalfar els garrins a les nits o a l'hivern (Figura 2.15). També es pot usar en làmpades per a il·luminació, però són molt poc eficients. La possibilitat d'ús d'aquestes aplicacions vindrà sempre regida per la quantitat de biogàs produït pel biodigestor. Al capítol 6 s'exposen més consideracions sobre aquests equips.



(a)



(b)

Figura 2.15 – (a) Cremador GLP i (b) calefactor GLP adaptats per a funcionar amb biogàs

2.2.4. Aiguamolls artificials

Els aiguamolls artificials són uns sistemes de depuració d'aigües que imiten el procés d'oxigenació i acció microbiològica que té lloc en els aiguamolls naturals. Consisteixen en un llit de grava, inundat amb l'aigua a tractar. A la superfície de cadascun dels elements granulars es forma una biopel·lícula que descompon la matèria orgànica present en l'aigua, reduint-ne la DBO. Aquesta grava serveix també com a substrat per plantes aquàtiques, que contribueixen en el procés oxigenant les capes inferiors del llit d'aigua. L'efluent d'aquest procés és un aigua amb molt poca càrrega orgànica, però amb força nutrients, molt adequada per al reg de plantes.



Degut a la manca de conreus que presenten en general les granges del *Parque Porcino*, es va decidir instal·lar aiguamolls artificials com a complement del biodigestor en el tractament dels purins dels porcs (Figura 2.16). Els biodigestors produeixen diàriament una quantitat de biol massa gran com per poder ser absorbida pels escassos conreus de les granges. La comercialització del biol és una perspectiva que es valora molt positivament en aquest projecte, però que no s'encetarà a curt termini. Així el tractament del biol es feia imprescindible.

A l'entrada dels aiguamolls s'hi introdueix el biol que produeix el biodigestor, obtenint a la sortida aigua clarificada rica en nutrients, que pot ésser usada per al reg de les plantes sense perill de provocar un efecte càustic per excés de càrrega orgànica. En alguns casos, l'aiguamoll artificial també es va dissenyar per tractar els orins sobrants de la granja i les aigües grises de les mateixes.



(a)



(b)

Figura 2.16 – (a) Aiguamoll artificial. (b) Conreus regats amb l'aigua provinent de l'aiguamoll.

Per a més informació sobre els aiguamolls artificials instal·lats en el marc d'aquest projecte, es pot consultar el treball de Gilgado [18].

2.2.5. Corral i canals de recollida

Un element molt important per al correcte funcionament dels biodigestors en el marc del projecte en el *Parque Porcino* és la remodelació dels corral dels porcs. No només millora



la operació dels biodigestors, sinó que també facilita la neteja dels corrals i proporciona una major higiene i protecció per als animals. La pràctica més habitual per a la construcció dels corrals en el *Parque* és delimitar un recinte amb fustes i palets i que el terra del corral sigui la pròpia sorra del terreny (Figura 2.17). L'aigua i el menjar se'ls proporciona als animals en uns neumàtics tallats per la meitat que fan les funcions de menjadores i abeuradors. És inevitable, però, que aquests s'omplin de sorra i a vegades inclús dels propis excrements dels animals o d'orins. És per tant imprescindible per a una millor salut dels animals que tinguin uns corrals adequats. D'aquesta manera els excrements recollits no contenen sorra ni cap element estrany que no hagi d'entrar al biodigestor. A més els corrals es fan amb una lleugera pendent que du els orins fins a un canal que circula per l'exterior dels corrals (Figura 2.18), recollint els orins de tots els porcs i duent-los a un pouet on s'acumulen. Des d'aquest pou s'agafa el volum d'orins necessari per a preparar la mescla amb els excrements amb que alimentarà el biodigestor.



Figura 2.17 – Corral del *Parque Porcino* amb el terra de sorra



Figura 2.18 – Canals de recollida dels orins en corrals remodelats



2.3. Granges

El projecte de millora integral de les granges del *Parque Porcino* es va començar a implantar en tres granges pilot, ubicades en el Sector 13, relativament a prop de l'entrada del Parc i que posseeix infraestructura d'abastament d'aigua. El projecte contempla, en cadascuna de les granges, les següents accions:

- Millora dels corrals dels porcs
- Instal·lació d'un sistema de biodigestió
- Instal·lació d'un aiguamoll artificial per al tractament del biol excedent i les aigües domiciliàries
- Implantació d'un hort ecològic que utilitzi parcialment el biol generat
- Capacitació dels grangers en cria de porc (maneig, alimentació, gestió de la producció,...)
- Implantació d'un *Plan de Manejo de los Residuos Sólidos*

Les granges escollides pertanyen a Alejandro Andía, Sixto Almansa i Jorge Iparraguirre. En endavant, em referiré a cadascuna de les granges pel nom del seu propietari. A la Figura 2.19 i a la Figura 2.20 es pot veure l'emplaçament de les granges.



Figura 2.19 – Vista aèria del *Parque Porcino Ventanilla*



Figura 2.20 – Vista ampliada de les granges *Alejandro, Sixto i Jorge*.



2.3.1. Alejandro

La parcel·la de *Alejandro i Umbelina* té uns 5.000 m² de superfície, de les quals la granja només n'ocupa uns 2.100 m². La resta de la parcel·la són terrenys mig abandonats, plens de cendres d'escombraries antigament incinerades. La granja té unes 7 truges i un marrà, variant el nombre de garrins en funció de l'època de l'any i de l'èxit dels parts. En aquesta granja es va dur a terme una remodelació dels corrals, que es van construir amb formigó, en els mesos de maig a juny de 2007. Posteriorment, a partir d'octubre de 2007, es va començar la instal·lació del biodigestor i als voltants de febrer de 2008 la de l'aiguamoll artificial.

Alejandro Andía (63 anys) va ser un dels fundadors del Parque Porcino. Es tracta d'un home respectat dintre del Parque, amb moltes energies, si bé una mica desenganyat veient que, després de tants anys, el Parque Porcino continua en un estat d'escàs desenvolupament. Junt amb la seva dona, Umbelina Castillo, treballen en aquesta granja.



Alejandro i Umbelina

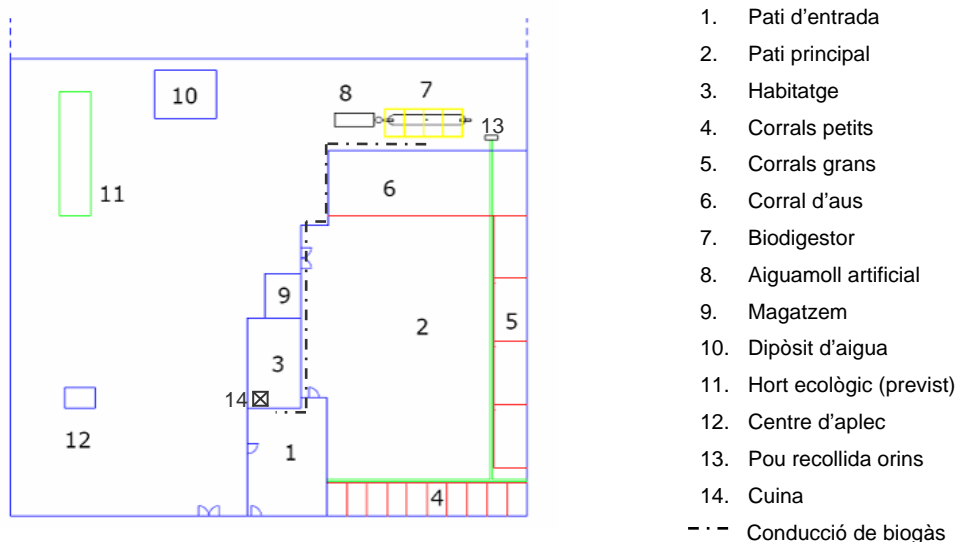


Figura 2.21 – Distribució de la granja d'*Alejandro* [17]



Com s'observa en la Figura 2.21, el biodigestor es va construir al darrere del corral de les aus, perquè construir-lo dins el pati principal hagués estat poc pràctic i els grangers no volien canviar de lloc el corral de les aus. Recorrent la part frontal de tots els corrals hi ha el canal de recollida dels orins (línia verda), que desemboca en un pou de formigó, on s'acumulen i des de on s'agafen per preparar la mescla que alimenta el biodigestor, situat al costat d'aquest pou. La conducció del biogàs es va construir resseguint el perímetre del corral de les aus, passant per davant del magatzem, al costat de la casa, fins a la porta de l'habitatge (per on entra la conducció), que dona al pati d'entrada. A la sortida del biodigestor es va construir l'aiguamoll artificial. A la meua partida, l'hort encara no estava implantat, però a data d'avui, amb l'ajuda d'una estudiant d'Enginyeria Agrònoma, s'estan duent a terme algunes accions en aquest sentit.

Biodigestor

El biodigestor de n'*Alejandro* és del tipus tubular de plàstic, situat dintre d'un hivernacle que es va fer més gran del normal per tal de poder accedir al interior. Un hivernacle petit és més convenient, perquè requereix menys materials i per tant suposa un cost menor, i perquè augmenta la seva eficiència tèrmica. La decisió de fer-lo accessible responia a la voluntat que servís com un biodigestor d'exemple i que permetés les visites d'altres *porcicultores* interessats en ell.



Figura 2.22 – Biodigestor *Alejandro*




Dimensions	
Longitud	7,5 m
Diàmetre	0,92 m
Volum Total	5020 L (100%)
Volum líquid	4020 L (80%)
Volum gas	1000 L (20%)
Càrrega diària	
Excrements	20 kg/d
Aigua/orina	60 kg/d
Proporcions mescla	3:1
Temps de residència	50 dies
Producció de biogàs estimada	1,2 m ³ /d

Taula 2.2 – Característiques del biodigestor *Alejandro*

2.3.2. Sixto

La granja de *Sixto i Cristina* és la més petita de les tres, ja que tenen només 5 truges i un marrà. La seva parcel·la té una superfície de 2.500 m², tot i que pràcticament un 30% del terreny està desocupat. En aquesta granja es van dur a terme les mateixes millores que en la granja anteriorment comentada, amb un biodigestor també tubular de plàstic.

Sixto Almansa (53 anys) i la seva dona, Cristina Ayvar, es van instal·lar al Parque Porcino fa uns 10 o 15 anys. Són originaris de Santiago de Chocoruos, al departament de Huancavelica, un dels departaments amb un índex de pobresa més elevat del Perú. Són persones ben treballadores, que fa uns anys posseïen una major quantitat de porcs, però els baixos preus de venda i sobretot els robatoris els han decidit a mantenir una producció més baixa.



Sixto i Cristina

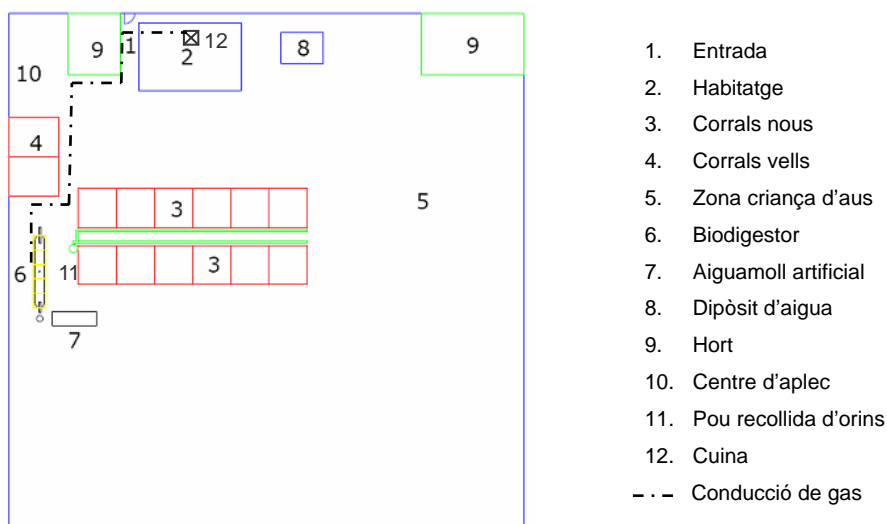


Figura 2.23 – Distribució de la granja de Sixto [17]



El biodigestor es va construir al costat del pou de recollida d'orins, a la part més baixa dels canals de recollida. En el cas de Sixto, la conducció es va fer soterrada des de la sortida del biodigestor fins a l'hort, ja que no hi havia cap tipus d'estructura prou sòlida on recolzar-hi una conducció aèria. L'aiguamoll es va col·locar en perpendicular al biodigestor degut al desnivell del terreny, que descendeix en la direcció longitudinal del biodigestor (Figura 2.23). D'aquesta manera va ser molt més senzill aconseguir una base horitzontal per a la construcció de l'aiguamoll artificial. Val a dir que en la granja de Sixto, aquesta instal·lació es va dimensionar per tractar tant el biol provinent del biodigestor com les aigües grises domèstiques.

Biodigestor

El biodigestor de Sixto també és del tipus tubular de plàstic. En aquest cas l'hivernacle és més petit, per tal d'aconseguir un rendiment tèrmic més gran, i el seu interior no és accessible. El disseny és exactament igual que el d'*Alejandro*, amb l'única diferència que aquí la dilució utilitzada és 1:4, i no 1:3 com en l'altre biodigestor.



Figura 2.24 – Biodigestor Sixto



Dimensions	
Longitud	7 m
Diàmetre	0,92 m
Volum Total	4685 L (100%)
Volum líquid	3750 L (80%)
Volum gas	935 L (20%)
Càrrega diària	
Excrements	16 kg/d
Aigua/orina	64 kg/d
Proporcions mescla	4:1
Temps de residència	59 dies
Producció de biogàs estimada	1,0 m ³ /d

Taula 2.3 – Característiques del biodigestor *Sixto*

2.3.3. Jorge

La granja d'en *Jorge* és la més gran de les tres, i té més d'una vintena de truges i 2 o 3 marrans. Degut a la gran quantitat d'excrements generats en aquesta granja, es va optar per construir el biodigestor d'obra de flux pistó amb cúpula de geomembrana en aquesta granja. La parcel·la és d'uns 5.000 m², i està ocupada pràcticament en la seva totalitat.

Jorge Iparraguirre (54 anys) és un dels porcicultores més respectats de tot el Parque. Els seus pares, Pedro y Júlia, també son dels primers porcicultores que es van instal·lar al Parque Porcino, i actualment Jorge treballa amb ells a la granja, perquè ells ja son molt grans. Abans, Jorge havia treballat com a reciclador, recollint plàstics i altres materials reutilitzables pels carrers de Lima, que després comercialitzava. Jorge forma part de la Asociación Central Única de Pequeños Empresarios de Proyectos Parque Porcino de Ventanilla (ACUPEPPPV), una de les associacions de porcicultores més importants del Parque.



Jorge



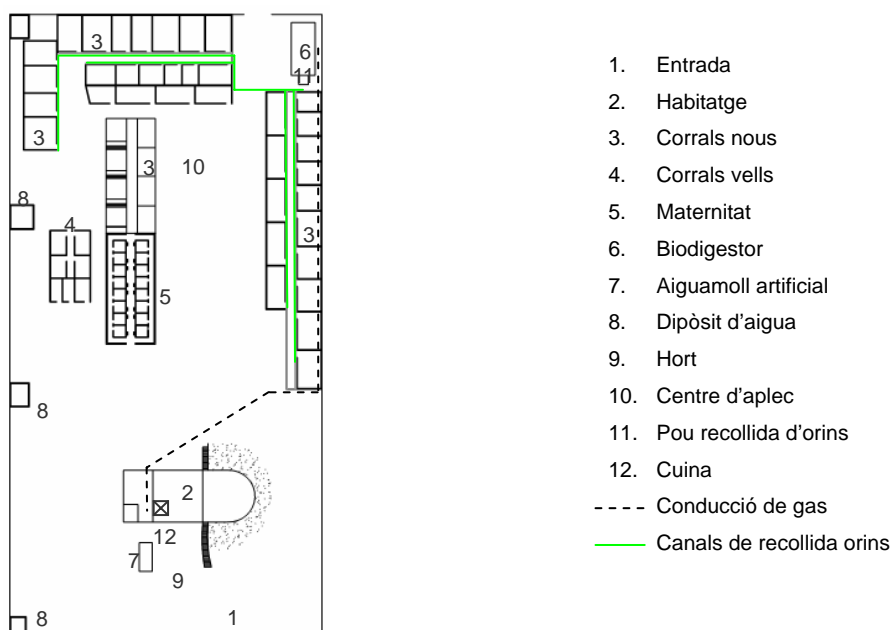


Figura 2.25 – Distribució de la granja de Jorge

Els projectes anteriors d'altres estudiants de la UPC col·laborant amb Ciudad Saludable, finançats igualment pel CCD, es van desenvolupar principalment en aquest escenari, tant el de Manel Gàmir (ETSEIB) [19], com el de Cristina Cugat (ETSEIB) [16] i el de Maria Domingo (ETSECCPB, no presentat).

La construcció d'obra civil del biodigestor la van dur a terme uns paletes, mentre que les últimes fases de la construcció, com el segellat i la col·locació de la cúpula, la varem executar els membres de l'equip, amb l'ajut sempre dels grangers. La conducció vaig començar a instal·lar-la, però no vaig tenir temps de concloure-la de manera que ho van fer els companys de l'equip. Cal destacar que en aquest cas la conducció era molt més llarga i que la construcció del filtre d' H_2S i la instal·lació del sistema d'emmagatzematge de biogàs requeria més temps del que finalment vaig disposar.

L'aiguamoll artificial, ubicat en aquesta cas darrere de la cuina i no al costat del biodigestor, només tracta les aigües grises de la casa. En aquesta granja es va descartar la possibilitat de tractar el biol a l'aiguamoll artificial per diverses raons: la primera era la manca d'espai on ubicar el aiguamoll a prop del biodigestor, de manera que dificultava extremadament el transport del biol fins a l'aiguamoll. L'altra raó era la gran quantitat de producció diària de biol i la seva elevada concentració que hagués requerit un aiguamoll



de grans dimensions.

Biodigestor

El biodigestor de *Jorge* és d'obra de flux pistó, amb cúpula de plàstic. El seu disseny va permetre una comparativa entre aquest tipus de biodigestor respecte els altres dos de tipus tubular de plàstic. Es va escollir aquesta granja per a construir el digestor d'obra perquè era la que presentava una producció diària d'excrements més elevada.

Dimensions	
Longitud	6 m
Amplada	1,4 m
Altura d'aigua	1,7 m
Volum Total	15,6 m ³ (100%)
Volum líquid	12,5 m ³ (80%)
Volum gas	3,1 m ³ (20%)
Càrrega diària	
Excrements	93 kg/d
Aigua/orina	139,5 kg/d
Proporcions mescla	1'5:1
Temps de residència	45 dies
Producció de biogàs estimada	3,75 m ³ /d

Taula 2.4 – Característiques del biodigestor *Jorge*





3. Acondicionament del biogàs

El biogàs és una barreja de gasos, de la qual pràcticament només interessa el metà, que és el combustible. La resta de gasos presents són el diòxid de carboni, el hidrogen, l'àcid sulfhídric, així com nitrogen o oxigen en baixes concentracions (Taula 3.1).

Component	%
CH ₄	50-70
CO ₂	30-50
H ₂ S	0-3
H ₂	0-1
N ₂ , O ₂	traces

Taula 3.1: Composició del biogàs [1]

CO₂

La proporció de CO₂ existent al biogàs (habitualment entre el 30 i 40%) redueix el seu poder calorífic específic¹ (és a dir, l'energia que proporciona un volum específic de gas). L'eliminació del diòxid de carboni no és aconsellable en general per ser cara i complicada, excepte en el cas de voler emmagatzemar grans quantitats de biogàs i/o voler envasar-lo per al seu posterior transport ja que així s'augmenta el poder calorífic específic. És interessant fer notar que aquesta eliminació del diòxid de carboni és més beneficiosa com major sigui la seva concentració en el biogàs cru.

Un mètode senzill per a la eliminació del CO₂ és bombollejar el biogàs per una dissolució alcalina (per exemple de Ca(OH)₂). El CO₂ és eliminat al precipitar en forma de bicarbonat de calci. De totes maneres, degut a l'elevada concentració de CO₂ del biogàs, aquesta solució consumeix una gran quantitat d'hidròxid de calci, que cal regenerar ([20], pg. 78).

¹ El poder calorífic del biogàs depèn del percentatge de metà. Per tant, un major percentatge de CO₂, implica una disminució del poder calorífic. Com a valor de referència es pot prendre un PCI de 21.385 kJ/m³_{biogàs} (60% CH₄)



No s'aprofundirà més en les tècniques existents per dur a terme el procés d'eliminació del CO_2 , car no es l'objectiu d'aquest PFC. Aquest procés no es va implantar en el projecte de Ventanilla, degut a que no es va trobar necessari per diverses raons:

- ús immediat del biogàs sense grans volums d'emmagatzematge
- elevat consum de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ amb el cost econòmic que implica
- innocuïtat del CO_2

Un gas particularment important en el biogàs és l'àcid sulfhídric, degut a les seves propietats corrosives i nocives per a la salut.

3.1. Formació del H_2S

L' H_2S present en el biogàs prové principalment de la degradació de les proteïnes, que contenen sofre. En cas que el substrat siguin fems, les proteïnes provenen principalment dels bacteris excretats dels intestins. Així mateix, el sofre inorgànic, sobretot els sulfats, és possible que siguin convertits en H_2S per fermentació [21].

Les vies biològiques d'oxidació del H_2S a sulfats son diverses, i poden tenir lloc tant en condicions aeròbiques com anòxiques, sent els bacteris responsables de la oxidació diferents segons el medi. Un resum d'aquestes vies es pot trobar a la Figura 3.1.

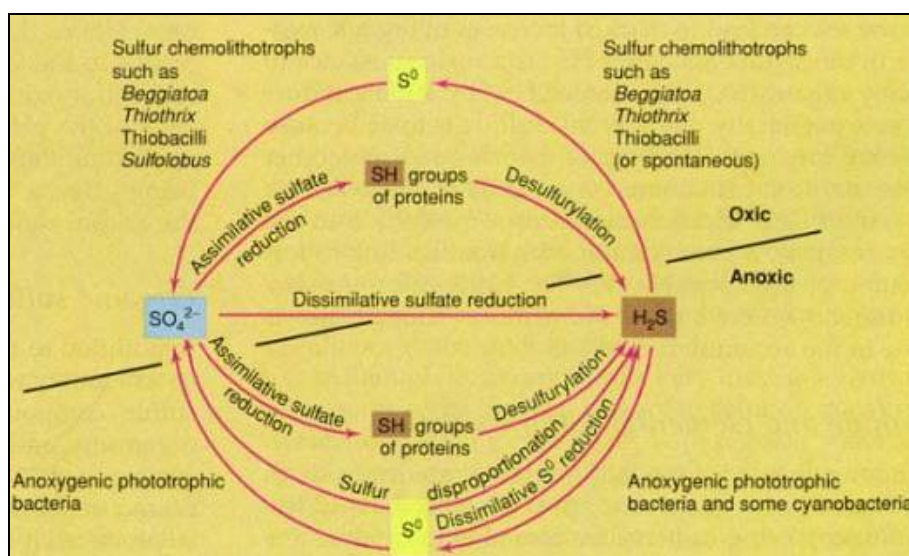


Figura 3.1 – Cicle redox biològic pel sofre [26]



3.2. Característiques del H₂S

3.2.1. Propietats físico-químiques

L'H₂S és un gas incolor en condicions normals (0°C i 1 atm). És molt inflamable i més dens que l'aire, de manera que es pot acumular en els estrats inferiors en recintes tancats, amb la possibilitat de crear atmosferes explosives si no hi ha una bona ventilació. Les seves propietats físico-químiques més importants es troben a la Taula 3.2.

Pes molecular (g/mol)	34,08
Punt fusió (°C)	-86
Punt ebullició (°C)	-60,2
Temperatura crítica (°C)	100
Pressió de vapor, a 20°C (bar)	18,8
Densitat relativa, gas (aire=1)	1,2
Densitat relativa, líquid (aigua=1)	0,92
Solubilitat en aigua (mg/l)	3.980
Límits inflamabilitat (%vol en aire)	4,3 - 45,5
Temperatura auto-ignició (°C)	270

Taula 3.2 – Propietats físico-químiques del H₂S [22]

3.2.2. Toxicitat

L'H₂S és un gas molt tòxic, irritant i asfixiant, que pot arribar a ser mortal per inhalació. La respiració d'aquest gas a una concentració superior a 1000 ppm (0,1%) pot causar un coma. L'olfacte humà el detecta a partir de 0,1 ppm però davant una exposició continuada o una concentració superior a 150 ppm té lloc una ràpida pèrdua de la sensibilitat olfactiva, cosa que pot fer subestimar la seva perillositat. A la Taula 3.3 es presenten alguns valors de toxicitat del H₂S. Els símptomes més habituals d'exposició al H₂S són mareigs, visió borrosa, mal de cap, irritació ocular, envermelliment de la pell i dificultats respiratòries. Una exposició prolongada a baixes concentracions d'aquest gas pot provocar estats depressius, insomni i afeccions irreversibles de divers grau al sistema nerviós [22] [23].



IDLH ²	300 ppm
TLV-TWA ³	10 ppm
TLV-STEL ⁴	15 ppm

Taula 3.3 – Valors de referència de toxicitat del H₂S [23]

3.2.3. Reactivitat del H₂S

L'H₂S és extremadament reactiu amb els metalls i la seva reactivitat augmenta al incrementar la seva concentració, la pressió, la presència d'aigua i la temperatura [8]. En presència d'aigua reacciona per donar àcid sulfúric amb la qual cosa els problemes de corrosió poden ser molt importants. En la combustió, l'H₂S esdevé diòxid de sofre (SO₂), que és un dels agents causants de la pluja àcida i del smog.

3.3. *Tecnologies disponibles per a l'eliminació de H₂S*

Les tecnologies per a l'eliminació d'H₂S són molt abundants i molt diverses, ja que han estat àmpliament utilitzades des de fa anys per la indústria química en el processament del gas natural, car aquest conté molts cops concentracions d'H₂S fins i tot més elevades que no pas el biogàs.

Les operacions bàsiques emprades per aquestes tecnologies són les següents [24]:

- Absorció amb fase líquida
- Adsorció amb fase sòlida
- Conversió química

A continuació s'exposaran les tecnologies que es van considerar més apropiades per al context del *Parque Porcino*. A l'Annex B es presenten més tecnologies alternatives.

² Perill immediat per la salut o la vida - Immediately Dangerous to Life or Health

³ Valor límit llindar – Mitjana ponderada amb el temps (Threshold Limit Value – Time Weighted Average)

⁴ Valor límit llindar – Límit d'exposició de curta durada (Threshold Limit Value – Short Term Exposure Limit)



3.3.1. Processos amb medi sòlid

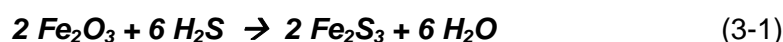
3.3.1.1. Òxids metàl·lics

La majoria dels processos d'adsorció en sec, es basen en la reacció de l'H₂S amb òxids metàl·lics per a donar sofre elemental o bé òxids de sofre. El òxids més utilitzats són els de ferro i els de zinc. Degut a que el mecanisme principal d'aquests processos és la oxidació, només els compostos oxidables en les condicions d'operació habituals són eliminats del gas. D'aquesta manera, les pèrdues de metà són mínimes, i es deuen a esporàdics processos d'adsorció ([25], capítol 7).

3.3.1.1.1. Òxid de ferro (III) (acid gas treating)

Es tracta del mètode més antic per a l'eliminació d'H₂S, ja que la seva primera implantació data del segle XIX, però encara és el procés batch més utilitzat per a aquesta finalitat. Avui en dia però, les instal·lacions a gran escala l'estan substituint per altres processos ja que comporta uns grans costos laborals a l'hora de substituir el medi de les columnes de rebliment, entre d'altres desavantatges ([25], capítol 7).

El mecanisme d'eliminació és l'adsorció física del gas en el rebliment seguit d'una reacció d'oxidació:



Les condicions òptimes per a aquesta reacció són una humitat moderada i un medi lleugerament bàsic (pH 8-10).

Com s'observa de a partir de l'estequiometria de la reacció (3-2) un quilo de Fe₂O₃ és capaç d'eliminar 0,64 kg H₂S.

$$1\text{kgFe}_2\text{O}_3 \cdot \frac{1\text{kmolFe}_2\text{O}_3}{159,69\text{kgFe}_2\text{O}_3} \cdot \frac{6\text{kmolH}_2\text{S}}{2\text{kmolFe}_2\text{O}_3} \cdot \frac{34,08\text{kgH}_2\text{S}}{1\text{kmolH}_2\text{S}} = 0,644\text{kgH}_2\text{S} \quad (3-2)$$

De totes maneres, mai s'assoleix aquest valor teòric. L'experiència indica que com a màxim s'assoleix un 85% d'eficiència (0,56 kg H₂S/kg Fe₂O₃) en els processos batch



([26], pg 16).

Al ser un procés tipus *batch*, es habitual la instal·lació de més d'una columna en paral·lel, normalment dues, però se'n poden arribar a posar fins a 4. Un diagrama de procés típic amb dues columnes de rebliment es pot veure a la Figura 3.2.

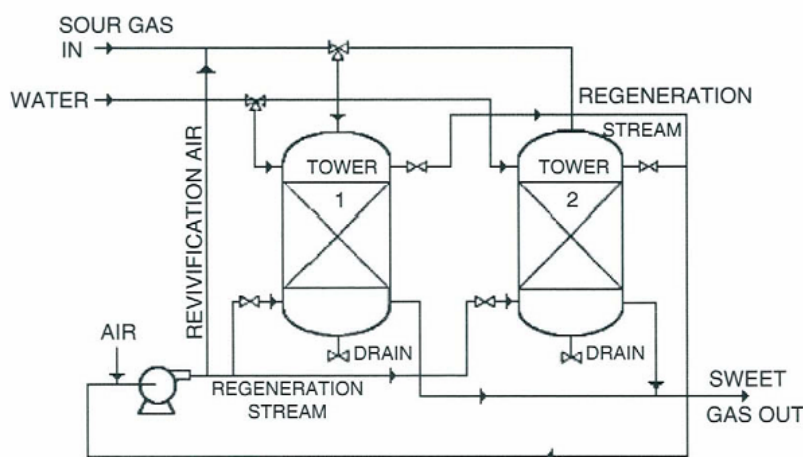
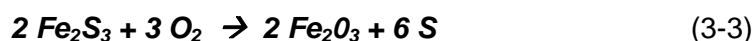


Figura 3.2 – Diagrama de flux típic d'un procés amb òxid de ferro amb dues columnes [25]

El sulfur fèrric format pot ser regenerat a òxid de ferro (III) en contacte amb l'oxigen:



Aquesta és una reacció molt exotèrmica, per tant cal introduir-hi l'aire poc a poc, per tal que el calor generat pugui ser dissipat. L'esponja de ferro es pot arribar a regenerar uns 10 cops. No tot el sulfur és convertit en sofre en cada regeneració i això acaba afectant la reactivitat del rebliment.

Aquesta regeneració sol ser també un procés tipus *batch*, tot i que també pot dur-se a terme en continu injectant una petita quantitat d'oxigen (menys d'1%) al gas d'entrada, de manera que l'òxid de ferro es regenera simultàniament a l'eliminació de H₂S. D'aquesta manera es pot arribar a assolir una capacitat d'eliminació del sulfur de 2,5 kg H₂S/kg Fe₂O₃ [26].



Críteris de disseny

El fet que aquesta tecnologia faci molts anys que es troba àmpliament implantada i el gran coneixement que s'ha obtingut del procés fan que actualment existeixi una heurística que ajuda a dimensionar els equips.

Torres	Es recomanen torres d'acer inoxidable. Dos torres en sèrie augmenten el temps de contacte.
Flux de gas	Flux descendent per tal de mantenir la humitat del rebliment.
Temps de residència	Ha de ser superior a 60s, calculat amb el flux total de gas i el volum buit de la torre.
Temperatura	Hauria de ser entre 18°C i 46°C, per tal d'accelerar la cinètica sense assecar en excés el rebliment.
Alçada del rebliment	Es recomanen alçades entre 1,2m a 3m.
Velocitat lineal del gas	La velocitat ha d'estar en el rang 0,6 – 3 m/min.
Càrrega màssica	La càrrega contaminant superficial hauria de mantenir-se per sota de 10 g S·min ⁻¹ ·m ⁻² rebliment
Humitat	Al voltant del 40% (-/+ 15%).
pH	Lleugerament bàsic, entre 8-10.
Pressió	No sempre es fa, però es recomana que superi els 1,4 bar.

Taula 3.4 – Paràmetres de disseny per eliminació amb òxid de ferro [26]

Els avantatges que té aquesta tecnologia són la seva simplicitat i la seva efectivitat, així com l'amplia experiència que se'n té. Per contra hi ha alguns factors negatius que fan que aquesta tecnologia es vegi cada cop més oblidada alhora de seleccionar un procés per a eliminar l'H₂S. Alguns d'ells són el fet que pugui arribar a tenir uns costos d'operació força elevats, que la substitució del rebliment sigui una operació molt intensiva i no exempta de perill, en cas que no es dissipï apropiadament la calor generada en la regeneració, i que últimament s'està tenint en compte el problema de la disposició final del rebliment com a residu.



3.3.2. Processos amb medi líquid

3.3.2.1. Dissolucions de sals alcalines

L'H₂S i el CO₂ al ser gasos àcids, reaccionen ràpidament amb dissolucions bàsiques com dissolucions de carbonat potàssic o sòdic, fosfats, així com dissolucions de bases febles orgàniques. També les dissolucions d'hidròxids absorbeixen l'H₂S i el CO₂ tot i que en general la solubilitat del H₂S és superior a la del CO₂. Una de les dificultats per a l'ús d'aquests processos, és que en molts casos les dissolucions no són regenerables (com en el cas de l'ús de sals per preparar-les), amb l'increment de costos en reactius que això comporta [26].

3.3.3. Processos in-situ

Existeixen algunes tècniques específiques per a la eliminació de H₂S en els processos de digestió anaeròbia, que consisteixen en actuar directament en el biodigestor, en comptes de dur a terme la operació de separació aigües avall.

3.3.3.1. Injecció d'aire/O₂

La dosificació controlada d'aire o oxigen dins el biodigestor és una de les tècniques més senzilles i efectives per reduir la concentració d'H₂S. L'aire s'introdueix directament en el digestor o en el tanc d'emmagatzematge previ, en concentracions entre 2-6% d'aire en biogàs. Així té lloc un procés de degradació biològica aeròbia del H₂S en sulfats o en sofre elemental, que es pot acabar adherint a les parets del biodigestor (Figura 3.3). S'han reportat rendiments de 80-99% d'eliminació assolint concentracions tan baixes com 20-100 ppm H₂S (Taula 3.5). S'ha de vigilar contínuament la concentració d'oxigen dins el digestor, per tal d'evitar la formació d'atmosferes explosives (els límits d'inflamabilitat del biogàs són de 9-17% volum en aire, suposant un 60% CH₄ en el biogàs) [8].



initial H ₂ S content		stoichiometric amount of oxygen as vol. % of biogas production	stoichiometric amount of air as vol % of biogas production
in ppm	in vol. %		
500	0.05	0.025	0.125
1000	0.10	0.050	0.250
1500	0.15	0.075	0.375
2000	0.20	0.100	0.500
2500	0.25	0.125	0.625
3000	0.30	0.150	0.750

Taula 3.5 – Percentatges estequiomètrics d'oxigen i d'aire per a 85% eliminació d'H₂S [27]



Figura 3.3 – Sofre incrustat a les parets internes del biodigestor [8]

3.3.4. Processo biològics

3.3.4.1. Biofiltres

La biofiltració és actualment la tecnologia més emprada per al tractament biològic de gasos. Es tracta de microorganismes immobilitzats en forma de biopel·lícula sobre un rebliment porós. Els compostos contaminants del corrent gasós són transferits de la fase vapor a la biopel·lícula. D'aquesta manera el mecanisme principal d'eliminació de H₂S és la degradació biològica que té lloc a la biopel·lícula. Hi ha una gran varietat de bacteris que duen a terme aquesta degradació, en diferents condicions – aeròbiques o anaeròbiques – i amb diversos productes finals – sulfats o sofre elemental [28]. A part del mecanisme biològic d'eliminació, el fenomen d'adsorció també sol ser important, mentre que la absorció es pràcticament negligible [29]. El grau d'adsorció depèn decisivament del rebliment que s'utilitzi. La literatura recull una important quantitat d'estudis de biofiltració amb diferents rebliments: compost [26], torba [30], excrements de porc [31], pellofes de



cacauets i d'arròs, closca de coco, rostolls de blat de moro, bagàs [32], etc. Així mateix es poden emprar rebliments inorgànics com ceràmiques, rebliments plàstics o roques volcàniques. Per a l'òptim funcionament del filtre cal que el rebliment compleixi els següents requisits [31]:

- Alta porositat i superfície específica
- Alta capacitat de retenció de la humitat
- Alt contingut de nutrients disponible
- Població microbiana diversa i adaptativa
- Resistència mecànica
- Estabilitat química
- Baix cost

Un dels majors problemes que existeixen amb els rebliments orgànics és la resistència mecànica. En la degradació del H_2S es formen protons que acidifiquen el medi amb la conseqüent degradació de la matèria orgànica que això comporta. Així s'originen fenòmens de compactació, creació de canals preferencials i una major pèrdua de càrrega en el filtre. És per això que molts cops es mescla la matèria orgànica amb material inert, per tal de conferir-li millors propietats mecàniques [31].

3.4. Estudi d'alternatives

Tenint en compte les tecnologies presentades i les particulars característiques de les granges del *Parque Porcino* on es van instal·lar els digestors, es va dur a terme un estudi d'alternatives, de manera qualitativa, per tal d'avaluar quina seria la tecnologia més apropiada.

Es va fer una avaluació comparativa de les 4 tecnologies presentades en l'apartat anterior.

3.4.1. Filtres avaluats

3.4.1.1. Òxid de ferro

El filtre basat en l'òxid de ferro pot consistir en un tram de canonada més ample instal·lat



a la sortida del biodigestor (veure Figura 3.4). Com que la canonada utilitzada per conduir el biogàs fins a la cuina és de ½" es pot col·locar un tram de tub de 4" o 6", l'interior del qual es pot omplir amb encenalls de ferro oxidats. Per tal d'evitar l'entrada d'aire a la conducció durant el canvi del contingut del filtre s'instal·len unes vàlvules de bola a l'entrada i a la sortida del filtre. També es posen unes rosques universals que serveixen per poder desmuntar el filtre. Una de les reduccions s'adhereix al tram de tub, usant un adhesiu amb base de poliuretà, mentre que l'altra es deixa sense enganxar al tub, però es segella amb una pasta no adhesiva. És per aquí per on es buidarà el filtre alhora del canvi.

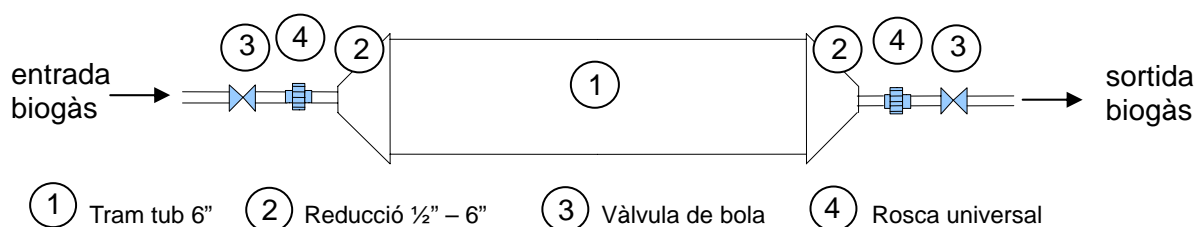


Figura 3.4 – Esquema del filtre d'òxid de ferro

3.4.1.2. Dissolució hidròxid de calci (calç apagada)

El disseny del filtre amb hidròxid de calci podria ser semblant a una ampolla de rentat de gasos de laboratori preparada amb un cilindre de 200L de capacitat, que es poden trobar al *Parque Porcino*. El disseny pot ser semblant al de la Figura 3.5. Amb uns passamurs es poden fer travessar dos tubs pels laterals del cilindre. El tub d'entrada pot entrar per la part baixa del cilindre i tenir una sèrie de forats practicats a la part superior per on sortirà el biogàs. D'aquesta manera s'aconsegueix una dispersió elevada del gas. El tub de sortida ha de estar col·locat a la part alta del cilindre, en un lateral. Així la tapa està lliure de connexions, de manera que quan s'hagi de fer el canvi de la dissolució aquesta es pugui treure sense necessitat de treure els tubs. Per buidar el cilindre es pot instal·lar un desguàs amb tub de ½" a la part inferior del tub amb una vàlvula. La part més delicada del disseny és l'alçada de líquid, ja que no pot ser superior a la que hi hagi en la vàlvula de seguretat de la instal·lació. Si fos superior, el gas mai entraria al filtre ja que abans s'escaparia per la vàlvula de seguretat.



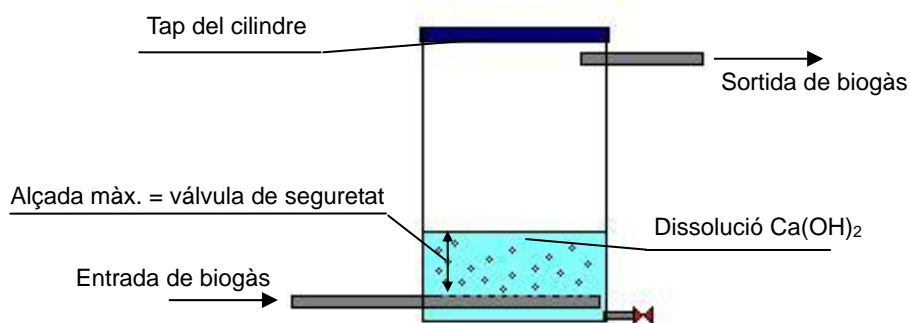


Figura 3.5 – Esquema de disseny de vas de rentat de gasos amb un cilindre

3.4.1.3. Injecció d'aire

Hi ha dos dissenys senzills per a aquest mètode. El primer consisteix en tenir una bomba elèctrica que introdueixi l'aire dins el digester. Això comporta la necessitat de disposar d'electricitat i de comprar la bomba, que és força cara. El segon consisteix en introduir l'aire amb un artefacte més casolà, com un inflador manual (com els que s'usen per inflar els matalassos a la platja). De totes dues maneres es podria introduir l'aire amb una mànega pel tub d'entrada o de sortida del biodigester sense necessitat de fer un nou orifici a la geomembrana i a més provocant una petita agitació en el punt on entrés l'aire. La part més delicada d'aquest disseny és la possible inhibició del procés fermentatiu si es malmetessin les condicions anaeròbiques, així com la possible formació d'atmosferes explosives. S'ha de tenir en compte un mètode per calcular la quantitat d'aire introduït en el biodigester (per exemple, cabal d'impulsió i temps de funcionament en el cas de la bomba elèctrica o volum unitari per cada recorregut i nombre de impulsions en el cas de la bomba manual).

3.4.1.4. Biofiltre

El disseny d'aquest filtre seria exactament com el de l'òxid de ferro (Figura 3.4). En aquest cas el contingut del filtre serien excrements dels propis porcs de la granja. Hi hauria la possibilitat de barrejar-ho amb trossets de fusta, amb l'objectiu de evitar la deformació estructural del rebliment degut a la degradació de la matèria orgànica. El major avantatge que té aquest mètode és la disponibilitat contínua i sense cost del rebliment, ja que es produeix a la mateixa granja. Per contra, existeixen dubtes sobre la seva efectivitat en relació sobre tot a la seva consistència mecànica.



3.4.2. Estudi comparatiu

Els aspectes que es van estudiar en cadascuna de les tecnologies van ser els següents:

a) Costos

a.1. *Instal·lació*: Costos associats a la compra d'equipaments o del material per a la construcció del filtre.

a.2. *Operació*: Costos associats a l'ús del filtre: reactius, recanvis, reparacions,...

b) Seguretat

Es valoren els riscos que comporta el filtre en quant a ús de reactius, perillositat de les reaccions, possibilitat de deflagracions,...

c) Eficàcia

S'avalua l'efectivitat del filtre en la eliminació de H₂S.

d) Disponibilitat

Cal tenir en compte que els equips, materials, productes i recanvis que siguin necessaris per al correcte funcionament del sistema d'eliminació d'H₂S siguin a l'abast dels *porcicultores*, no ja en termes econòmics que s'avalua en el punt a), sinó més aviat en termes de facilitat per trobar aquests productes en els mercats locals o fins i tot a la pròpia granja.

e) Complexitat

e.1. *Instal·lació*: S'avalua la dificultat tècnica en la construcció i instal·lació de la tecnologia en qüestió. Cal tenir en compte que els *porcicultores* tenen una gran destresa manual, fortalesa física en molts casos i un gran enginy, però els manquen molts coneixements tècnics.

e.2. *Operació*: Es considera la dificultat tècnica en l'operació i ús de la tecnologia discutida.

f) Manteniment / operació

Aquí es valora el grau de participació i operació que la tecnologia requereix per part del *porcicultor* en l'ús quotidià, així com la consideració del nivell de manteniment que sigui necessari en cada cas.

g) Impacte ambiental

Cal tenir en compte també l'impacte que té cada tecnologia en el medi ambient, a nivell d'operació i sobre tot de residus.



ÒXID DE FERRO	
a) Costos	<p><i>Instal·lació:</i> L'equipament necessari per a aquesta tècnica podria ser un tub incorporat a la mateixa conducció, d'un diàmetre més gran (4-6"), ple d'encenalls de ferro. Depenent de la longitud del tram de tub i sumant-li els accessoris necessaris, el cost pot assolir uns S./95 (\$31,7)⁵</p> <p><i>Operació:</i> Els costos d'operació són molt petits, ja que els encenalls de ferro es poden aconseguir de manera gratuïta en els tallers de la zona. L'única despesa és comprar la "pasta formadora de empaquetadura" que s'utilitzaria per segellar el tub, i que costa uns S./5 (\$1,7) (1 tub dona per a 3 canvis).</p>
b) Seguretat	La perillositat d'aquesta tècnica es troba en la regeneració amb aire del sulfur de ferro que és una reacció molt exotèrmica. De totes maneres, la reduïda quantitat d'òxid de ferro utilitzada fa que el risc no sigui massa elevat. Cap dels productes implica una elevada toxicitat.
c) Eficàcia	És la tecnologia més coneguda i àmpliament utilitzada de les tres. Dóna bons rendiments tot i que s'ha de canviar regularment el rebliment.
d) Disponibilitat	Tots els materials i productes per a la construcció i ús són fàcils d'aconseguir. Als nombrosos tallers que hi ha a la ciutat és relativament fàcil trobar-hi encenalls de ferro, que es possible endur-se sense pagar res. Aquests encenalls es poden utilitzar després de deixar-los oxidar.
e) Complexitat	<p><i>Instal·lació:</i> La construcció del filtre no és molt complicada. Bàsicament connexions d'accessoris de PVC que els <i>porcicultores</i> estan habituats a fer. Els disseny de les connexions tampoc és complicat.</p> <p><i>Operació:</i> L'operació és ben senzilla, ja que es redueix a la substitució del filtre un cop esgotat l'òxid de ferro.</p>
f) Manteniment / operació	El manteniment del filtre és molt senzill: canvi del rebliment quan s'esgoti l'òxid i revisió de l'estanquitat en cas d'observar disminucions anòmales en la pressió habitual del biogàs.
g) Impacte ambiental	El rebliment es pot regenerar i utilitzar diversos cops abans de descartar-lo. En la regeneració pot formar-se sofre, però les quantitats seran prou petites com per a no ser un problema ambiental. La deposició final del ferro es pot realitzar en algun taller on reciclin ferralla.

⁵ Cotització Nuevo Sol Peruano (S./) – US Dollar (\$) S./3.00 = \$1 (1-nov-2008)



DISSOLUCIÓ HIDRÒXID DE CALCI	
a) Costos	<p><i>Instal·lació:</i> L'equipament necessari seria una mica més car que en el cas de l'òxid de ferro. El disseny podria assimilar-se a un vas de rentat de gasos, construït amb un cilindre (200L) o quelcom semblant disponible al <i>Parque Porcino</i>. El preu d'un cilindre en prou bones condicions com per assegurar estanquitat, encara que sigui usat, seria d'uns S./200 (\$66,7).</p> <p><i>Operació:</i> Els costos d'operació tot i no ser molt elevats, implicarien la compra regular de calç apagada (Ca(OH)₂)</p>
b) Seguretat	L'hidròxid de calci és força irritant en contacte amb ulls, pell o bé per inhalació del producte en pols. No hi hauria cap risc d'inflamabilitat, ni de reactivitat descontrolada.
c) Eficàcia	La seva eficàcia es veuria reduïda per problemes de caràcter tècnic: dificultat per agitar la dissolució, dificultat d'assegurar que tota la dissolució contacta amb el gas, poca pressió del biogàs, poc temps de contacte. D'altra banda el poc cabal de biogàs, facilitaria l'absorció.
d) Disponibilitat	Els materials per a la construcció del filtre, en el cas de fer-ho amb un cilindre, es podrien trobar al mateix <i>Parque Porcino</i> , i a Ventanilla. La calç tampoc seria difícil d'aconseguir.
e) Complexitat	<p><i>Instal·lació:</i> La construcció del filtre seria complexa. Usant la idea d'un vas de rentat de gasos, el problema seria la correcta distribució del gas dintre del líquid, la homogeneïtat de la concentració d'aquest en operació, i la baixa pressió del biogàs, que no permetria tenir una gran alçada entre el punt d'entrada del gas i el nivell de líquid.</p> <p><i>Operació:</i> La operació seria senzilla. Per al moment de la càrrega de calç al dipòsit hi hauria un joc de vàlvules per tancar i obrir tant els conductes de gas com per al buidat de líquid del dipòsit, que els <i>porcicultores</i> podrien executar sense excessiva dificultat.</p>
f) Manteniment / operació	L'operació del filtre es limitaria al buidat del dipòsit amb la dissolució saturada de sulfur de calci i restituir una nova dissolució d'hidròxid de calci.
g) Impacte ambiental	La deposició de la dissolució absorbent saturada de sulfur de calci tot i no ser un producte que presenti una toxicitat ecològica especial, seria un problema, pel fet de ser un líquid que hauria de ser abocat allà mateix.



INJECCIÓ D'AIRE	
a) Costos	<p><i>Instal·lació:</i> L'equipament necessari seria el més car de tots, ja que requeriria una bomba que injectés l'aire a l'interior del biodigestor. L'altra opció seria injectar l'aire amb una bomba manual (com les que s'utilitzen per inflar els matalassos a la platja).</p> <p><i>Operació:</i> En cas d'utilitzar una bomba elèctrica, s'hauria d'assumir el consum elèctric. L'altra bomba no tindria cap tipus de cost d'operació.</p>
b) Seguretat	<p>El major perill seria la possible formació d'una atmosfera explosiva a l'interior del biodigestor. El fet de no tenir cap tipus de sensor indicador de la concentració d'O₂ a l'interior, fa que el risc sigui força elevat. Val a dir que s'hauria d'introduir moltíssim d'aire per a generar aquesta atmosfera, però també cabria la possibilitat que l'O₂ arribi per les conduccions fins als cremadors, possibilitant un retorn de la flama.</p>
c) Eficàcia	<p>L'eficàcia d'aquest mètode sembla molt elevada segons les referències ([8] [27]) i tot i no assolir uns nivells molt baixos de H₂S la reducció seria més que acceptable per aquests biodigestors. De totes maneres caldria poder controlar el nivell d'O₂ a l'interior del biodigestor, per tal de no inhibir els processos anaerobis.</p>
d) Disponibilitat	<p>La bomba elèctrica seria sens dubte difícil d'aconseguir. L'altra en canvi no suposaria cap problema.</p>
e) Complexitat	<p><i>Instal·lació:</i> La complexitat en la instal·lació d'aquest sistema es centraria en la connexió elèctrica de la bomba. En l'altre cas en canvi, no suposaria cap tipus de feina.</p> <p><i>Operació:</i> La operació seria senzilla, ja que seria encendre i apagar en un cas, i bombar una mica en l'altre. Això sí, en tots dos casos cal ser molt escrupolós amb la quantitat d'aire introduït, per tal d'evitar injectar-ne massa i afavorir possibles deflagracions.</p>
f) Manteniment / operació	<p>Aquest sistema requeriria la participació diària del <i>porcicultor</i>.</p>
g) Impacte ambiental	<p>Aquesta tècnica no té cap tipus d'impacte ambiental negatiu, ja que fa servir aire i el sulfur generat roman a l'interior del biodigestor. Caldria vigilar la possible inhibició per sulfats del procés de biodigestió.</p>



BIOFILTRE	
a) Costos	<p><i>Instal·lació:</i> L'equipament necessari seria totalment semblant al del cas de l'òxid de ferro. (\$66,7).</p> <p><i>Operació:</i> Els costos d'operació serien molt baixos, ja que només caldria comprar la pasta per fer hermètic el tancament del filtre. El rebliment el tindrien a l'abast contínuament.</p>
b) Seguretat	No hi ha cap tipus de riscos derivats de l'ús d'aquest tipus de filtre.
c) Eficàcia	L'eficàcia d'aquest mètode és menor que en el cas de l'òxid de ferro, a més de plantejar més dubtes sobre la seva efectivitat real per les poques experiències de que es disposa. A més per millorar l'eficiència cal introduir els fems barrejats amb serradures i en forma de pellets, cosa que queda fora de l'abast del projecte al <i>Parque Porcino</i> .
d) Disponibilitat	Els materials per a la construcció del filtre són fàcils de trobar i el medi actiu del filtre és generat contínuament i en quantitats més que suficients a la granja.
e) Complexitat	<p><i>Instal·lació:</i> La construcció del filtre no és mot complicada: Connexions d'accessoris de PVC que els <i>porcicultores</i> estan habituats a fer. Els disseny de les connexions tampoc es complicat.</p> <p><i>Operació:</i> La operació és ben senzilla, ja que es redueix a la substitució del contingut del filtre un cop esgotada la capacitat dels excrements.</p>
f) Manteniment / operació	El manteniment del filtre és molt senzill: canvi del contingut periòdicament i revisió de l'estanquitat en cas d'observar disminucions anòmales en la pressió habitual del biogàs.
g) Impacte ambiental	Els fems saturats de sofre, poden ser aplicats sense problemes com a adob als petits conreus que tenen els <i>porcicultores</i> . Els nivells de sofre no són prou elevats com per a comportar perjudicis al medi ambient o a les plantes.



	Costos Instal·lació	Costos Operació	Seguretat	Eficàcia	Disponibilitat	Complexitat Instal·lació	Complexitat Operació	Manteniment/operació	Impacte ambiental		
Òxid de ferro	+	++	+	+	++	+	++	+	-		
Carbonat calci	-	+	+	+	-	-	++	-	--		
Injecció aire	--	++	--	++	++	--	-	--	++		
Biofiltre	+	++	++	--	++	+	++	+	++		

Taula 3.6 - Taula resum comparativa de les tecnologies considerades

3.4.3. Conclusions de l'estudi d'alternatives

De l'anàlisi anterior s'extreuen les següents conclusions:

- El filtre amb hidròxid de calci és poc pràctic per la complexitat en la construcció del filtre, així com per la dificultat de dimensionar-lo adequadament. La baixa pressió a la que treballa el sistema de producció de biogàs fa que la columna d'aigua del tub d'entrada al filtre no pugui ser molt gran i això redueix el volum efectiu de dissolució. A més, la disposició final d'aquesta dissolució seria un altre inconvenient important.
- La injecció d'aire amb una bomba elèctrica queda totalment descartada, degut a la absència de connexió elèctrica en moltes granges. L'altre modalitat manual comporta alguns riscos que no es van voler assumir, a nivell de seguretat (creació d'atmosferes explosives) i sobretot d'inhibició del procés de fermentació
- El filtre biològic es pot considerar com a factible, ja que tots els camps avaluats són molt positius, però la seva efectivitat plantejava uns dubtes que caldria avaluar experimentalment.
- L'òxid de ferro és el filtre sobre el qual es pot trobar una major literatura (encara que reduïda) i la senzillesa en la seva construcció i operació és considerable.

D'aquesta manera es va acabar optant per realitzar els dissenys dels filtres en base a la reacció del H_2S amb òxid de ferro. Els dissenys instal·lats es presenten en el següent apartat.

3.5. Disseny dels filtres

La construcció dels dos biodigestors tubulars de plàstic va permetre el disseny i la construcció de dos tipus diferents de filtres. Tots dos treballen amb encenalls de ferro oxidat com a rebliment. Els criteris principals de disseny van ser l'ús de materials disponibles a la zona i la senzillesa en la construcció, de manera que no fes falta un coneixement específic per a la seva construcció i que amb l'ajut d'un manual fos possible construir-lo.

El disseny dels filtres es va dur a terme abans del funcionament dels biodigestors, de manera que es van suposar unes condicions de treball basades en dades obtingudes de



la bibliografia (Taula 3.7).

Producció diària biogàs	1,5 m ³ /d
Cabal horari biogàs	62,5 L/h
Concentració H ₂ S	3 %
Pressió	8 – 10 cmca
Humitat relativa	90-100%

Taula 3.7 – Condicions d'operació dels filtres

La concentració de H₂S va ser escollida deliberadament elevada. De totes les fonts consultades, 3% és la concentració més alta d'H₂S documentada en biogàs, així que es va decidir adoptar les condicions més desfavorables [1].

La pressió de 8-10 cmca és manomètrica i correspon a 8-10 mbar. Aquesta és la pressió màxima que es va escollir per al digestor, regulada amb la vàlvula de seguretat (veure capítol 2.2.3).

La humitat es va suposar al voltant de la de saturació, ja que el biogàs a la sortida del biodigestor està saturat de vapor d'aigua. De totes maneres el tram de sortida vertical del biodigestor d'uns 2m de llarg i una trampa d'aigua prèvia als filtres fan que la humitat, tot i ser elevada, pugui estar per sota del punt de saturació.

3.5.1. Rebliment

El rebliment consistia en encenalls de ferro sobrants de tallers i torns. Els encenalls que s'aconseguien estaven barrejats (Figura 3.7a), de manera que era possible que hi hagués diferents tipus de material fèrrics, entre ells acers inoxidable, que no contribueixen en el funcionament del filtre. La forma dels encenalls tampoc era la ideal, ja que solien ser molt llargs i prou gruixuts com per resistir petits esforços mecànics. Aquest fet reduïa la possibilitat d'assolir factors d'ocupació elevats.

Càlcul factor d'ocupació

Amb el filtre *Alejandro* es va dur a terme un experiment per tal de calcular el factor d'ocupació del filtre. El mètode era molt senzill: consistia en omplir el filtre amb el



rebliment com si s'anés a instal·lar i posteriorment omplir-lo fins a dalt amb aigua (Figura 3.6). El volum d'aigua afegit es mesurava (amb tota la exactitud que permetien els mitjans) i la diferència entre el volum mesurat i el volum buit del filtre era el volum ocupat pels encenalls. El resultat obtingut es va utilitzar com a referència, de manera que no es va repetir la experiència per al filtre *Sixto*.

Volum buit del filtre (L)	21,95
Volum d'aigua introduït (L)	19,10
Factor d'ocupació (%)	13,0

Taula 3.8 – Factor d'ocupació del filtre ALEJANDRO



Figura 3.6 – Filtre ple d'aigua i rebliment per la prova de determinació del factor d'ocupació

Oxidació

Els encenalls es mullaven i després es deixaven diversos dies a l'aire, per tal d'oxidar-los al màxim (Figura 3.7b). D'aquesta manera s'aconseguia formar l'òxid de ferro, tot i que només una petita capa superficial. Per això es feia impossible de saber amb exactitud la quantitat d'òxid de ferro introduït dintre del filtre. El mètode més senzill per tal de calcular la quantitat d'òxid de ferro format seria un anàlisi gravimètric. Pesant el ferro a l'inici (sense oxidar) i pesant-lo un cop estigui oxidat i es vagi a introduir al filtre, es pot calcular la quantitat d'òxid de ferro format coneixent l'estequiometria de la reacció d'oxidació:



De totes maneres, es faria necessària una bàscula molt precisa, que pogués donar pesos en l'ordre dels grams. Malauradament, la bàscula que feia servir en els meus experiments



no tenia aquest grau d'exactitud.



(a)



(b)

Figura 3.7 – (a) Encenalls de ferro recollits als tallers. (b) Encenalls oxidats.

3.5.2. Disseny *Alejandro*

Per a la granja d'Alejandro Andía, es va escollir un cubell de 5 galons⁶ (Figura 3.8) com a recipient on es col·locaria el reblliment. L'ús d'aquest cubell va ser degut a la seva fàcil obtenció, ja que és molt habitual que els grangers en tinguin per a dur menjar als animals, per transportar aigua, etc... Aquests cubells, així com els cilindres més grans, solen ser l'envàs original de lubricants per a l'automoció i un cop buits són venuts a alguns comerciants del *Parque Porcino*. El seu ús és tan comú que fins i tot ha esdevingut una mena d'unitat de mesura dins el *Parque*, en el que es refereix a menjar o aigua. Així alimenten els seus porcs amb *medio balde de comida* al dia o renten els corrals amb *dos baldes*⁷ d'aigua.

⁶ Una unitat volumètrica habitual al Perú són els galons americans. La seva conversió a S.I. és: 1 US gal = 3,79 dm³

⁷ *Balde* és l'expressió peruana per a cubell.





Figura 3.8 – Balde de 5 galons

Construcció

Al cubell se li van adaptar amb tub de ½” de PVC (el diàmetre utilitzat per a tota la conducció de biogàs) una entrada i una sortida a la part lateral, col·locats de manera oposada i amb l'entrada a la part alta i la sortida a la part baixa del cubell. A més es va instal·lar una vàlvula a baix de tot del cubell, per a drenar les possibles condensacions d'aigua. Totes aquestes unions es construïen amb passamurs de PVC, amb unes juntes de cautxú i espuma de poliuretà per evitar fugues. La tapa del cubell es segellava amb espuma de poliuretà. El filtre es connectava a la conducció amb dues unions universals que permetien desmuntar-lo i treure'l de la línia, i dues vàlvules instal·lades a la conducció que permetien aïllar-la en el moment de retirar el filtre, per tal d'evitar l'entrada d'aire a la canonada.

Manteniment

El manteniment d'aquest filtre es limitava al canvi del rebliment un cop aquest estigués saturat de contaminant. Per a dur el terme el buidat cal primer aïllar el filtre tancant les dues vàlvules de bola. Posteriorment es desmunten les unions i es retira el filtre de la conducció. El buidat del filtre es realitza per la part de dalt, traient la tapa superior. Un cop fet el canvi cal tornar a segellar la tapa, així que es fa necessari l'ús d'espuma de poliuretà o de la *pasta formadora de empaquetadura*⁸.

⁸ Aquesta pasta és segellant però no adhesiva. S'utilitza per al segellat d'unions.



Característiques del filtre

Alçada H (cm)	39
Diàmetre D (cm)	25 - 28,5
Rati d'aspecte H/D (-)	1,5
Volum (L)	21,9
Temps residència (min)	21
Velocitat lineal (cm/min)	1,9

Taula 3.9 – Característiques del filtre ALEJANDRO

(a)



(d)



(b)



(c)



(e)



Figura 3.9 – (a) Filtre amb les connexions d'entrada (esquerra) i sortida (dreta) del gas i la vàlvula de drenatge (a baix). (b) Detall del passamurs de PVC. (c) Detall de segellat amb pasta formadora de empaquetadura (vermell) i poliuretà (gris). (d) Filtre col·locat i ple de encenalls de ferro. (e) Ubicació del filtre en la conducció. En primer pla, la vàlvula de seguretat.

3.5.3. Disseny Sixto

Per a la granja de Sixto Almansa es va escollir un filtre que consistia en un tram de canonada de 6" plena d'encenalls de ferro oxidats. Amb un volum semblant al de l'altre disseny, la diferència principal respecte l'altre filtre és el rati d'aspecte, ja que aquest filtre és molt més llarg que ample.

Construcció

El filtre *Sixto* consisteix en un tram de canonada de PVC de 6" ple de encenalls de ferro oxidats. La única complicació que té la seva construcció és que cal posar diversos adaptadors per connectar el filtre (6") a la canonada (1/2"). En el nostre cas, en vam posar tres d'adaptadors: 1/2" – 2", 2" – 4", 4" – 6". A l'hora de construir-lo un extrem del tram de 6" s'uneix a la reducció 6"-1/2" amb adhesiu de PVC, mentre que la unió de l'altre extrem només es segella amb la *pasta formadora de empaquetadura*, que segella però no adhereix, permetent desmuntar aquesta unió per dur a terme el buidat del filtre (Figura 3.10d). Igual que en l'altre s'incorporen dues vàlvules de bola a l'entrada i a la sortida per aïllar el filtre i també dues unions universals per poder desmuntar-lo.

Manteniment

Les tasques de manteniment en el moment de canviar el contingut del filtre eren exactament les mateixes que en l'altre: aïllament del filtre amb les vàlvules de bola, desmuntatge de les unions universals i retirada del filtre de la conducció. L'obertura del filtre era una mica més complicada ja que les peces (el tub de 6" i la reducció) no estan dissenyades per a ser separades habitualment, com si ho està una tapa de cubell. Per altra banda, aquest fet tenia l'avantatge que l'hermeticitat del filtre requeria menys materials segellants.



Característiques del filtre

Alçada H (cm)	110
Diàmetre D (cm)	15
Rati d'aspecte H/D (-)	7,3
Volum (L)	19,4
Temps residència (min)	19
Velocitat lineal (cm/min)	5,9

Taula 3.10 – Característiques del filtre SIXTO

(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.10 – (a) Filtre Sixto desinstal·lat per a dur a terme el canvi dels encenalls. (b) Aspecte dels encenalls després d'un mes aproximadament de funcionament del filtre. (c) Vista del filtre instal·lat en la conducció. El forat davant del filtre conté una trampa d'aigua per a les condensacions. (d) Detall de les reduccions de 6" a 1/2". La substància vermella és la pasta formadora de empaquetadura segellant.



3.5.4. Conclusions

L'estudi dels filtres va ser molt complicat, degut a la austeritat en que s'emmarca aquest projecte i a la dificultat inherent en el propi intent de construir un filtre per eliminar H_2S (que és un procés prou complicat) amb materials senzills. El que es va intentar va ser apropar les tecnologies emprades en els processos químics a gran escala al nivell de tecnologia apropiada per al context del *Parque Porcino*.

Desgraciadament no em va donar temps a avaluar quantitativament el rendiment dels filtres de H_2S instal·lats. La ONG va adquirir un kit d'anàlisi de gasos de la marca japonesa GASTEC a principis d'abril, però un problema logístic amb els vials va impedir que pogués realitzar anàlisis. Cal indicar que ni el kit ni els vials estan disponibles al Perú i es van haver d'aprofitar alguns viatges de membres de CIUDAD SALUDABLE i de la UPC per dur-los a Lima. De totes maneres l'equip de CIUDAD SALUDABLE encarregat del projecte està començant a realitzar aquests anàlisis amb aquests filtres. Malauradament en el moment d'escriure aquesta memòria no es té cap resultat encara.

Les determinacions que s'han de dur a terme per a l'avaluació qualitativa dels filtres son:

Eficàcia

Per a determinar l'eficàcia del filtre en l'eliminació del H_2S , cal dur a terme les següents operacions:

- Anàlisi del biogàs cru, per obtenir la concentració de H_2S a la sortida del biodigestor.
- Col·locar un rebliment nou. Paràmetres a determinar:
 - Pes dels encenalls de ferro introduït
 - Càlcul d'òxid de ferro introduït (veure apartat 3.5.1)
- Realització d'una sèrie d'anàlisis del biogàs a la sortida de filtre (1 anàlisi cada setmana). Determinació de la concentració d' H_2S a la sortida de filtre.
- Representació gràfica: concentració d' H_2S a la sortida de filtre en funció del temps.

Temps de vida

Un cop representada la variació de la concentració d' H_2S en funció del temps es pot



determinar el temps útil del rebliment. Considerant una concentració màxima admissible al biogàs de 0,15% [27], que es recomana sovint per a operar motors estacionaris amb biogàs, aquesta seria la concentració límit que definiria el dies al cap dels quals caldria dur a terme el canvi del rebliment.

A banda de l'anàlisi qualitatiu que no s'ha pogut realitzar, es pot fer una avaluació qualitativa del funcionament dels filtres.

Alejandro

A nivell constructiu el filtre *Alejandro* presenta certes dificultats

- Cal foradar les parets del cubell, sense que els orificis siguin excessivament grans ni els contorns siguin molt irregulars i òbviament, sense fer malbé el cubell. D'altra banda els passamurs de PVC estan dissenyats per a superfícies planes i la curvatura de les parets dificulta la seva correcta fixació i per tant compromet l'estanquitat del filtre.
- L'hermeticitat és un factor molt important que porta força complicacions en aquest disseny. No només cal segellar els 3 orificis nous, sinó també tota la tapa superior. A més el fet de fer servir cubells usats comporta que molts cops aquests tinguin desperfectes, potser petits orificis no apreciables a primera vista, però que fan impossible el seu ús. Durant el procés de construcció del filtre, va succeir trobar la tapa del cubell amb unes fissures difícils de detectar, però que impedièren la correcta operació del filtre. Es va haver de desmuntar, reparar els orificis amb una resina epòxica i tornar-lo a muntar.

A nivell de funcionament cal indicar els següents punts:

- El fet que no hi hagi cap tipus de deflectors a l'interior del filtre fa que no es puguin evitar la formació de camins preferencials. La forma compacta del filtre, on l'entrada i la sortida es troben molt properes, augmenta l'efecte negatiu d'aquest fet, ja que el camí més directe per al biogàs és molt curt, deixant molt volum de filtre infrutilitzat.
- El gran diàmetre de l'obertura superior per on es realitza el canvi dels encenalls facilita molt aquesta tasca. Això va en detriment de la facilitat per aconseguir una bona hermeticitat.



- Els tubs d'entrada i sortida del biogàs en el filtre, al estar fixos en el filtre, asseguren que no hi haurà problemes un cop es treu el filtre per canviar el rebliment, en instal·lar-lo novament.
- La vàlvula de drenatge es va instal·lar amb la previsió que el vapor d'aigua contingut en el biogàs pogués condensar en contacte amb el rebliment. Quan es va obrir el filtre un mes després d'haver-se instal·lat, no es va trobar cap tipus de condensació. Aquesta comprovació simplifica la construcció de possibles futurs filtres, car la instal·lació d'aquesta vàlvula no es necessària.
- L'efectivitat del filtre es va poder comprovar empíricament, amb l'ajut dels manòmetres instal·lats, però no gràcies al funcionament propi del manòmetre sinó gràcies a la mànega de plàstic transparent amb que estaven construïts. Les primeres setmanes després de la instal·lació del filtre, les mànegues dels manòmetres mantenien la seva transparència. Després es va poder observar com aquestes engroguien gradualment, signe de la presència de compostos sulfurosos en el biogàs (Figura 3.11).



Figura 3.11 – Manòmetre amb la part de la mànega en contacte amb el biogàs esgrogueïda

Sixto

A nivell constructiu el filtre *Sixto* presenta els següents aspectes:

- La construcció és molt senzilla, ja que totes les peces són comercials i encaixen entre elles perfectament afavorint l'hermeticitat. A més no cal fer cap actuació especial, no com en el filtre anterior on calia foradar el cubell i instal·lar-hi els passamurs. Aquí tota actuació es redueix a enganxar peces de PVC comercials i segellar-les.



- Es va dubtar entre dos diàmetres de tub: 4" i 6". El tub de 4" té l'avantatge del menor cost econòmic, si bé la diferència de preu per a un mateix volum és molt petita. El tub de 4" té els desavantatges que es necessita més espai per a la seva instal·lació, ja que cal un tram més llarg per aconseguir el mateix volum que amb el tub més ample i que el menor diàmetre dificulta més la introducció dels encenalls en el seu interior. El fet decisiu, però, que va fer decidir-se per el tub de 6" va ser que és el mateix tub que es s'utilitza per a la construcció del biodigestor i hi havia uns trams sobrants que es van aprofitar per al filtre.
- L'hermeticitat és força senzilla d'assegurar, ja que només cal segellar l'adaptador que es pot extreure. No hi ha cap altre punt del filtre on faci falta aplicar-hi productes per segellar.

Funcionament

- El rati d'aspecte més gran del filtre *Sixto* fa que els canals preferencials que es puguin formar siguin molt més llargs i per tant es redueix la quantitat de rebliment que pot quedar en zones mortes.
- El buidatge i ompliment del filtre *Sixto* és una mica més complicat que l'altre degut al seu menor diàmetre (pràcticament la meitat).
- La forma del filtre (poc compacte) fa que sigui menys pràctic alhora de manipular-lo.
- La col·locació de l'adaptador després de realitzar el canvi del rebliment ha de ser duta a terme de manera acurada, ja que el fet que aquesta peça sigui la que es connecta també a la conducció, fa que una inadequada introducció del tub dins l'adaptador alteri la longitud total del filtre i no encaixi en el seu espai dins la conducció, que és fixa (tot i que té un cert marge de flexibilitat).

Tenint en compte aquests comentaris, personalment em va semblar més adient el filtre *Sixto*. Sense poder argumentar en base a uns anàlisis del biogàs, sembla que a priori el rati d'aspecte més elevat del filtre *Sixto* afavoreix la seva eficàcia. La seva construcció també es molt més senzilla i més fàcil d'aconseguir una bona estanquitat. La canonada de 4" complicaria en excés la introducció dels encenalls, a més de requerir més espai en la instal·lació i la compra expressa d'aquesta mida de canonada, mentre que la de 6" s'usa també en la construcció del biodigestor.



4. Emmagatzematge del biogàs

El procés de producció de biogàs és un procés continu. De gas se n'està generant contínuament, si bé és cert que pot variar el seu rati de producció al llarg del temps, depenent de la temperatura principalment, però també d'altres factors. En canvi el seu ús és ocasional, sobre tot en els casos en què es centra el present treball, ja que no és durant totes les hores del dia que s'utilitza el biogàs, sinó bàsicament alhora de cuinar. Aquesta diferència fa que sigui necessària una certa capacitat d'emmagatzematge del biogàs en la instal·lació. Si no fos així el cabal màxim d'utilització del gas seria el cabal de producció i aquest últim sol ésser massa baix com per poder fer funcionar cap aplicació.

En el cas dels biodigestors tubulars de plàstic (PTD) inicialment el propi biodigestor feia les funcions d'emmagatzematge i el gas generat s'acumulava en la part superior de l'interior del biodigestor. Això comporta una sèrie de inconvenients. La baixa pressió a la que treballen aquests biodigestors (8-10 cmca) fa que sigui necessari augmentar-la una mica d'alguna manera per tal de poder fer una correcta combustió al cremador. A més mentre es va consumint el gas la pressió encara disminueix més. Per augmentar-la, el més senzill és reduir el volum on està emmagatzemat el gas. Això vol dir comprimir el biodigestor amb algun tipus de pes. Això és molt desaconsellable tant en termes econòmics com de seguretat i de comoditat. D'una banda posar pesos a sobre el biodigestor pot fer malbé el plàstic (si no el trenca en el mateix moment, l'anirà malmetent poc a poc, amb la qual cosa s'haurà de canviar abans). I de l'altra implica haver d'anar fins el digestor per posar els pesos cada vegada que es vulgui utilitzar el gas, quan el biodigestor i la cuina haurien de ser a una certa distància.

La instal·lació d'un espai extern al biodigestor per a l'emmagatzematge del biogàs evita aquests inconvenients i comporta alguns altres avantatges: pot col·locar-se més a prop del punt d'utilització, pot tenir el volum que es desitgi, pot reparar-se independentment del biodigestor en cas de ruptura, etc... D'ara en endavant, aquest volum on emmagatzemem el biogàs, l'anomenarem dipòsit.



4.1. Característiques i requisits de l'emmagatzematge de biogàs en instal·lacions de baix cost

A continuació es discuteixen una mica els requisits més importants que ha de complir un bon sistema d'emmagatzematge de biogàs en instal·lacions de baix cost.

4.1.1. Seguretat

Un criteri indispensable en el disseny del dipòsit és la seguretat. Al tractar amb un producte combustible el primer risc que cal vigilar és el perill d'explosió. En aquest sentit cal tenir clars certs aspectes:

- El biogàs té un poder calorífic considerable (20.000-22.000 kJ/m³), però no és tan dens energèticament com el butà, el propà o el GLP, ja que només és el metà qui contribueix al seu poder calorífic i representa aproximadament un 60% en volum.
- En sistemes de producció de baix cost, la pressió del biogàs no assoleix mai nivells per sobre de 10 cmca, gràcies a la vàlvula de seguretat.
- El metà tot i no ser un gas tòxic, desplaça l'oxigen, igual que el diòxid de carboni. A més l'H₂S que conté té un elevat potencial tòxic. Així el biogàs és un gas que pot ser tòxic i que crea ambients anaerobis.
- El biogàs és més lleuger que l'aire (densitat relativa 0,91 [2]) i per tant en cas de fuga tendirà a elevar-se.

El risc d'explosió en un sistema d'aquest tipus és molt petit, per no dir nul. El fet que el biogàs no s'emmagatzemi pressuritzat, sinó amb una lleugeríssima sobrepressió manomètrica, fa que en cas de contacte amb una font de calor, flama o espurna, pogués tenir lloc una deflagració. Òbviament això podria provocar un incendi, però en cap cas tindria lloc una detonació.

La toxicitat del biogàs és un perill que si bé cal tenir en consideració és relativament controlable. La ubicació ideal d'un dipòsit és a l'exterior, ja que d'aquesta manera en cas de fuga el biogàs es diluirà ràpidament sense possibilitat d'acumular-se, degut a la seva menor densitat respecte l'aire. Sí que cal, però, preveure algunes proteccions com un cobriment per protegir el plàstic de la irradiació directa del sol, protegir-lo amb algunes malles o xarxes per evitar la intrusió d'animals, aus, i també de nens, etc. En cas



d'instal·lar el dipòsit en interior, caldrà habilitar un sistema de ventilació en la part alta del recinte, per evitar-ne possibles acumulacions. En cas contrari a més de acumular-se un gas combustible amb risc de deflagració aquest gas desplaçaria l'oxigen de l'aire, creant un ambient anòxic perillós per a la salut.

En quant a mesures de seguretat, se'n poden trobar de dos tipus: el primer seria mesures preventives, és a dir, mesures destinades a evitar que el dipòsit pateixi cap desperfecte, esquinc o fuga. El segon tipus de mesura de seguretat és aquell que intenta minimitzar els efectes de l'accident, en cas que aquest tingui lloc. Així, un dipòsit al costat d'uns cilindres on s'emmagatzemi algun altre producte combustible és ben perillós, ja que, tot i que hi pugui haver poques possibilitats de deflagració, en cas que aquesta succeís, els efectes podien ser molt greus.

4.1.2. Pressió

Un dipòsit ideal és capaç de proporcionar el biogàs al cremador a una certa pressió i mantenint aquesta pressió constant. Per a una correcta combustió del biogàs, la seva pressió ha de ser com a mínim d'uns 12-14 cmca. Per sota d'aquesta valor, la flama resulta força inestable. D'altra banda, la pressió a la que surt el biogàs del dipòsit en molts pocs casos s'aconsegueix que sigui constant. Només el dipòsit del biodigestor tipus hindú (cúpula flotant, veure capítol 1.2.2.) està dissenyat de tal manera que aquest efecte es produeixi.

Així doncs cal dotar al dipòsit d'un sistema que permeti acomplir aquestes dues funcions: augmentar la pressió del biogàs i mantenir constant aquesta pressió durant el procés de buidat del dipòsit.

4.1.3. Dipòsit regulador (dimensions)

La producció de biogàs en els sistemes descrits és continua. El seu consum en canvi, no ho és. Aquest fet fa que sigui necessari un volum on s'emmagatzemi la producció de gas en les hores en què no hi ha consum, per tal de poder fer front a la demanda en els moments d'ús. El dimensionament del dipòsit depèn bàsicament de la producció de biogàs i del consum, així com dels períodes de consum (si és un consum petit però continu, un consum molt elevat en curts espais de temps o completament aleatori), però



també s'han de tenir en compte altres factors, com el cost econòmic o la efectivitat dels sistemes de compressió del dipòsit i la seva facilitat de manipulació per part de l'usuari [33]. En cas que la construcció del dipòsit sigui molt cara, caldrà ajustar molt bé el seu volum per tal de no desaprofitar gas, alhora que s'aconsegueix una inversió inicial raonablement reduïda. En canvi, en els casos en que els materials de construcció del dipòsit siguin molt barats, aquest es podrà sobredimensionar amb l'objectiu de poder acumular més biogàs, en cas que no es consumeixi o en pics de producció sense que això afecti decisivament el cost inicial del dipòsit.

4.2. Tecnologies disponibles

En la actualitat es poden trobar alguns exemples de dipòsits, cadascun amb les seves característiques pròpies i que resolen de diferents maneres els aspectes anteriorment exposats.

4.2.1. Cúpula flotant

Aquest dipòsit és el que fa servir el biodigestor tipus hindú, però també es pot construir extern al biodigestor. Consisteix en una cúpula o cilindre invertit sobre un altre cilindre més ample que conté aigua. D'aquesta manera el biogàs s'emmagatzema en l'espai que existeix entre el cilindre superior i l'aigua, i aquesta fa la tasca de segell hidràulic, que evita fuites de gas. El gran avantatge d'aquest sistema és que el biogàs és subministrat pràcticament a pressió constant, ja que la cúpula va baixant i reduint el volum al mateix temps que el biogàs és evacuat. Per contra, la seva construcció és molt cara i pot arribar a ser força complexa.

4.2.2. Dipòsit de plàstic

Un dels dipòsits de baix cost més habituals és el de doble capa de polietilè. Consisteix en dos trossos de plàstic de polietilè tubular, inserit l'un dins de l'altre, per evitar els riscos de fuites. Els extrems es tanquen hermèticament i es fa una sortida per al gas. El gran avantatge d'aquest sistema és el seu baixíssim cost, la seva senzillesa de construcció i la fàcil disponibilitat dels materials. Per contra, és una mica delicat i és el que presenta més problemes alhora de poder aconseguir una pressió suficient per als cremadors.



Un dels mètodes per augmentar la pressió en aquests tipus de dipòsits consisteix senzillament en lligar una cinta al voltant del dipòsit i estirar-la amb força a l'hora de fer servir el gas, tal com si fos un cinturó (Figura 4.1).

Un sistema més evolucionat és el proposat per Zhang [33] on el dipòsit, col·locat en posició vertical, és comprimit per un eix unit al plàstic, que amb unes politges i uns pesos va disminuint el seu volum (Figura 4.3). A la Figura 4.2 es pot veure un altre disseny, construït al poble de Yanaoca (Perú), en un projecte de la ONG peruana IAA en cooperació amb la UPC, executat per l'ex-estudiant de l'ETSEIB Davide Poggio [6]. Una sèrie de contrapesos serveix per aguantar una taula de fusta mentre s'omple el dipòsit. En el moment d'ús, la taula és la que efectua la pressió sobre el reservori.



Figura 4.1 – Dipòsit comprimit amb un “cinturó”



Figura 4.2 – Dipòsit a Yanaoca [6]

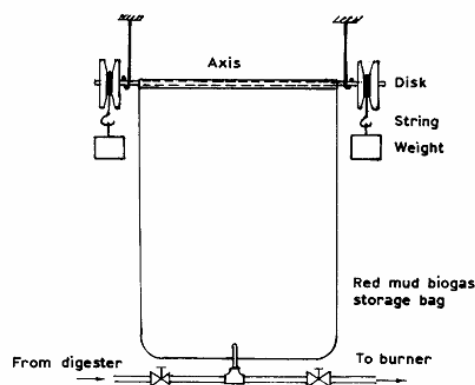


Figura 4.3 – Dipòsit amb eix rotatiu [33]



4.3. Disseny dels dipòsits instal·lats

En els sistemes de biodigestió construïts al Parque Porcino es van incloure els corresponents dipòsits, que responen al tipus de dipòsit de plàstic PE. Es van fer dos dissenys, adaptant cadascun a la fesomia i disponibilitat d'espais de cada granja.

4.3.1. Dipòsit ALEJANDRO

Ubicació

La vivenda de la granja del Sr. Alejandro Andía es troba a l'interior d'una construcció que anteriorment havia estat usada com a dipòsit d'aigua, construïda pel propi granger. Així el recinte habitable es troba a uns 1,50-1,80m d'alçada respecte el nivell mitjà del terreny de la granja. Per accedir-hi, hi havia una estructura de fusta amb uns graons i una petita passarel·la (Figura 4.4).



Figura 4.4 – Espai per a la ubicació del dipòsit a la granja ALEJANDRO

Es va decidir instal·lar el dipòsit en el forat sota la passarel·la, ja que d'aquesta manera queda a prop de la cuina, que es troba al interior de la vivenda, està força protegit de la intempèrie i es troba en el recorregut de la conducció de gas, estalviant haver de fer una ramificació. L'espai disponible va ser el criteri decisiu per al dimensionament del dipòsit, de manera que fins i tot es va comprar plàstic d'un ample de rotllo una mica més estret del habitual per tal que hi cabés. Es va recobrir la part inferior de la passarel·la, les columnes i els murs de formigó amb plàstic, per tal d'evitar que la irregularitat de la superfície malmetés el plàstic del dipòsit i Alejandro Andía va recobrir totalment la part



anterior amb taulons de fusta, de manera que el dipòsit quedava totalment ocult.



Figura 4.5 – Ubicació coberta del dipòsit ALEJANDRO

Construcció

Les dimensions finals del dipòsit van resultar:

Circumferència (cm)	215
Longitud (cm)	178
Volum (L)	654

Taula 4.1 – Dimensions dipòsit ALEJANDRO

La construcció del dipòsit d'ALEJANDRO es va realitzar amb rotlle de PE de 1m amplada, i, a diferència d'altres experiències, es van habilitar dos tubs, un d'entrada y un de sortida, en els extrems, aprofitant les obertures naturals del plàstic. D'aquesta manera era més senzill tancar hermèticament el dipòsit i podia ser instal·lat directament en el recorregut de la conducció del gas. Cadascun dels dos tubs tenia a l'extrem una vàlvula de bola de ½", per tal de poder regular el pas de biogàs cap al biodigestor, cap a la cuina, o fins i tot d'aïllar el dipòsit completament. La connexió entre els tubs i la conducció fixa de ½" de biogàs es va construir amb uns trams de mànega elàstica, per tal de permetre una certa flexibilitat al dipòsit en les etapes d'ompliment i buidat.



Compressió

La pressió addicional en aquest dipòsit s'aconsegueix gràcies a una malla que cobreix la bossa de plàstic. La malla està ancorada a la superfície que serveix de base al dipòsit, entre el dipòsit i el mur posterior. Aquest ancoratge consisteix en una sèrie de voltes de la malla al voltant d'un llistó de fusta, que va clavat amb dues grans vares de ferro en forma de "U" al pis on reposa el dipòsit. La malla es col·loca per sobre del dipòsit fins a sobresortir per la part anterior d'aquest. En aquest punt, es carreguen uns pesos amb uns ganxos a la malla i d'aquesta manera es comprimeix el dipòsit.



(a)



(c)



(b)



(d)

Figura 4.6 – (a) Vista frontal del dipòsit ALEJANDRO, amb la malla per sobre. L'ancoratge de la malla es troba en l'extrem situat a baix a la dreta. (b) Vista superior, amb el terra de la passarel·la retirat expressament per observar el dipòsit. (c) Vista lateral on es poden observar els pesos penjats de la malla. (d) Detall de l'ancoratge de la malla.



La pressió que s'assoleix a l'interior del dipòsit està directament relacionada amb la producció de biogàs i el seu consum. Als matins, quan encara els grangers no han utilitzat el biogàs i aquest s'ha estat acumulant durant tota la nit, la pressió pot arribar als 10-11cmca, la màxima pressió del sistema. En aquestes condicions per usar el biogàs no és necessari el mecanisme de compressió, i els grangers usaven el biogàs amb les vàlvules del dipòsit obertes. En el moment en que la flama comença a ser una mica més fluixa, tanquen la vàlvula que connecta el dipòsit amb el biodigestor i carreguen amb pesos la malla.

La pressió es mesura amb un manòmetre en "U", construït amb una mànega transparent de 1/8", fixada a una taula amb una escala mil·limetrada (Figura 4.7).

L'ús del pesos augmenta momentàniament la pressió, però passada una estona la pressió torna a descendir. És a dir que aquest sistema no és capaç de mantenir una pressió constant de sortida del dipòsit durant el procés de buidat.



Figura 4.7 - Manòmetre

Seguretat

El dipòsit ALEJANDRO té un bon nivell de seguretat, sobretot de mesures de prevenció d'accidents. Es troba totalment cobert per l'estructura de fusta, cosa que evita que s'hi apropin animals (gats, gossos) o que algun objecte el colpegi accidentalment. A més, la



mallà també contribueix en aquesta protecció. El fet d'estar a l'exterior fa que el risc d'intoxicació sigui mínim. El punt negre d'aquesta disposició és la seva col·locació a sota de l'entrada a la vivenda, més quan l'estructura que té a sobre és de fusta. En cas de fuita i combustió de la fuita, podria ocórrer una deflagració que incendiés la fusta. La probabilitat que el dipòsit s'esquinci és molt reduïda gràcies a les proteccions i encara ho és més que s'inflami.

4.3.2. Dipòsit SIXTO

Ubicació

La vivenda de la granja del Sr. Sixto Almansa es troba en la part alta de la granja, al costat de l'entrada. Consisteix en una construcció artesanal amb les parets i el sostre fet amb parihuelas (palets), estores y fustes. El terra és directament la sorra del terreny. El dipòsit és va instal·lar davant del petit hort que es troba al costat de la casa. El dipòsit es va ubicar en el traçat de la conducció de biogàs. Des del digestor fins aquí la conducció ve soterrada. En aquest punt, s'aixeca per entrar al dipòsit i un cop passat aquest continua de manera aèria fins a la cuina.

Construcció

El dipòsit de Sixto es va construir exactament de la mateixa manera que el de Alejandro, però les seves dimensions van ser diferents. És va escollir un plàstic amb un ample de rotllo de 1,5m, que és una mesura més estàndard i més fàcil de trobar. Les dimensions finals van ser:

Circumferència (cm)	307
Longitud (cm)	128
Volum (L)	962

Taula 4.2 - Dimensions dipòsit SIXTO

Igual que en el cas de Alejandro, tant abans com després del dipòsit es va col·locar un tram de mànega plàstica per connectar-lo amb la conducció i una vàlvula de bola.

Compressió

El sistema de compressió en aquest cas consisteix en una senzilla però elaborada



estructura de fusta, amb una taula inferior on reposa el dipòsit i una de superior que efectua la pressió (Figura 4.8). Les columnes per aguantar la taula inferior serveixen de guies per tal que la taula superior no es desequilibri. A dalt de tot es va posar una fusta travessera on es va instal·lar una politja. A la taula superior es van lligar 4 cables d'acer de 1/8" des de cada cantonada fins el centre, on s'unien tots 4. Aquí s'hi fixa una altra politja que serà mòbil. Aquest sistema amb dues politges, una de fixa i una altra de mòbil, que s'anomena polipast, té l'avantatge que redueix l'esforç mecànic necessari per a aixecar una càrrega. El Sr. Sixto Almansa és un home corpulent i fort que podia aixecar la taula sense problemes però aquest detall es va instal·lar per tal que la seva dona, Cristina Ayvar, amb menys força física, fos capaç també d'aixecar la taula superior en el cas que el seu marit no hi fos.

Així el mecanisme és senzill. Quan no s'usa el gas, es tanca la vàlvula entre el dipòsit i el cremador i s'obre la vàlvula entre el dipòsit i el biodigestor. Amb l'ajut de la corda i les politges es puja la taula de manera que no destorbi l'ompliment del dipòsit, i es lliga la corda a la columna per fixar-la. En el moment d'ús es tanca la vàlvula que va al digestor i s'obre la del cremador. Es deslliga la corda i la taula efectua una compressió sobre la bossa.



(a)



(c)



(b)



(d)



Figura 4.8 – (a) Ubicació original del dipòsit SIXTO. (b) Dipòsit finalitzat: taula superior, dipòsit i polipast. (c) Dipòsit en construcció: columnes i taula inferior. (d) Detall de guies de la taula superior.

Aquest sistema aconsegueix una pressió suficient per a la correcta combustió del biogàs, si bé es cert que la pressió tampoc es manté totalment constant. A més, amb aquest mecanisme es pot aprofitar molt més el volum del dipòsit, ja que fins i tot quan té poc biogàs al interior l'efecte de la compressió és prou bo per al cremador.

Seguretat

El dipòsit es troba situat a l'exterior, a uns 5-7 metres de la vivenda, amb la qual cosa el risc d'intoxicació o d'incendi de la vivenda és nul. El dipòsit esta protegit amb una manta que tenia el granger, per evitar danys causats pels gats, gossos o petites aus. De totes maneres es va decidir d'acord amb el granger que posaria una malla o algun element semblant entre les columnes per tal de protegir encara més el biodigestor. En el moment de la meva marxa, però, encara no estava instal·lat.

4.3.3. Conclusions

Alejandro

El dipòsit ALEJANDRO s'ha adaptat molt bé a les condicions i requisits de la granja, sobretot en el que correspon a integració dins la granja i mínima ocupació de l'espai. S'ha aconseguit un bon nivell de seguretat, gràcies a les múltiples proteccions. El sistema de compressió no ha resultat tan pràctic com s'esperava, però el seu ús permet el funcionament de la cuina durant l'estona suficient com per a fer un àpat normal.

Els problemes que ha presentat aquesta solució són els següents:

- La malla era reutilitzada i no tenia unes dimensions regulars. No es va tenir prou cura al enrotllar-la al llistó, i no es va fer de manera ben alineada.
- No s'ha aconseguit penjar els pesos de manera regular, de forma que la malla està més traccionada en alguns punts, mentre en d'altres té menys tensió, i així la pressió exercida per la malla sobre el plàstic no és uniforme i aquest pateix més en uns punts que uns altres.



- La malla va recargolant el dipòsit, degut al moviment perimetral de la malla respecte al dipòsit i la seva fricció amb el plàstic. Això esdevenia crític en el punt on la malla es recolza en el mur frontal, ja que aleshores arrossega el dipòsit contra el mur amb risc de malmetre el dipòsit.
- La distància entre el nivell del dipòsit i el terra és massa curta i els pesos carregats a l'inici acaben tocant a terra, de manera que es deixa de comprimir el dipòsit. Cal doncs anar pujant els pesos per la malla periòdicament.
- No es pot aconseguir un buidat complet del dipòsit amb uns nivells de compressió prou bons com per a una efectiva combustió. Quan el dipòsit es troba molt buit, la compressió no és efectiva.

Sixto

El dipòsit SIXTO va permetre molta més llibertat alhora de fer el disseny, ja que no tenia el condicionant d'una ubicació adequada ni una limitació geomètrica determinada. D'aquesta manera es va poder construir un sistema que es va mostrar força eficaç, però que va comportar una major despesa econòmica. La construcció va ser també molt senzilla i sense cap operació ni cap eina que estigui fora de l'abast dels *porciultores* del *Parque Porcino*.

Tanmateix, el dipòsit presenta certs aspectes a millorar:

- La tasca d'equilibrar la taula superior pot ser feixuga. Per tal que la corda no desestabilitzi la taula superior, cal trobar el centre de gravetat de la taula, unir els 4 cables en aquell punt i des d'allà estirar amb la corda. En cas contrari la taula es torcerà al pujar i baixar.
- Les columnes que fan de guies, en ser fustes sense polir, no presenten una superfície regular ni recta, de manera que poden arribar a obstaculitzar el lliscament de les guies de la taula. A més la seva rugositat també n'augmenta la fricció.

Aquests problemes, però, es veuen minimitzats si el moviment de la taula es lent i per tant, en el moment de la compressió, on la taula es mou molt lentament, aquests efectes no són massa importants.





5. Combustió del biogàs

El biogàs s'obté com a producte de la digestió anaeròbia dels residus orgànics i el seu valor resideix en l'energia potencial que els seus enllaços químics acumulen. Però aquest tipus d'energia cal transformar-lo en un altre tipus per a poder treure'n profit. El procés de transformació més senzill és el de la combustió. En aquest capítol es descriuran alguns conceptes bàsics de la combustió i s'exposaran els conceptes més importants per dissenyar un cremador eficient per a biogàs. Així mateix es presentaran els resultats dels experiments duts a terme amb el biogàs a les granges del *Parque Porcino*.

5.1. Introducció a la combustió

La combustió es defineix com una *reacció d'oxidació exotèrmica i molt ràpida, que allibera una gran quantitat d'energia en forma de calor i llum* i que es propaga en un medi que sigui adequat. Aquesta propagació es deu a la relació estreta entre la reacció química i els fenòmens de transport, que estan molt afavorits en aquest tipus de reaccions ([34], pg. 26).

Dels diferents tipus de combustió existents, ens centrarem en les de combustibles gasosos en flames estacionàries que tenen lloc en els cremadors. La flama estacionària és la zona on es troba el front de reacció i per tant constitueix la font de l'energia tèrmica alliberada per la reacció.

Les flames estacionàries es classifiquen habitualment segons la manera com entren en contacte el combustible i l'aire [35].

Flames no airejades o difusives

En aquest tipus de flames la combustió prové de la difusió de l'oxigen en el cabal de combustible sense reaccionar al mateix temps que aquest entra en la cambra de combustió

Flames airejades

Quan el combustible i l'aire es mesclen abans d'arribar a la zona d'ignició es parla de flames airejades. Aquest aire s'anomena *aire primari* i si la seva proporció respecte al



combustible és la necessària per a una combustió completa s'anomena *flama totalment airejada*. Si l'aire primari no és suficient per a una combustió completa, aleshores es tracta d'una *flama parcialment airejada* i la resta de l'aire (aire secundari) arriba per difusió al combustible no cremat aigües avall de la flama.

Els cremadors més habituals per a combustibles gasosos són de flama parcialment airejada, ja que en els de flama difusiva la combustió sol ser incompleta i no són tant eficients, i els de flama totalment airejada requereixen un disseny més exhaustiu i complex per tal d'assolir l'aeració primària estequiomètrica.

En els següents apartats es comentaran els aspectes fonamentals de la combustió i es descriuran els aspectes més importants per al disseny d'un cremador de flama parcialment airejada.

5.2. Propietats principals del combustibles

Límits d'inflamabilitat

Per a totes les mescles d'aire i combustible, existeixen uns límits en la composició fora dels quals la mescla no és combustible, és a dir, que hi ha o bé massa o massa poc oxigen. Aquests límits depenen de la composició del gas, temperatura i pressió. Alguns límits d'inflamabilitat de combustibles habituals es poden trobar a la Taula 5.1.

Combustibles	Límits d'inflamabilitat (% gas en volum)	
	Inferior	Superior
Metà	5,0	15,0
n-Propà	2,1	9,5
n-Butà	1,8	8,4
Hidrogen	4,0	75,0

Taula 5.1 – Límits d'inflamabilitat d'alguns combustibles [35]

Velocitat de propagació de flama

La velocitat de flama es defineix com la velocitat de propagació del front de la flama en una mescla gasosa en relació a la velocitat d'aquesta mescla. Aquesta velocitat depèn de la concentració de combustible en l'aire, essent pràcticament zero en els límits



d'inflamabilitat i assolint un màxim prop de la concentració d'aire estequiomètric.

Aire estequiomètric

Com en tota reacció de combustió un dels paràmetres més importants és el rati aire/combustible que tindrà la combustió. Un rati massa baix provocarà una combustió incompleta però un excés d'aire suposa una major quantitat de fums que absorbeixen l'energia alliberada, reduint-se el rendiment de la combustió en qualsevol dels dos casos. L'aire estequiomètric és la quantitat d'aire necessari per a dur a terme una combustió completa en condicions ideals.

Combustible	Aire estequiomètric (m ³ aire /m ³ gas)
Metà	9,52
n-Propà	23,78
n-Butà	30,97
Biogàs (60% CH ₄)	5,71

Taula 5.2 – Relacions d'aire estequiomètric per a diferents combustibles [36]

Com es pot apreciar en la Taula 5.2, el biogàs requereix molt menys aire que la resta de combustibles gasosos convencionals. Amb un rati estequiomètric de 5,71 s'obté una concentració de CH₄ de 9% en l'aire.

El rati d'aire/combustible necessari per a una combustió eficient és un paràmetre que variarà en funció del disseny concret de cada cremador, de la pressió de treball, del contingut de metà del biogàs, etc. A més, com es veurà més endavant, en els cremadors atmosfèrics aquest rati és una variable molt difícil de controlar, a diferència del cas dels motors estacionaris.

5.3. Propietats del biogàs

El biogàs té unes propietats particulars degut a les següents raons:

- és una mescla de diferents gasos
- té una composició diferent segons el seu origen
- s'utilitza generalment a baixa pressió, condicionat pel sistema de generació



Les propietats més importants dels gasos que componen el biogàs es poden trobar en la Taula 5.3.

	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	H ₂	Biogàs (60% CH ₄)
Concentració (% en biogàs)	50-70	30-50	0-3	0-1	100
Pes molecular (g/mol)	16	44	34	2	27,35
Gravetat específica (-)	0,55	2,5	1,2	0,07	0,91
PCI (kJ/m ³)	35.640	-	22.680	10.800	21.385
Límits d'inflamabilitat (% en aire)	5-15	-	4-45	4-80	9-17
Velocitat de flama (cm/s)	43	-	-	47	25

Taula 5.3 – Propietats dels gasos que componen el biogàs [2] [37]

5.4. Cremadors parcialment airejats

5.4.1. Descripció

Les flames parcialment airejades són aquelles que reben l'aire necessari per a la combustió de dos zones diferents: l'aire primari que es mescla amb el combustible abans d'arribar a la flama, i l'aire secundari que és l'aire que hi ha al voltant de la flama i que difon dintre d'aquesta per arribar a reaccionar amb el combustible no cremat.

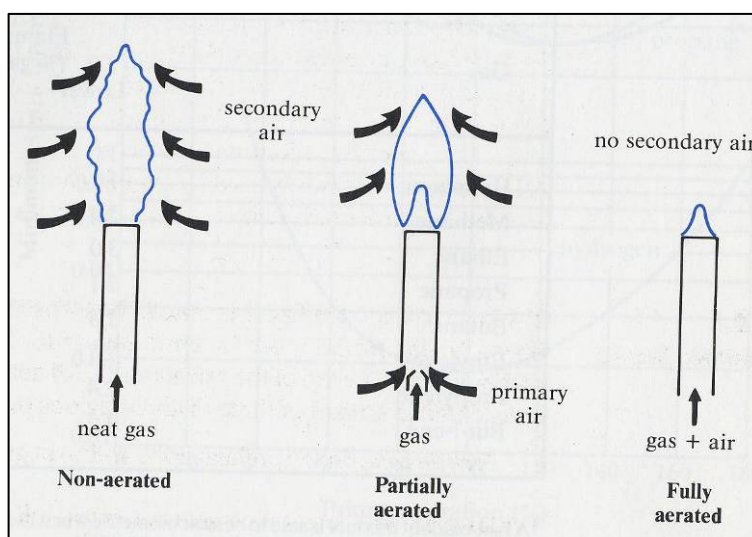


Figura 5.1 – Tipus de flames: no airejades, parcialment airejades i totalment airejades [35]



5.4.2. Aspectes de disseny

El disseny bàsic d'un cremador parcialment airejat es pot observar en la Figura 5.2.

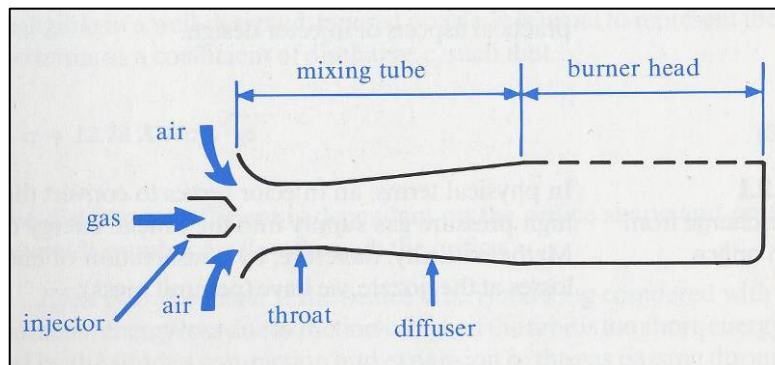


Figura 5.2 – Disseny general d'un cremador atmosfèric parcialment airejat [35]

El seu funcionament consisteix en l'ejecció d'un raig de gas a través de l'injector, la qual cosa provoca, per efecte Venturi, l'arrossegament d'aire atmosfèric (aire primari). La mescla gasosa entra aleshores en el difusor, on té lloc la barreja del combustible amb el gas. La mescla barrejada arriba a la cambra de sortida que ha de tenir un disseny que reparteixi uniformement la mescla gasosa per tots els orificis de sortida. La combustió de la mescla té lloc en cada raig que emergeix pels orificis de sortida.

Per tal que el cremador funcioni de manera eficient cal fer un disseny acurat de 4 aspectes fonamentals: l'injector, l'arrossegament d'aire primari, el difusor i els orificis de sortida.

5.4.2.1. Injector

L'injector és la part del cremador que controla el cabal de gas i per tant la potència del cremador, donada una certa pressió i composició del gas. La seva mida i geometria determinen decisivament aquests paràmetres.

El cabal d'un fluid a través d'un orifici respon a la següent fórmula:

$$\dot{V} = A \cdot C_d \cdot \sqrt{\frac{2P}{\rho_a \cdot \sigma}} \quad (5-1)$$



On:

- V: Cabal de gas a través de l'orifici (m³/s)
 A: Àrea de l'injector (m²)
 C_d: Coeficient de descàrrega (-)
 P: Pressió manomètrica (Pa)
 ρ_a: Densitat de l'aire (kg/m³)
 σ: Densitat relativa del gas (-)

El coeficient de descàrrega és un número adimensional que depèn de la geometria de l'orifici (Figura 5.3). El coeficient de descàrrega introdueix en la fórmula les pèrdues de càrrega degudes a l'orifici i l'efecte de *vena contracta* que té lloc aigües avall de l'injector.

Orifice length Diameter	0.58	3.5	0.8	1.0
Angle of approach	45°	55°	33°	40°
Coefficient of discharge	0.81	0.84	0.93	0.94

Figura 5.3 – Coeficients de descàrrega per a diferents geometries d'injector

Els coeficients de descàrrega més elevats (C_d>0,9) s'assoleixen amb angles d'incidència de 35-40° i amb una longitud de l'orifici semblant al seu diàmetre [35].

A partir de l'Equació (5-1), és pot calcular la potència calorífica del cremador:

$$\dot{q} = PCI_{gas} \cdot \dot{V} = PCI_{biogas} \cdot A \cdot C_d \cdot \sqrt{\frac{2P}{\rho_a \cdot \sigma}} \quad (5-2)$$

On:

- q: potència del cremador (kW)
 PCI_{gas}: Poder calorífic inferior del gas (kJ/m³)

Els cremadors de biogàs es solen dimensionar per cabals de gas de 200-400l/h [5].



5.4.2.2. Arrossegament d'aire primari

El cabal d'aire primari aspirat és un paràmetre molt important en el disseny de cremadors atmosfèrics perquè té una gran influència en l'estabilitat de la flama i la seva temperatura, i influeix en el disseny dels orificis de sortida del cremador.

Aplicant les equacions de continuïtat i de conservació de quantitat de moviment, amb una sèrie de simplificacions¹ que es compleixen excepte per a cabals molt baixos de gas, s'arriba a les següents expressions d'utilitat pràctica ([35], pàg. 36-40):

$$\frac{A_j}{A_t} = \frac{\sigma}{(\sigma + R)(1 + R)(1 + C_L)} \quad (5-3)$$

$$\frac{A_t}{A_p} = C_{dp} \cdot \sqrt{(1 + C_L)} \quad (5-4)$$

$$\frac{A_j}{A_p} = \frac{\sigma \cdot C_{dp}}{(\sigma + R)(1 + R)\sqrt{1 + C_L}} \quad (5-5)$$

On:

- R: Rati aire primari/gas (m³ aire/m³ gas)
- A: Àrea (m²)
- σ : Densitat relativa gas (-)
- C_L : Coeficient de pèrdues de càrrega en el difusor (-)
- C_{dp} : Coeficient de descàrrega en els orificis de sortida (-)

Els subíndexs j, t, i p corresponen a l'injector (jet), el coll del difusor (throat) i els orificis de sortida (ports).

També es pot expressar el rati d'aire primari/gas en funció de les àrees de l'injector i dels orificis de sortida:

$$R = \sqrt{\sigma} \cdot \left(\sqrt{\frac{A_p}{A_j} - 1} \right) \quad (5-6)$$

¹ Flux turbulent, no contribució de l'aire primari a la quantitat de moviment en direcció axial, fluid incompressible, distribució uniforme de la pressió en els orificis de sortida,



L'equació anterior és vàlida excepte per a cabals baixos, on els coeficients de pèrdues de càrrega i de descàrrega, aquí simplificats, no son negligibles. Es pot observar com el rati d'aeració primària és independent de la pressió del gas abans de l'injector i per tant independent del cabal del raig ejectat. És només la geometria de l'injector i dels orificis de sortida la que determina l'aeració primària.

La relació d'àrea dels orificis de sortida respecte l'àrea de l'injector està entre 275:1 i 325:1 per a cremador de biogàs [20].

5.4.2.3. Difusor

La forma del difusor també influeix en l'eficiència del cremador. L'arrossegament d'aire primari es funció del coeficient de pèrdues C_L i aquest depèn de la longitud del difusor, el diàmetre del coll del difusor i l'angle de divergència. A la Figura 5.4 es pot observar la dependència entre la longitud del tub difusor i l'aeració primària. Els valors recomanats per House [20] o Jones [35] són una longitud de tub difusor de 10-12 vegades el seu diàmetre i una distància entre l'injector i el coll del difusor de 2-2,5 vegades el diàmetre del difusor. En aquestes condicions, el valor de C_L està al voltant de 0,25-0,35. En cas que el tub de mescla no sigui divergent, sinó recte, es pot substituir el factor $(1+C_L)$ de les equacions 5-3, 5-4 i 5-5 per $(2+C_L)$ [35].

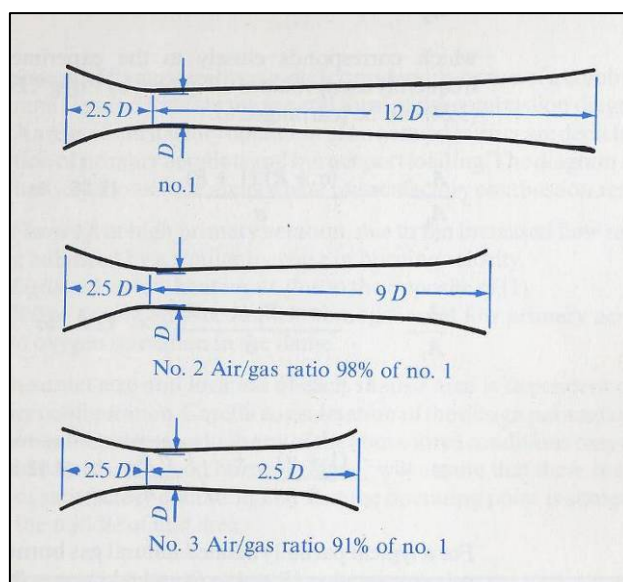


Figura 5.4 – Variació de l'aeració primària amb la longitud del tub de mescla [35]



5.4.2.4. Cambra i orificis de sortida

Amb l'àrea de sortida definida per les equacions 5-4 i 5-5 s'ha de dissenyar el dimensionament dels orificis de sortida, la seva distribució i la seva geometria. En aquest camp el criteri de l'enginyer pren una gran importància perquè no existeixen uns estàndards de disseny per a aquests aspectes. L'objectiu és aconseguir la màxima estabilitat de la flama.

Dimensionament

Per al dimensionament dels orificis cal tenir en compte la velocitat de propagació de la flama. En el cas del biogàs, prenent el valor de 25cm/s (Taula 5.3), cal que la velocitat de sortida de la mescla pels orificis sigui semblant a aquest valor. Si la velocitat del gas es superior es pot produir un despreniment de la flama, i si és inferior pot produir-se un retrocés de la flama.

Geometria

Jones [35] indica que una forma rectangular afavoreix un combustió més completa, que no pas uns orificis circulars. La raó esgrimida és que la flama que s'origina d'un orifici rectangular té una relació superfície/volum més elevada que no pas la flama cilíndrica que es forma d'un orifici circular. D'aquesta manera s'afavoreix la difusió de l'aire secundari en el volum de la flama i s'aconsegueix reduir el percentatge de combustible no reaccionat.

Distribució

La distribució ideal sembla ser la col·locació dels orificis al perímetre del cremador, a la part lateral. D'aquesta manera el raig de mescla surt de manera radial, adquirint tot seguit una direcció vertical. La sortida del raig en direcció axial (és a dir, a la part superior del cremador) dificultaria la circulació d'aire secundari cap a la part central del cremador, disminuint el grau de combustió de la mescla ([35], pàg. 141). Una altra solució és una geometria anul·lar del cap del cremador, amb els orificis distribuïts tant en el perímetre exterior com en l'interior. El forat central del cremador permet la circulació d'aire secundari als orificis interiors (Figura 5.5).



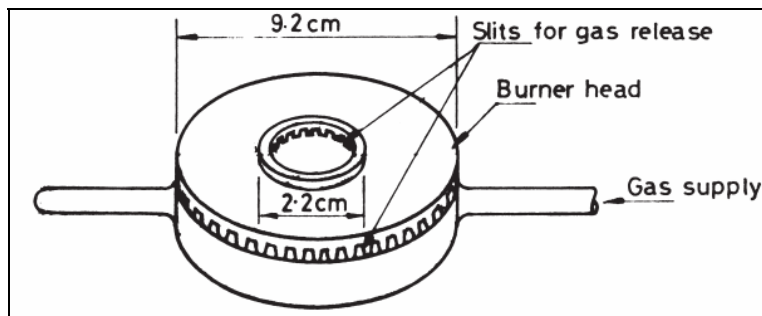


Figura 5.5 – Cremador anular amb orificis perimetrals exteriors i interiors [38]

Una altre aspecte important és la distància entre els orificis. Una distància molt elevada disminueix les interaccions entre flames, que afavoreixen l'estabilitat. Així, una distància de referència es consideren 6mm entre les vores dels orificis [35].

5.4.3. Problemes d'estabilitat de la flama

L'estabilitat de la flama és determinant en l'eficiència del cremador, ja que una flama estable garanteix una elevada transmissió de calor per convecció. Cal tenir en compte que una flama estacionària es manté en un equilibri dinàmic entre el flux de gasos no cremats i la propagació de la flama.

Alguns problemes habituals d'estabilitat de la flama són:

Despreniment de la flama

Es dona quan la velocitat de sortida del gas és molt més elevada que la velocitat de propagació de la flama. Aquest problema es pot disminuir reduint el cabal de gas, augmentant la mida dels orificis de sortida o reduint la distància entre aquests orificis.

Retrocés de la flama

És el fenomen oposat a l'anterior, on al velocitat de propagació de la flama supera la velocitat de sortida del gas. Es sol evitar augmentat el cabal de gas de sortida, per augmentar-ne la velocitat.



5.4.4. Adaptació de cremadors convencionals per a l'ús amb biogàs

Les cuines convencionals dissenyades per funcionar amb gas natural o butà es poden adaptar per ser usades amb biogàs com a combustible. A tal efecte la única modificació que cal fer és augmentar el diàmetre de l'injector (Figura 5.6) Això es deu al menor poder calorífic del biogàs que cal compensar amb un major cabal (Taula 5.4). El biogàs també requereix menys aire estequiomètric (Taula 5.2) de manera que és necessària una disminució del rati d'arrossegament d'aire primari que també s'obté amb l'augment del diàmetre (Figura 5.7).

Combustible	Poder Calorífic Superior (kJ/m ³)
Metà	37.710
Propà	93.940
Butà	121.800
GLP ²	105.080
Biogàs (60% CH ₄)	22.630

Taula 5.4 – Poder Calorífic Superior d'alguns combustibles convencionals (15°C, 1 atm) [35]

5.5. Calefactors

La calor que desprèn la combustió pot ser aprofitada d'altres maneres, a part de per a cuinar. Una de molta utilitat en una granja es proporcionar escalfor als animals acabats de néixer. A tal efecte existeixen dos tipus principals de calefactors, classificats segons el mecanisme principal de transmissió de calor:

- *Convectius*: els gasos calents de la combustió passen a través d'un bescanviador de calor i escalfen aire introduït per convecció natural o forçada que és retornat a major temperatura a l'ambient.
- *Radiants*: la flama de la combustió escalfa un material ceràmic, que en arribar a la

² El GLP comercialitzat al Perú té una composició de 60% propà i 40% butà.



incandescència emet calor per radiació. L'escalfor també es reparteix per convecció de l'aire escalfat tant per la flama com pel propi material ceràmic, però en una proporció molt menor.



Figura 5.6 – Injectador d'una cuina GLP



Figura 5.7 – Injectador i orificis d'entrada d'aire primari

Mentre els calefactors convectius solen funcionar amb cremadors parcialment airejats, els cremadors radiants poden funcionar amb aquest mateix tipus de cremadors, on la flama impacta directament sobre la ceràmica, o bé amb cremadors totalment airejats. En aquest segon cas la mateixa ceràmica forma part del cremador al tenir un conjunt de petits orificis per on surt la mescla estequiomètrica d'aire i gas. Així la flama està totalment en contacte amb la ceràmica, assolint-se un major escalfament del material radiant.

5.5.1. Experiències de calefactors usats amb biogàs

En la literatura es pot trobar alguna referència a calefactors per a animals operats amb biogàs. Alguns adapten calefactor radiants comercials operats amb GLP per a funcionar amb biogàs, fent la mateixa modificació que en el cas dels cremadors, augmentant el diàmetre de l'injector [39]. La modificació es complica una mica més en aquests casos degut a que aquests equips solen necessitar una pressió del gas una mica més elevada, que la que proporcionen la majoria de sistemes rurals de producció de biogàs. De totes maneres, la conversió és factible. Altres referències es decanten per la construcció artesanal d'un calefactor, que consisteix en l'escalfament d'un material radiant per impacte de la flama de la combustió [40]. En aquest cas, la flama és no airejada, ja que el cremador consisteix en un tub d'acer galvanitzat de ½", perdent així força eficiència (Figura 5.8). D'aquesta manera prioritzen el baix cost del dispositiu a l'optimització de la seva eficiència.





Figura 5.8 – Calefactores artesanals operats amb biogàs [40]

Calefactores amb biogàs al Parque Porcino

Els grangers de Ventanilla es van mostrar des de bon principi molt entusiasmats amb la idea de poder tenir calefacció per als seus garrins, cosa que no han tingut mai. Fins a tal punt hi estan interessats que han manifestat en diverses ocasions que preferirien destinar el biogàs generat a la calefacció dels seus animals que no pas a la cocció dels seus propis aliments. Per això es va decidir iniciar una investigació per avaluar la possibilitat d'instal·lar un sistema de calefacció a les granges, encara que fos només en un o dos corrals (de fet, els corrals on hi hagués els garrins més petits. A partir d'una certa edat no es necessària una aportació extra d'escalfor). Malauradament aquesta investigació es va iniciar molt tard, i l'autor d'aquest PFC no va tenir temps de dur-la a terme. Del que es va poder encarregar abans de marxar va ser d'aconseguir un equip calefactor radiant operat amb GLP de fabricació peruana (Figura 5.9), i per tant a un preu molt raonable, i de dur a terme la modificació del seu injector i aconseguir que el calefactor operés efectivament amb el biogàs generat a la granja d'*Alejandro* (Figura 5.10).





Figura 5.9 – Calefactor radiant amb vàlvula de regulació i injector a sota



Figura 5.10 - Calefactor radiant operant amb biogàs al *Parque Porcino*

Actualment l'equip del Projecte de Ventanilla està iniciant els experiments amb els calefactores per a determinar quins diàmetres d'injector són els òptims, en quin rang de pressions pot treballar el calefactor i sobre tot quin consum de biogàs té aquest equip.

En el moment de la redacció d'aquesta Memòria no es disposa de cap dada respecte a aquestes proves.

5.6. Experiments

Des del moment de la activació dels biodigestors el biogàs que s'està generant és usat pels grangers per a la cocció dels seus aliments. A falta de dades quantitatives de producció de biogàs diària per a cada biodigestor, el que sí es sap és que tenen prou biogàs cada dia per a dur a terme la preparació dels seus àpats. Han abandonat per complet l'ús del combustible que utilitzaven anteriorment. *Jorge* i *Alejandro* cuinaven amb uns cremadors comercials de GLP, mentre que *Sixto* preparava els seus àpats amb llenya, però tenia un cremador de querosè que no feia servir. Aquesta disponibilitat dels cremadors va fer decidir-se a l'equip del Projecte per adaptar-los a biogàs, en comptes de dissenyar un nou cremador específic per a biogàs que hagués estat considerablement més car. A més aquest cremador hagués tingut un aspecte més rudimentari i hagués contrastat amb la sensació de modernitat i d'avenç tecnològic que suposa per a ells la instal·lació del biodigestor. El sentiment que disposen d'una tecnologia avançada i la reputació que això els proporciona és un factor molt important a nivell social i cultural.



Així es van programar una sèrie d'experiments amb la cuina de GLP d'*Alejandro*, la de *Jorge* i la cuina de querosè de *Sixto*. L'objectiu va ser determinar el diàmetre de l'injector que proporcionés una major eficiència. També es van comparar els resultats dels 3 tipus diferents de cuines (2 models de cuina de GLP i un model de cuina de querosè) per tal de determinar quina mostrava un millor comportament modificada per a biogàs.

5.6.1. Metodologia

Els experiments van seguir les pautes del *Water Boiling Test* [41], on es du a ebullició un volum mesurat d'aigua anotant el temps i la quantitat de combustible necessaris. Aquest mètode és molt habitual per a l'avaluació de cuines millorades alimentades amb llenya. En el nostre cas la mesura del combustible utilitzat va consistir en la mesura del cabal de gas.

5.6.1.1. Procediment

1. Es col·loca l'injector amb el diàmetre a investigar. Es fan tres mesures de cabal (veure apartat 5.6.1.3). Es munta correctament la cuina.
2. S'introdueixen 1,5 kg d'aigua en l'olla. Es mesura exactament la quantitat d'aigua introduïda (Figura 5.11).
3. S'anota la temperatura exterior i de l'aigua.
4. Es col·loca la tapa amb el termòmetre (Figura 5.12).
5. Inici de l'escalfament. S'anota el temps d'inici i cada 3 min la temperatura de l'aigua i la pressió del dipòsit.
6. Ebullició de l'aigua. Anotació del temps final, temperatura final i pressió final.





Figura 5.11 – Pes de l'aigua introduïda



Figura 5.12 – Termòmetre

5.6.1.2. Paràmetres avaluats

Temps d'ebullició

Aquest temps és mesura des del moment en que es col·loca l'olla sobre el foc fins el moment en que bull l'aigua.

El temps que triga una cuina en bullir un volum determinat d'aigua és un paràmetre important, ja que tot i no ser un índex directe d'eficiència, és al cap i a la fi el paràmetre que més percep l'usuari final. Un cremador amb una eficiència del 60% no serveix de res si triga 40min en bullir 1L d'aigua. A la Taula 5.5 es troben alguns valors aproximats de cocció.

Consum

El consum de cada cremador es determinava fent una mitjana aritmètica de les mesures de cabal realitzades.

El consum d'un cremador és un paràmetre molt important perquè determina el temps total que es podrà usar la cuina cada dia en funció de la producció de biogàs. Cal evitar els cremadors amb consums excessius. La Taula 5.5 presenta alguns consums segons l'aliment cuinat.



Cocció	Consum	Temps
1L aigua	30-40L	8-12 min
5L aigua	110-140 L	30-40 min
3L brou	~60 L/h	-
½ kg arròs	120-140 L	~40 min
½ kg llegums	160-190 L	~60 min
Consum de gas per persona i àpat	150-300 L/d	
Consum de gas per família de 5 membres (2àpats)	1500-2400 L/d	

Taula 5.5 – Consum de gas i temps d'ebullició de diferents aliments [2]

Eficiència

L'eficiència en el cas dels cremadors de biogàs s'ha definit de la següent manera:

$$\eta_t = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{emesa}}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{p\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta T}{\dot{V} \cdot t \cdot \rho_{\text{biogàs}} \cdot \text{PCI}_{\text{biogàs}}} \cdot 100 \quad (5-7)$$

On:

η_t :	Eficiència tèrmica del cremador (%)
$m_{\text{H}_2\text{O}}$:	Massa d'aigua (kg)
$C_{p\text{H}_2\text{O}}$:	Calor específic de l'aigua (kJ/kg/K)
ΔT :	Diferència entre temperatura inicial i final (K)
\dot{V} :	Cabal de biogàs (m ³ /h)
t :	Temps d'ebullició (h)
ρ_{CH_4} :	densitat del biogàs (kg/m ³)
$\text{PCI}_{\text{biogàs}}$:	Poder Calorífic Inferior del biogàs (kJ/kg)

Val a dir que es podria incloure en el numerador un terme addicional que correspongués a l'energia absorbida per l'aigua evaporada. Aquest terme seria la massa d'aigua evaporada multiplicada pel seu calor d'evaporació. S'ha decidit no incloure'l perquè la quantitat d'aigua evaporada era molt petita i la balança utilitzada era molt poc precisa, de manera que l'error que es podia cometre era molt gran.

Potència

La potència de cada cremador s'extreu directament de l'equació (5-2).



5.6.1.3. Mesura de cabal

Una determinació clau en l'èxit d'aquests experiments és la del cabal de biogàs. No només dóna directament el consum del cremador, que és un paràmetre molt important, sinó que és vital per al càlcul tant de la potència del cremador com de la seva eficiència.

Per efectuar aquesta mesura es van contemplar diverses opcions:

Compra d'un rotàmetre comercial

Aquesta opció es va descartar degut al cost excessiu del dispositiu, als terminis d'entrega, car aquest equip no es sol fabricar al Perú i trigaven més de 5 setmanes en aconseguir-lo, i a la pèrdua de càrrega que aquest tipus de dispositius provoca en el fluid, més tenint en compte la baixa pressió a la que ja opera el sistema de biogàs.

Construcció d'un cabalímetre casolà

Es va considerar la construcció d'un cabalímetre casolà, de pressió diferencial, tipus placa d'orifici o Venturi, manufacturat en PVC o PE en algun taller de Lima. Es va contactar amb un enginyer de la Universidad Nacional de Ingeniería, que es va mostrar disposat a prestar els seus equips per dur a terme el calibratge del cabalímetre casolà. Aquesta solució també es va descartar perquè la construcció acurada del cabalímetre hagués estat molt cara, i la seva construcció de baix cost no hagués estat suficientment acurada. A més amb sistemes de tan baixa pressió la diferència de pressió que mesuren aquests dispositius és molt petita, de manera que l'error comès en la lectura hagués estat molt gran.

Mesura directe per desplaçament d'aigua

L'última solució considerada va ser la mesura artesanal del cabal. La idea era omplir una bossa de PE durant un temps determinat i posteriorment mesurar el volum d'aquesta bossa introduint-la en un cubell ple d'aigua i mesurant el volum d'aigua desplaçada. Així es pot obtenir un cabal volumètric. L'inconvenient d'aquest mètode és que no es podia fer simultàniament a l'experiment, sinó que calia fer prèviament una o diverses mesures de cabal i posteriorment dur a terme l'experiment.

Tot i la poca precisió de l'últim mètode, aquesta va ser la solució adoptada, car les altres dues comportaven uns costos i uns terminis de temps, que el Projecte no podia assumir.



La inexactitud de les mesures es va provar de disminuir repetint diversos cops cada mesura (Figura 5.14).

Cal indicar que la bossa es connectava a la sortida de l'injector i no pas a la sortida del cremador (Figura 5.13), és a dir que el cabal mesurat era 100% biogàs. Es va provar també de fer mesures de cabal a la sortida del difusor, per tenir un valor de l'aire primari que arrossegava cada injector, però va ser impossible, ja que la mescla d'aire i biogàs no entrava a la bossa, sinó que s'escapava pels orificis d'entrada d'aire primari.



Figura 5.13 – Mesura de cabal. Bossa connectada a la sortida de l'injector.



Figura 5.14 – Mesura de cabal. Desplaçament d'aigua amb la bossa plena de gas.

5.6.2. Cremadors

Es van dur a terme experiments amb tres tipus diferents de cuines: dues cuines de GLP i una de querosè.

Alejandro

La cuina d'*Alejandro* funcionava amb GLP. Era una cuina amb dos cremadors. El cap de cada cremador tenia una filera d'orificis circulars al lateral (Figures 1.15 i 1.16) de manera que la flama no sortia cap a dalt, sinó cap al costat, per tot el perímetre del cremador. Les seves dimensions es poden veure a la Figura 5.15.



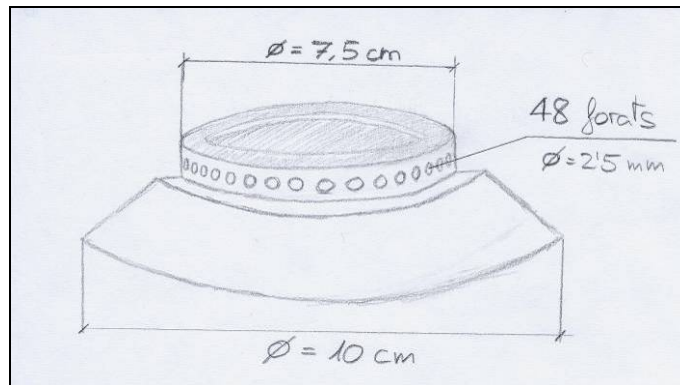


Figura 5.15 – Dimensions del cremador *Alejandro*



Figura 5.16 – Cremador *Alejandro*



Figura 5.17 – Flama del cremador *Alejandro*



Figura 5.18 – Vista de l'injector i l'entrada d'aire primari al cremador *Alejandro*



Algunes característiques del cremador *Alejandro* es troben a la Taula 5.6.

Diàmetre del cap del cremador	7,5 cm
Diàmetre orifici	2,5 mm
Nº orificis	48
Disposició dels orificis	Una filera al lateral

Taula 5.6 – Característiques del cremador *Alejandro*

Jorge

La cuina de *Jorge* també funcionava amb GLP i tenia dos cremadors. El disseny de la sortida era diferent, ja que els orificis eren quadrats i no estaven practicats al cremador, sinó que era la placa superior que tenia com dents al seu perímetre i al recolzar-se sobre la base del cremador, formaven els orificis de sortida (Figura 5.19 i 5.20)

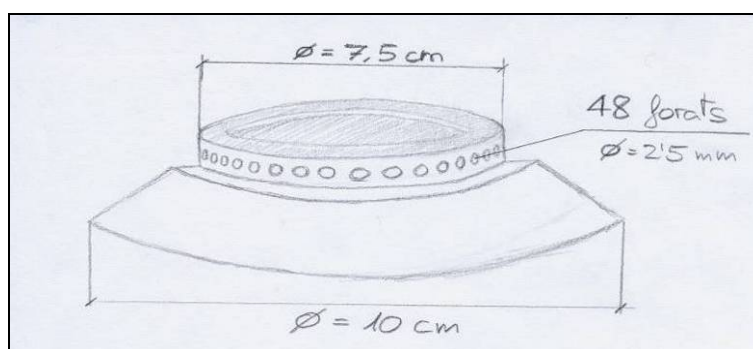


Figura 5.19 – Dimensions del cremador *Jorge*



Figura 5.20 – Flama al cremador *Jorge*



Figura 5.21 – Entrada d'aire primari del cremador *Jorge*



Algunes característiques del cremador *Jorge*:

Diàmetre del cap del cremador	6,5 cm
Àrea orifici	5,5 mm ²
Nº orificis	30
Disposició dels orificis	Una filera al lateral

Taula 5.7 – Característiques del cremador *Jorge*

Sixto

La cuina de *Sixto* és diferent de les anterior, ja que funciona amb querosè. Tot i això *Sixto* ja fa temps que no fa servir aquesta cuina i prepara els seus àpats amb llenya. La geometria del cremador és força diferent, ja que consisteix en 16 sèries disposades de manera radial, amb 5 ranures cadascuna, la més curta d'elles, la més interna, d'uns 4x1mm, i la més externa de 8x1mm (

Figura 5.22). La part central del cremador no presenta cap orifici. Una diferència considerable respecte els altres cremadors, és que els orificis de sortida (les ranures) es troben en la part superior del cap del cremador, i no en els laterals.

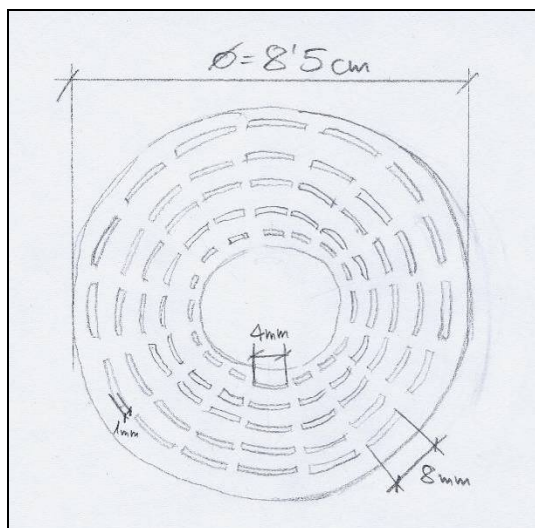


Figura 5.22 – Dimensions del cremador *Sixto*



Figura 5.23 – Flama al cremador *Sixto*



Diàmetre del cap del cremador	8,5 cm
Nº orificis	80
Àrea total orificis	480 mm ²
Disposició dels orificis	Ranures d'1mm d'ample a la part superior

Taula 5.8 – Característiques del cremador *Sixto*

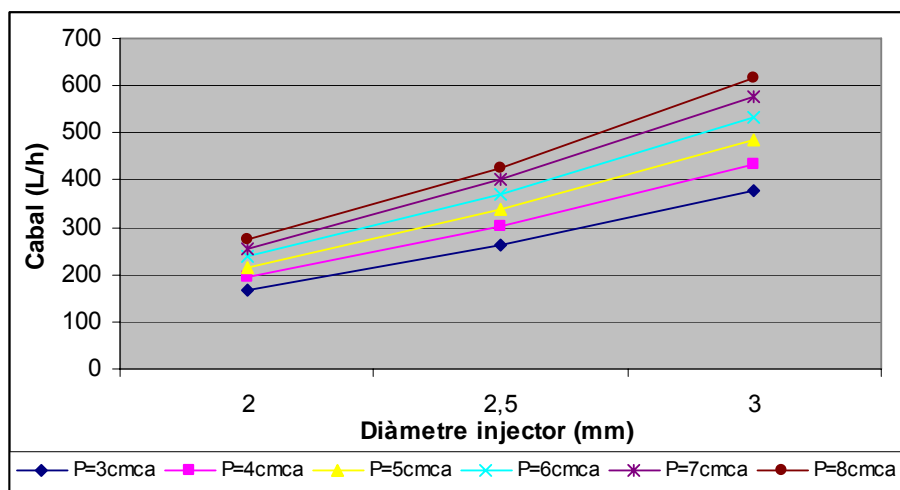
5.6.3. Resultats i discussió

A continuació es presenta un càlcul teòric dels consum esperats en els cremadors i tot seguit, de manera resumida, els resultats obtinguts en els experiments realitzats amb els cremadors de *Alejandro*, *Jorge* i *Sixto*. Els resultats detallats de cada experiment es poden trobar a l'Annex D, presentat en el suport informàtic d'aquesta memòria.

Comparació teòrica

Segons l'equació (5-1) el cabal d'un gas a través d'un injector només és funció de la pressió del gas i de l'àrea de l'injector. El **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** representa gràficament el resultat d'aquesta fórmula per a una sèrie de pressions i per a tres diàmetre d'injector: 2mm, 2'5mm i 3mm. Aquests són els diàmetres que s'han utilitzat en els experiments. Com el consum, en el cas del diàmetre de 2mm, oscil·la entre 150 i 290 L/h. Amb un diàmetre més gran (3mm), el rang de cabals s'amplia i augmenta la magnitud, situant-se entre 370 i 600 L/h. Aquest gràfic serveix com a referència per a una posterior comparació amb els resultats experimentals obtinguts.





Gràfic 5.1 – Cabal en funció del diàmetre de l'injector per a diferents pressions

5.6.3.1. Alejandro

A la cuina d'Alejandro es van provar 3 diàmetre diferents de injector: 2'0, 2'5 i 3'0 mm (Figura 5.24).

Els paràmetres determinats van ser eficiència, consum, potència i temps a ebullició. S'han exposat més detalladament a l'apartat 5.6.1.2.

	Diàmetre injector (mm)		
	2,0	2,5	3,0
Eficiència (%)	35,2	39,4	39,2
Consum (l/h)	209,10	209,18	190,00
Potència (kW)	1,36	1,36	1,24
Temps a ebullició	17 min	15min 30 s	16min 40s

Taula 5.9 – Resultats amb el cremador Alejandro



Figura 5.24 – Els tres injectors: d=2mm, d=2,5mm i d=3mm



5.6.3.2. *Jorge*

A la cuina de *Jorge* es van provar els mateixos 3 diàmetres de injector: 2'0, 2'5 i 3'0 mm.

Els paràmetres determinats també van ser eficiència, consum, potència i temps a ebullició.

	Diàmetres injector (mm)		
	2,0	2,5	3,0
Eficiència (%)	39,0	41,3	35,7
Consum (l/h)	221,57	214,77	261,44
Potència (kW)	1,44	1,40	1,70
Temps a ebullició	14min 30s	13min 40s	13min 15s

Taula 5.10 - Resultats amb el cremador *Jorge*

5.6.3.3. *Sixto*

En el cas de *Sixto* no es van provar diversos diàmetres de injector, perquè l'injector (tota la peça, no l'orifici) era d'uns 3mm de diàmetre, i ampliar l'orifici hagués fet malbé la rosca. Així es va decidir retirar l'injector, de manera que quedava un orifici de 2,5mm que es va considerar adequat per al seu ús amb biogàs. L'interès en aquest experiment era comparar la geometria d'aquest cremador de querosè amb els altres dos de GLP.

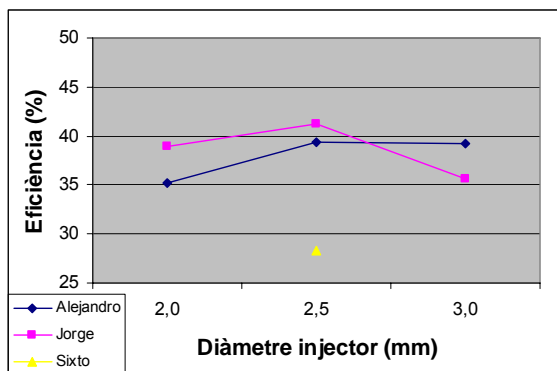
Diàmetre injector (mm)	2,5
Eficiència (%)	28,32
Consum (l/h)	229,71
Potència (kW)	1,50
Temps a ebullició (min)	18min 25s

Taula 5.11 – Resultats amb el cremador *Sixto*

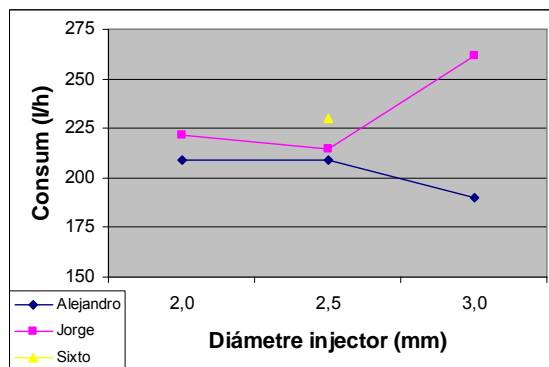
5.6.3.4. Comparativa dels cremadors

A banda de l'elecció del diàmetre més adequat, un dels objectius dels experiments era determinar quina cuina mostrava un millor funcionament un cop adaptada per a l'ús amb biogàs. Els gràfics següents permeten avaluar ambdós aspectes:

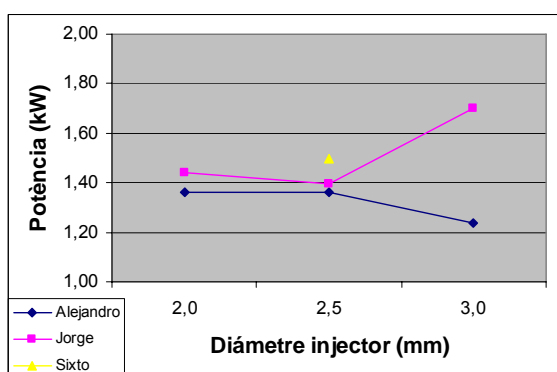




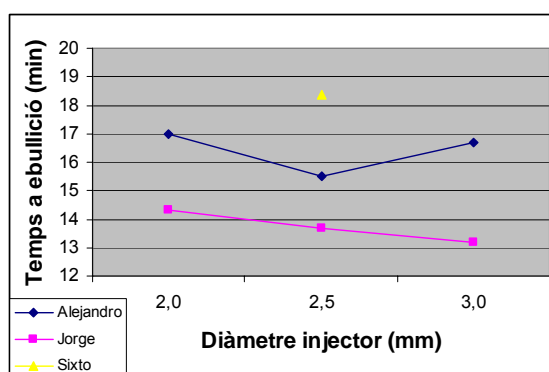
Gràfic 5.2 – Eficiència dels cremadors



Gràfic 5.3 – Consum dels cremadors



Gràfic 5.4 – Potència dels cremadors



Gràfic 5.5 – Temps a ebullició

Eficiència

Analitzant l'eficiència dels cremadors es pot veure una tendència a augmentar segons s'incrementa el diàmetre de l'injector (i per tant el cabal de biogàs) fins a arribar a un màxim, amb una posterior disminució. Aquest fet concorda amb el resultat d'altres estudis [38] [42] [43].

Consum

Els resultats obtinguts en aquest aspecte no són gens coherents, ja que el consum ha d'augmentar en fer-ho el diàmetre d'injector. En el cas d'*Alejandro* succeeix tot el contrari, i en el cremador de *Jorge*, tot i l'increment amb $d=3\text{mm}$ no s'observa un increment entre $d=2\text{mm}$ i $d=2,5\text{mm}$.

Comparant el Gràfic 5.3 amb el Gràfic 5.1, s'observa que els resultats experimentals no coincideixen amb els teòrics. A banda de no conèixer la pressió a la que es van realitzar els experiments, degut a la variabilitat dels valors de pressió llegits en el manòmetre



durant la realització de les proves, és destacable que només en el cas del diàmetre de 2mm d'injector els resultats obtinguts (200-225 L/h) es troben dintre del rang de cabals teòrics (180-300L/h). Amb els altres dos diàmetres els resultats experimentals són considerablement inferiors als teòrics. Això pot respondre a diversos factors. El més clar és l'error comés en la mesura del cabal. D'altra banda, les pèrdues de càrrega que no s'han tingut en compte en el càlcul teòric i els problemes per a aconseguir mantenir una pressió constant durant els experiments, poden ser altres causes de la notable diferència que s'hi troba.

Potència

La potència respon a la mateixa pauta que el consum, ja que en depèn directament (equació 5-2). Per tant els resultats obtinguts tampoc concorden amb els esperats.

Temps a ebullició

En aquest apartat sí es pot apreciar una lleugera tendència a disminuir el temps d'ebullició com més gran és el diàmetre de l'injector, ja que s'augmenta la potència del cremador. En el cas de *Jorge* això s'observa clarament, no tant en el cas d'*Alejandro*. Es pot relacionar aquest major temps d'ebullició per a $d=3\text{mm}$ amb el menor consum mesurat per a aquest diàmetre.

Tipus de cremador

Observant els gràfics anteriors es pot observar com el cremador que millor rendiment dona és el de *Jorge*, ja que no només obté els temps a ebullició més baixos, sinó que ho fa amb una eficiència superior al cremador d'*Alejandro* i un consum no molt superior (excepte en el cas $d=3\text{mm}$ on el consum es dispara però disminueix també l'eficiència).

Es pot observar també com el cremador tipus *Sixto* no és tant indicat com els altres per al seu ús amb biogàs (menor eficiència, major temps a ebullició, major consum).

Diàmetre d'injector

En tots els casos la màxima eficiència s'obté amb el diàmetre 2,5mm (41% en el cas de *Jorge*) aconseguint-se uns temps d'ebullició menors que amb un diàmetre més petit. Amb $d=3\text{mm}$ en el cas de *Jorge* s'obté un temps encara menor, però a costa d'un molt més elevat consum.



5.6.4. Conclusions

Els millors rendiments i temps s'obtenen amb el model *Jorge* i amb un diàmetre d'injector de 2,5mm.

Respecte l'eficiència dels cremadors, aquest treball s'ha centrat en els aspectes de disseny que afecten a la combustió però no s'ha tingut en compte la transmissió de calor que també és un factor de gran importància. L'alçada a la que es col·loca l'olla respecte el cremador pot tenir un efecte molt important en quant al rendiment tèrmic del cremador [44]. El material de l'olla, un aïllament tèrmicament adequat del cremador i de la zona de combustió són altres factors que influeixen decisivament en l'eficiència global del procés de cocció.

Les anomalies observades en els resultats experimentals respecte al que seria d'esperar responen fonamentalment a dos factors: la inexactitud de la mesura del cabal i la variació de la pressió del biogàs al llarg dels experiments.

La mesura de cabal, com s'ha explicat anteriorment, no es feia simultàniament a l'experiment sinó que s'havia de fer abans i després del mateix, i posteriorment fer una mitjana aritmètica. La inexactitud del mètode també influeix en l'error del càlcul.

La pressió del biogàs es va provar de controlar amb el manòmetre, però va resultar impossible mantenir una pressió constant durant la realització dels experiments. Es va intentar mantenir una estabilitat en la pressió afegint pesos sobre la xarxa que comprimeix el dipòsit (veure capítol 4) però tot i així la pressió disminuïa. L'hora del dia en que es realitzava l'experiment també era un factor determinant sobre la pressió. No era el mateix realitzar el primer experiment del dia amb el dipòsit ple de biogàs i a la màxima pressió que dur-lo a terme a les 14h, després d'haver-ne realitzat 4 o 5, on la pressió era considerablement menor. Es va intentar minimitzar aquest efecte repartint els experiments de tal manera que una mateixa configuració s'estudiés diferents dies a diferents hores.

L'anàlisi visual de la flama va revelar en alguns experiments una alçada de la flama molt gran. Amb una observació més detinguda es va comprovar que la flama que s'elevava d'aquesta manera no era el con primari, on té lloc la combustió del combustible amb l'aire



primari, sinó que era una flama de tipus difusiu, la reacció entre el biogàs no cremat i l'aire secundari. Això revela que el rati d'aire primari/biogàs era molt pobre i d'aquesta manera hi havia molt biogàs no cremat. Com no era possible canviar el disseny de les cuines (longitud de tub de mescla, àrea sortida dels orificis), no es va poder influir en aquest fet, ja que aquest comportament no responia únicament al diàmetre de l'injector doncs es va poder observar per a tots els diàmetres. A la Figura 5.25a es pot observar la flama del cremador *Jorge* amb biogàs. A la base es veuen els conus de blau intens que corresponen a la combustió de biogàs amb aire primari. Per sobre es veu una gran flama de color més vermellós que és la flama difusiva amb l'aire secundari. A efecte comparatiu es presenta a la Figura 5.25b el mateix cremador *Jorge* funcionant amb GLP. S'observa un conus primari d'un blau més intens i una flama difusiva molt més petita que en el cas anterior.

Per últim cal comentar que els consums i eficiències obtinguts en els experiments entren en la forquilla de valors que es troben en la literatura, però per la part baixa de la forquilla (Taula 5.12). De fet, els rangs de valors que es troben en la literatura són molt amplis i per tant, poc concloents.



(a)



(b)

Figura 5.25 – (a) Cremador *Jorge* amb biogàs. (b) Cremador *Jorge* amb GLP



Referència	Eficiència (%)	Consum (L/h)
Biogas Digest II	55	200-450
ITINTEC	-	250-380
Improved biogas Plants	55	200-500
Biogas Husbandry	60-80	200-500
<i>Jorge</i>	41	215

Taula 5.12 – Eficiències i consums habituals de cremadors de biogàs



6. Avaluació econòmica

Un estudi de viabilitat econòmica del projecte és imprescindible per determinar les oportunitats d'expansió del model de granja que s'ha dissenyat i implantat durant aquests mesos al *Parque Porcino de Ventanilla*. A dia d'avui aquest anàlisi no s'ha realitzat, ja que manquen dades i recursos per dur-lo a terme de manera acurada. L'equip del Projecte de Ciudad Saludable compta amb un economista que està duent a terme aquesta tasca. A nivell qualitatiu es comentaran els aspectes fonamentals d'aquesta avaluació:

Beneficis econòmics

Un aspecte vital per a la viabilitat econòmica del projecte és la realització d'un estudi de mercat de la comercialització del biol. Existeix una experiència propera de la granja ecològica *Casa Blanca* a les afores de Lima, que comercialitza el biol que produeix el seu biodigestor al preu de S./ 1,00 per litre. La granja de *La Calera*, a Chincha, amb una població d'uns 3 milions d'aus, també comercialitza l'excedent de biol produït en els seus dos biodigestors de 750 i 1.500 m³. Assumint el preu de venda de l'experiència de *Casa Blanca*, l'ingrés mensual que això comportaria per als grangers seria de uns S./ 2.400 (\$800), que es tracta d'una quantitat molt elevada. Òbviament aquesta venda també comportaria uns costos, d'emmagatzematge i possiblement de transport, o una reducció del preu en cas que passessin a recollir el biol a la granja. També cal tenir en compte que la proliferació dels sistemes de biodigestió dins el *Parque* i l'augment de la producció del biol, podria comportar un descens del seu preu. De totes maneres, és un factor de màxim interès.

L'altre punt clau per augmentar els beneficis econòmics dels grangers és la millora de les condicions higièniques de la granja. Això afavoreix una reducció de la taxa de mortalitat dels garrins, de manera que disposen de més animals per a la venda.

Des de Ciudad Saludable s'està promovent la creació d'una Certificació de Qualitat, que s'atorgaria a les granges que complissin certs criteris a nivell de sanitat i alimentació dels animals. Això podria afavorir l'augment del preu de la carn dels porcs certificats. De totes maneres, les dificultats per a l'expedició d'aquest certificat són importants, car implica la participació de les Autoritats Locals, cosa que sempre resulta lenta i complicada.



Estalvi de despeses

El biogàs produït substitueix el combustible anteriorment usat. En el cas de *Jorge* i *Alejandro*, aquest combustible era el GLP. Aquest té un cost aproximat de S./ 30 per una bombona de 10 kg, que consumeixen aproximadament en un mes. Així, amb el consum del biogàs que generen ells mateixos, obtenen un estalvi anual de uns S./ 360 (\$120).

Costos de la implantació de les granges pilot

Els elements implantats en les dues granges pilot amb biodigestor tubular de plàstic (*Alejandro* i *Sixto*) presenten aproximadament els costos que es presenten en la Taula 6.1.

Actuació	Import (\$)
Remodelació dels corrals	3000
Biodigestor	250
Aiguamoll artificial	200
Hort ecològic	120

Taula 6.1 – Costos dels elements de les granges pilot

Es pot comprovar com el cost del biodigestor i de l'aiguamoll artificial, tot i ser una quantitat important de diners per als *porcicultores*, no és una xifra impossible. En l'escenari més pessimista, on l'únic impacte positiu econòmicament parlant sigui l'estalvi en la compra del GLP, es podria amortitzar el biodigestor en 3 anys. En l'escenari més optimista, suposant una venda del 50% del biol generat a un preu de S./ 1,00 per litre, suposaria un ingrés de S./1200 mensuals (\$400). Així es comprova la cabdal importància que té un estudi de mercat exhaustiu de les possibilitats de venda del biol, ja que asseguraria la viabilitat econòmica al projecte.

La remodelació dels corrals sí és una actuació que està fora de l'abast de la gran majoria de *porcicultores*. Aquesta infraestructura és difícilment assequible per a ells sense el finançament que proporcionen els Fons Internacionals de Cooperació al Desenvolupament, com és el cas del present Projecte.

Beneficis macroeconòmics

La implantació generalitzada de sistemes de producció de biogàs té altres beneficis



econòmics observables a gran escala. La producció d'energia amb recursos propis pot tenir un impacte a nivell nacional amb una disminució de la demanda d'importació de combustibles d'altres països. En el cas del Perú, el recentment descobert jaciment de gas natural de Camisea, a la selva peruana, ha augmentat l'oferta de combustibles d'origen fòssil. Això no és impediment per al desenvolupament de la tecnologia de biogàs, ja que la demanda energètica que pot cobrir aquest combustible renovable permet destinar el gas natural per a l'exportació, augmentat les divises disponibles per al país.

La disseminació generalitzada de biodigestors, en assolir una massa crítica, pot crear un escenari on sigui possible la creació d'un nou mercat d'accessoris, materials i recanvis dels sistemes de producció de biogàs, creant nous llocs de treball i noves empreses.

Un altre aspecte de millora macroeconòmica és la que es deriva de la millora de les condicions higièniques i sanitàries de les granges. La millor salut dels grangers farà que pateixin menys malalties i facin menys visites als hospitals i ambulatoris, reduint la despesa sanitària de l'Estat. La millor qualitat de la carn produïda també pot tenir un efecte en aquest aspecte.

Tot i la importància de l'aspecte econòmic en qualsevol Projecte, cal destacar que en el cas dels sistemes de biodigestió, el benefici econòmic no és el seu punt més favorable, essent molt més importants els beneficis a nivell ambiental o sanitari.





7. Impacte social del projecte

Els impactes socials del Projecte es poden considerar a diversos nivells. D'una banda a nivell personal, o familiar, en l'impacte que ha tingut l'execució del projecte sobre la família, sobre la vida a la granja. D'altra banda a nivell global de tot el *Parque Porcino*, l'impacte que ha tingut en tota la resta de *porcicultores*.

Família

A falta d'una avaluació més exhaustiva, duent a terme una comparació amb la línia base que es va definir al principi del Projecte, a primera vista es poden observar una sèrie de millores en la qualitat de vida dels *porcicultores*. La higiene i la salut seva i la dels seus animals ha millorat considerablement. D'altra banda, tenen el sentiment d'estar duent a terme una tasca molt important, no només per a ells, sinó per a tot el *Parque*: Estan introduint una tecnologia innovadora, estan contribuint al desenvolupament, a la modernització de les granges, del sector productiu al qual porten dedicant-s'hi tota la vida. És un motiu d'orgull per a ells formar part d'aquest Projecte i es mostren encantats quan un altre *porcicultor* ve a demanar-los si els poden ensenyar el biodigestor.

Parque Porcino

Els *porcicultores* tenen en general uns sentiments de desengany i resignació, que es poden copsar fàcilment a l'establir relació amb ells. La desatenció de les autoritats governamentals, les promeses no complides, la manca d'infraestructures, la inseguretat, fins i tot els enganys d'alguns dirigents de les Associacions del *Parque*, els han deixat aquesta sensació de desencís. El fet que una organització com Ciudad Saludable mostri interès en el desenvolupament de la zona i els ajudi a dur-lo a terme, reforça la seva autoestima, fa renéixer la seva il·lusió i renova les seves energies per a seguir tirant endavant el *Parque*.

A nivell mediàtic el Projecte també ha tingut força ressò, apareixent en alguns diaris i revistes i amb un reportatge de televisió en una cadena a nivell nacional. Alguns retalls de premsa es presenten en l'Annex C.





8. Avaluació de l'impacte ambiental del projecte

La implantació del sistema de biodigestió i dels aiguamolls artificials té un impacte evident sobre el medi ambient del *Parque Porcino*. En aquest capítol s'analitzaran els efectes que té aquesta implantació sobre l'aire, l'aigua i el sòl.

8.1. Aire

La instal·lació dels biodigestors té un efecte sobre l'aire del *Parque Porcino* fonamentalment en dos punts claus: emissió de CO₂ neutre i reducció de la crema d'excrements.

Emissió de CO₂

La substitució d'un combustible fòssil com el GLP, que és el combustible més utilitzat al *Parque Porcino*, per un combustible renovable com el biogàs té un efecte clar respecte a l'emissió de CO₂ a l'atmosfera i el seu corresponent impacte sobre l'efecte hivernacle. El biogàs també emet CO₂, però aquestes emissions són *neutres* en el cicle de carboni, ja que no prové de combustibles fòssils, sinó de la biomassa.

Per tal de fer una aproximació de la reducció anual d'emissions de CO₂ degut a l'abandó del GLP, es pot fer el següent càlcul:

Concepte	Valor	Càlcul
Producció diària de biogàs	1,5 m ³	(1)
Producció anual de biogàs	547,5 m ³	(2) = (1) * 365
Poder Calorífic biogàs	22.630 kJ/m ³	(3)
Demanda anual energia	12.390 MJ	(4) = (3) * (2)
Poder Calorífic GLP	105.080 kJ/m ³	(5)
Consum GLP	117,9 m ³	(6) = (4) / (5)
Emissions de CO₂ / m³ GLP	5,94 kg CO ₂ /m ³ GLP	(7)
Emissions totals GLP	700 kg CO ₂	(8) = (6) * (7)

Taula 8.1 – Càlcul de la reducció d'emissions de CO₂

Així, suposant una producció de 1m³/dia de biogàs, s'aconseguiria una *reducció anual de emissions de 700 kg CO₂*, per cada biodigestor tubular de plàstic instal·lat.



Incineració d'excrements

La pràctica habitual en el *Parque Porcino* per eliminar els residus orgànics de les granges és la incineració. La combustió d'un combustible sòlid sempre comporta més complicacions que un combustible gasós, i la combustió rares vegades sol ésser completa, degut a la mala distribució de l'oxigen. Així es formen una sèrie de compostos molt nocius per a la salut i el medi ambient, com CO, NO_x o dioxines. També la formació de cendres i partícules en suspensió és molt elevada en aquest tipus de combustions (la combustió dels excrements genera unes 17 vegades més partícules en suspensió que la combustió del biogàs [46]).

8.2. Aigua

L'aigua és un factor molt important en el funcionament dels biodigestors, ja que en són uns grans consumidors. En els biodigestors tubulars de plàstic instal·lats són necessaris pràcticament uns 60L cada dia. Aquesta demanda feia impensable la instal·lació d'aquests biodigestors en les àrees del *Parque* que no tinguin disponibilitat d'aigua o que la aconseguixin a un preu molt elevat. Aquest fet era conegut als responsables del Projecte, de manera que es va investigar, en les fases preliminars, la possibilitat de substituir l'aigua pels orins dels porcs. I els resultats van ser satisfactoris. D'aquesta manera, els biodigestors instal·lats operen amb els excrements i els orins dels porcs, sense necessitat addicional d'aigua, ja que hi ha prou quantitat diària d'orins.

Cicle de l'aigua

Abans de l'actuació del Projecte en les granges pilot, l'aigua seguia el cicle que es pot apreciar a la Figura 8.1 Els consums d'aigua de la granja eren l'aigua per als porcs, el reg del petit hort que solen tenir i alguns usos domèstics (netejes, cuina,...). Així, els principals abocaments de les granges eren els orins dels porcs, que en els corrals amb el pis de sorra s'escolaven directament al sòl i les aigües grises dels *porcicultores*.

Amb la implantació dels sistemes exposats, els cursos de l'aigua han variat considerablement (Figura 8.2). Ara tots els cursos d'aigua acaben entrant al biodigestor (o directament a l'aiguamoll en el cas d'algunes aigües grises). A més s'observa un nou consum d'aigua, per a la neteja dels corrals, que millora la higiene i la salut d'animals i persones. Tot això entra al biodigestor, i el biol que en surt, entra a l'aiguamol artificail, on



es redueix encara més la seva càrrega orgànica. L'efluent de l'aiguamoll és aigua clarificada rica en nutrients, que pot ser utilitzada per al reg de l'hort. No és aconsellable la reutilització d'aquesta aigua per a la neteja dels corrals, car encara conté una petita càrrega bacteriana.

Així, les actuacions a les granges, no només han eliminat els abocaments sinó que han revaloritzat alguns cursos d'aigua, com els orins que acaben essent usats per al reg El consum d'aigua per a la neteja dels corrals, que és un consum addicional respecte a l'estat anterior, en realitat substitueix el consum per al reg, ja que aquest prové de la reutilització de totes les altres aigües.

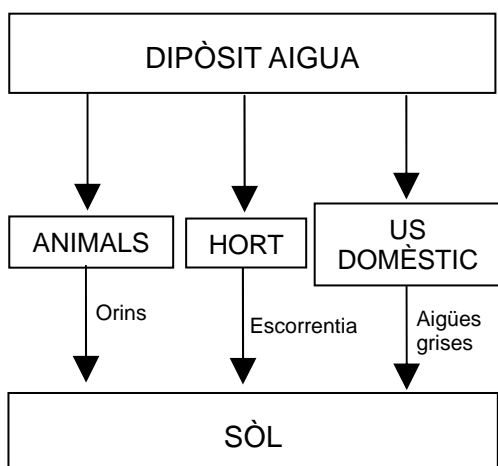


Figura 8.1 – Cicle de l'aigua a les granges abans de l'actuació del Projecte

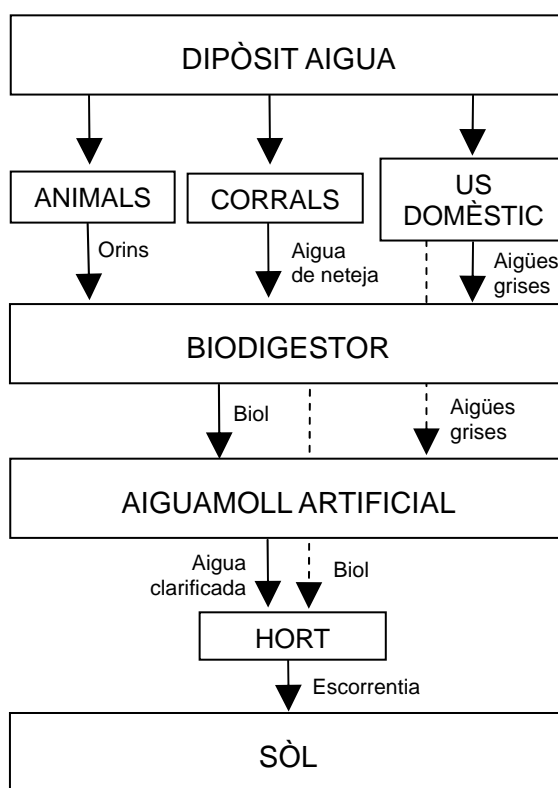


Figura 8.2 – Cicle de l'aigua un cop finalitzat el Projecte

8.3. Sòl

L'impacte que té sobre el sòl el sistema implantat també és significatiu. A banda de la reducció de lixiviats contaminants presentada en l'apartat anterior, aquests sistemes



poden contribuir a la recuperació dels sòls. El biol produït en el biodigestor és un fertilitzant orgànic molt valuós i un vehicle de retorn de nutrients al sòl. La digestió anaeròbia conserva una major quantitat de nutrients de la matèria orgànica que no pas la digestió aeròbia (compostatge), on el nitrogen es volatilitza un 25% més que en el primer cas [20]. Els nutrients del biol afavoreixen el creixement dels bacteris en el sòl, fet que pot beneficiar l'estructura del sòl i el contingut d'humus. Una aplicació excessiva pot acidificar el terreny, però els terrenys porosos (sorra) com és el cas del *Parque Porcino*, poden admetre una càrrega de biol superior a altres tipus de terrenys, com poden ser els argilosos o llimosos. A la Xina s'han dut a terme algunes investigacions sobre llargs períodes de temps (3-5 anys) que demostren els beneficis que l'aplicació del biol té sobre el sòls: augment de la porositat del sòl, del contingut de carboni, de potassi, de fòsfor,... ([9], pg. 63).

En el cas del *Parque Porcino* no és significativa la utilització del biol en relació a la substitució dels fertilitzants químics, ja que aquests no són usats pels *porcicultores*. En altres indrets aquesta substitució pot ser un factor molt important, no només a nivell ambiental, sinó també a nivell econòmic.

Un anàlisi interessant és l'ACV (Anàlisi del Cicle de Vida) on es valora quantitativament el cost a nivell de recursos i d'energia que comporta un producte. Els biodigestors instal·lats han provocat en la seva fabricació un consum energètic així com de matèries primeres (petroli, ja que el material es geomembrana de PVC). A nivell de recursos, és possible pensar que el petroli pugui ser substituït per un altre tipus de matèria primera d'origen orgànic per a permetre la fabricació de la geomembrana de PVC. Mentre que a nivell energètic, "*durant la vida útil del biodigestor es recupera amb escreix la quantitat d'energia consumida en la seva construcció*" [6].



Conclusions

La instal·lació i el correcte funcionament d'un sistema de producció de biogàs en el *Parque Porcino de Ventanilla* s'ha demostrat possible. Cal avaluar encara el seu rendiment, però com a mostra qualitativa de la seva efectivitat es pot dir que, en les granges on s'ha instal·lat digestors tubulars (*Alejandro i Sixto*), el combustible convencional utilitzat anteriorment ha estat totalment substituït pel biogàs generat.

El sistema de biodigestió implantat ha millorat considerablement la salut dels beneficiaris, i dels seus animals, degut a la millora en les condicions higièniques dels corrals i de la granja en general.

Les granges pilot han reduït notablement la contaminació ambiental que ocasionaven. S'ha eliminat les emissions per incineració dels excrements, s'ha eliminat la contaminació del subsòl pels lixiviats dels orins dels porcs i s'ha millorat el rendiment en l'ús de l'aigua, gràcies a la reutilització que fan possible el biodigestor i l'aiguamoll artificial.

A nivell d'equips, el filtre de H₂S ha mostrat la seva efectivitat, però no s'ha pogut treure cap conclusió sobre la durada del rebliment. Aquest factor és crític, ja que en el cas que calgués canviar el rebliment en períodes de temps massa curts (2-3 setmanes), la operació del filtre comportaria força treball, i si els grangers no estan disposats a realitzar aquest canvi tant sovint, comprometria la seva efectivitat. Dels dos dissenys, el disseny *Sixto* (tub de 6") és preferible al d'*Alejandro* (cubell de 5 galons), ja que és més senzill de construir, dóna menys problemes d'hermeticitat i sembla que pot oferir un millor rendiment, tot i que aquest últim aspecte no pogut ser comprovat.

El dipòsit de biogàs *Sixto* compleix satisfactòriament amb molts dels requisits necessaris. La pressió de sortida del biogàs no és òptima, però es suficient com per operar el cremador correctament.

Els experiments amb els cremadors han demostrat que el diàmetre d'injector òptim per a convertir les cuines de GLP a biogàs és de 2,5mm. Dels models estudiats, el que dóna millors resultats ha estat el de *Jorge*. De qualsevol manera, la modificació de qualsevol d'aquestes cuines és factible i el seu ús amb el biogàs també, encara que no sigui en les



condicions òptimes de rendiment.

Respecte a aquests experiments cal remarcar que les condicions en que es van dur a terme no són les idònies. El mètode per a mesurar el cabal no es pot qualificar d'acurat, però si més no serveix com a aproximació a falta d'un equip per dur a terme aquesta mesura. La variació de la pressió del dipòsit de biogàs és un factor clau per entendre la variació dels resultats obtinguts respecte als esperats.

Tot aquest treball ha servit per millorar el disseny de les granges pilot i ha ajudat a la seva definició final. Actualment el projecte de Ciudad Saludable es troba en una etapa d'expansió d'aquest model. S'han instal·lat 5 nous biodigestors tubulars de plàstic en 5 noves granges, que també s'han beneficiat de la remodelació dels corrals i la instal·lació d'un aiguamoll artificial. La UPC seguirà col·laborant amb CS per millorar la qualitat de vida dels habitants del *Parque Porcino de Ventanilla*.



Agraïments

A Lluís Batet, per haver-me introduït en aquest projecte, per la confiança dipositada en mi i per la seva ajuda.

A Albina Ruiz, per haver-me donat la oportunitat de treballar a Ciudad Saludable, de descobrir la seva feina i de compartir els seus projectes i les seves idees.

A Alejandro, Umbelina, Sixto, Cristina, Jorge, a la Sra. Júlia i al Sr. Pedro, a Dante i a Jorge Román, per fer del Parque Porcino una segona casa, per la seva incansable col·laboració, pel seu enorme entusiasme, per la seva inesgotable il·lusió malgrat els entrebancs, per la seva força per tirar endavant en tot moment, per les lliçons que m'han ensenyat i pels infinits moments que hem compartit.

A Marlene Chuquillanqui, per l'amistat que em va brindar, per fer-me viure i descobrir Lima. A Elena San Juan, Ivan Gilgado, Stephen Harper, Cynthia Paiva, Ana Hummel i Juan Díaz, per les dures hores de feina i les de descans, per l'energia, pels riures i pels somriures. A Cristina Cugat, Maria Domingo i Davide Poggio, per la seva benvinguda, per estar sempre disposats a ajudar i per la seva amabilitat.

A Dante, José, Ricardo, Mabel, Juan, Alex, Hela, Paloma, Kathy, José Carlos, Manuel,... i a tot l'equip de Ciudad Saludable, per fer-me sentir un més des del primer dia, per no quedar-se en una relació purament laboral.

A Cosy i a tots els habitants de la Casa Marfil, per acollir-me durant 9 mesos i trobar-hi tant de caliu.

Als meus amics i amigues, per animar-me a embarcar-me en aquest Projecte i estar al meu costat tot i la distància.

A Lucía, per haver-me trobat i no haver-me deixat anar.

Als meus pares i ma germana, que sempre em recolzen, que sempre tenen una paraula d'ànim i sempre la tindran. Moltíssimes gràcies.





Bibliografia

- [1] KOSSMANN, W. [et al.] *Biogas Digest. Volume 1: Biogas Basics*. Eschborn, GTZ, (s.d.)
- [2] WERNER, U., STÖHR, U., HEES, N. *Biogas plants in animal husbandry*. Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien (GTZ), 1989
- [3] CAMPOS POZUELO, A. E. *Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión de residuos orgánicos de la industria agroalimentaria* (Tesi doctoral). Universitat de Lleida, 2001.
- [4] BURKE, D. A. *Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook*. Olympia, Environmental Energy Company, 2001.
- [5] KOSSMANN, W. [et al.] *Biogas Digest. Volume 2: Biogas – Application and Product Development*. Eschborn, GTZ, (s.d.)
- [6] POGGIO, D. *Diseño y construcción de dos digestores anaeróbicos en el altiplano peruano* (PFC). Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, 2007
- [7] MARTÍ HERRERO, J. *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*. Bolívia, GTZ-Energía, 2008
- [8] WHEELER, P. [et al.] *Biogas Upgrading and Utilisation. Task 24: Energy from biological conversion of organic waste*. IEA-Bioenergy, (s.d.)
- [9] GUNNERSON, C. G., STUCKEY, D. C. *Anaerobic Digestion. Principles and Practices for Biogas Systems*. Washington, World Bank, 1986.
- [10] FAO, *Biogas technology: A training manual for extension*. Kathmandu, 1996
- [11] *The Millenium Development Goals Report 2008*. UNDP, 2008
- [12] MOSS, A. R., JOUANY, J., NEWBOLD, J. *Methane production by ruminants: its contribution to global warming*. *Annales de Zootechnie*. Vol 49, 2000, 231-253
- [13] SMITH, K., MEHTA, S., MAEUSEZAHN-FEUZ, M. *Indoor pollution from household use of solid fuels* en EZZATI, M. [et al.] *Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease Attributable to Selected Major Risk Factors*. Ginebra, World Health Organisation, 2004, pg. 1435-1494



- [14] KOSSMANN, W. [et al.] *Biogas Digest. Volume 3: Biogas – Costs and Benefits and Programme Implementation*. Eschborn, GTZ, (s.d.)
- [15] *Estudio a nivel de perfil del Programa de Desarrollo Integral del Parque Porcino de Ventanilla*. Lima, Gobierno Regional del Callao, 2005
- [16] CUGAT, C. *Biogas Digesters for pig farms in Lima, Peru* (Master thesis). TU Delft, 2008
- [17] SAN JUAN, E. *Instalación de dos biodigestores de tipo manga en el Parque Porcino de Ventanilla, Lima, Perú* (Treball de Final de Carrera). Barcelona, Institut Químic de Sarrià, 2008
- [18] GILGADO, I. *Instalación de tres humedales artificiales en Ventanilla, Perú* (Treball de Final de Carrera). Barcelona, Institut Químic de Sarrià, 2008
- [19] GÁMIZ, M. *Tecnologías sostenibles para la gestión de residuos en Ventanilla (Lima). Aprovechamiento energético del Biogás* (PFC). Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, 2007.
- [20] HOUSE, D., *The Biogas Handbook*. Culver City, Peace Press, 1981.
- [21] MUCHEL, H., ZIMMERMANN, H. *The purification of biogas*. Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien (GTZ), 1985.
http://www.fastonline.org/CD3WD_40/CD3WD/APPRTECH/G35PUE/EN/B901.HTM
- [22] OXFORD UNIVERSITY. THE PHYSICAL AND THEORETICAL CHEMISTRY LABORATORY. *Safety Data for Hydrogen Sulfide*. Oxford. 2005.
http://msds.chem.ox.ac.uk/HY/hydrogen_sulfide.html
- [23] THRASHER, J. D. *Poison of the Month: Toxicology of Hydrogen Sulfide*.
http://www.drthrasher.org/toxicology_of_hydrogen_sulfide.html (8 d'octubre de 2008)
- [24] RIESENFELD, F. C., KOHL, A. L. *Gas Purification*. 2nd Edition. GULF Publishing Company, 1974.
- [25] MOKHATAB, S., POE, W., SPEIGHT, J. *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing*. GULF Professional Publishing, 2006.
- [26] ZICARI, S. M. *Removal of Hydrogen Sulfide from Biogas Using Cow-Manure Compost* (Thesis). Cornell University, 2003.



- [27] MITZLAFF, K. *Biogas engines*. Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien (GTZ), 1988.
- [28] BASU, R., CLAUSEN, E. C., GADDY, J. L. *Biological Conversion of Hydrogen Sulfide into Elemental Sulfur*. Environmental Progress. Vol 15 (Núm. 4), 1996, p. 234-238.
- [29] BARONA, A. [et al.] *Hydrogen sulphide adsorption on a waste material used in bioreactors*. Biochemical Engineering Journal. Vol 24, 2005, p 79-86.
- [30] HARTIKAINEN, T. [et al.] *Carbon Disulfide and Hydrogen Sulfide Removal with Peat Biofilter*. Journal of the Air and Waste Management Association, Vol 51, 2001, p. 387-392.
- [31] ELÍAS, A. [et al.] *Evaluation of a packing material for the biodegradation of H₂S and product analysis*. Process Biochemistry, Vol. 37, 2002, p 813-820.
- [32] RAMÍREZ-LÓPEZ, J. [et al.], *Characterization of five agricultural by-products as potential biofilter carriers*. Bioresource Technology, Vol. 88, 2003, p. 259-263.
- [33] ZHANG, D. *An Analysis of Domestic Biogas Storage Installations in China*. Biomass, Vol. 20, 1989, p. 61-67.
- [34] EL-MAHALLAWY, F., EL-DIN-HABIK, S. *Fundamentals and Technology of Combustion*. Elsevier, 2002.
- [35] JONES, H. R. N. *The Applications of Combustion Principles to Domestic Gas Burner Design*. London, British Gas, 1989.
- [36] HUAMANÍ, M. M. *Diseño y construcción de un quemador de biogás para uso doméstico* (Tesi). Lima, Universidad Nacional de Ingeniería, 2003.
- [37] FULFORD, D. *Running a Biogas Programme: A Handbook*. London, Intermediate Technology Publications, 1988.
- [38] LUCKY, R. A., HOSSAIN, I. *Efficiency study of Bangladeshi cookstoves with an emphasis on gas cookstoves*. Energy, Vol. 26, 2001, p. 221-237.
- [39] SANTOS, T. M. B., DE LUCAS, J., DA SILVA, F. M. *Avaliação do desempenho de um aquecedor para aves adaptado para utilizar biogás como combustível*. Engenharia Agrícola, Vol. 27 Núm. 3, 2007, p. 658-664.



- [40] GUERRERO, C. A., PÉREZ, A. *Evaluación del uso de calentadores de lechones operados con biogás y de bajo costo en la producción porcina* (Trabajo de Graduación). Guàcimo, Universidad EARTH, 2001.
- [41] *Testing the Efficiency of wood-burning Cookstoves*. Volunteers in Technical Assistance (VITA), 1985.
- [42] CHANDRA, A. [et al.] *Performance evaluation of biogas burners*. Energy Conversion and Management, Vol. 32 Núm. 4, 1991, p. 353-358.
- [43] *Memorias del Primer Curso – Seminario Nacional de Capacitación en Biogás*. Cajamarca, ITINTEC, 1983.
- [44] SHUHN-SHYURNG, H., YUNG-CHANG, K. *Effects of heating height on flame appearance, temperature field and efficiency of an impinging laminar jet flame used in domestic gas stoves*. Energy Conversion and Management, Vol. 45, 2004, p. 1583-1595.
- [45] MCFARLAND, M. J., JEWELL, W. J. *In situ control of sulfide emissions during the thermophilic (55°C) anaerobic digestion process*. Water Research, Vol. 23 Núm. 12, 1989, p. 1571-1577.
- [46] KANDPAL, J. B., MAHESHWARI, R. C., KANDPAL, T. C. *Indoor air pollution from combustion of wood and dung cake and their processed fuels in domestic cookstoves*. Energy Conversion and Management, Vol. 36 Núm. 11, 1995, p. 1073-1079

