



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dedicarles este Trabajo Fin de Grado a mis padres, por haber creído siempre en mi y porque gracias a sus ánimos, sus consejos y al enorme cariño que he ido recibiendo día tras día, todo este camino ha sido mucho más fácil.

En segundo lugar, dar las gracias a toda mi familia, en especial a mi hermano Adrián, por estar siempre ahí y apoyarme en cada decisión.

Agradezco a mis tutores del trabajo, M^a Isabel y Jose Antonio, por todo el tiempo que han empleado en ayudarme y todo el ánimo recibido. A Maria José, quien me ha acompañado en todos mis días de laboratorio, por todas las horas empleadas y por su apoyo.

A Román, por motivarme y escucharme como lo hace.

A todos mis amigos, sobre todo a Ángela, por tenerla siempre que la necesito.



RESUMEN

El presente trabajo consiste en la valorización de una corriente de biogás procedente del tratamiento anaerobio de purines mediante SBR para producción de energía.

Para ello se abarca la problemática de los purines de cerdo, intentando minimizar el impacto ambiental producido mediante su depuración. Además, se pretende transformar el purín en un recurso gracias a su capacidad de generación de biogás, el cual constituye un producto valorizable que puede ser usado para la obtención de energía.

Atendiendo a estos aspectos, se ha diseñado una planta piloto para una granja de 1000 cerdos, que permita visualizar a escala real la rentabilidad del proceso así como la equivalencia del biogás generado con otras fuentes de energía. Además, se incluye un informe orientativo del presupuesto que propiciaría la instalación.

Palabras Clave: biogás, purín, tratamiento anaerobio, producto valorizable.



RESUM

El present treball consisteix en la valorització d'una corrent de biogàs que procedent del tractament anaerobi de purins mitjançant SBR per a la producció de energia.

Per a això, engloba la problemàtica dels purins de porc, intentant minimitzar el impacte ambiental produït mitjançant la seua depuració. A més a més, es pretén transformar el purí en un recurs gràcies a la seua capacitat de generació de biogàs, el qual constitueix un producte valoritzable que pot ser utilitzat per a la obtenció de energia.

Atenent a aquests aspectes, s'ha dissenyat una planta pilot per a una granja de 1000 porcs, que puga permetre visualitzar a escala real la rendibilitat del procés tanmateix com la seva equivalència del biogàs generat amb altres fonts d'energia. A més, s'inclou un informe orientatiu del pressupost que propiciaria la instal·lació.

Paraules clau: biogàs, tractament anaerobi, purí, producte valoritzable



ABSTRACT

This work consists of the valorization of a biogas current proceeding from the anaerobic treatment of pig slurry through SBR to produce energy.

To do so, the pig slurry issue is covered trying to minimize the environmental impact produced through its purification. Moreover, the slurry is expected to be transformed in a resource due to its biogas generating capacity, which constitutes a recoverable product that can be used to obtain energy.

Considering these aspects, a pilot plant of a farm which contains 1000 pigs has been designed, to allow viewing in true scale the profitability of the process and the equivalence of the biogas generated with other energy sources. In addition, as a guideline, a report of the budget of the facilities has been included.

Keywords: biogas, pig slurry, pig slurry, recoverable product.



ÍNDICE

Documentos contenidos en el TFG

- MEMORIA TÉCNICA
- PRESUPUESTO
- ANEXOS

DOCUMENTO I: MEMORIA TÉCNICA.....	1
1. OBJETIVOS.....	2
2. JUSTIFICACIÓN.....	2
3. ANTECEDENTES.....	4
3.1 PROBLEMÁTICA DE LOS PURINES.....	4
3.2 SBR ANAEROBIO.....	9
3.3 FORMACIÓN Y USOS DEL BIOGÁS.....	11
4. METODOLOGÍA.....	13
4.1 MATERIAL Y EQUIPO EXPERIMENTAL.....	13
4.2 ANÁLISIS DE COMPUESTOS.....	22
4.2.1 Determinación del CO ₂ en el biogás.....	22
4.2.2 Determinación del pH.....	23
4.2.3 Determinación de la Conductividad.....	23
4.2.4 Determinación del DQO soluble.....	23
4.2.5 Determinación del DQO total.....	24
4.2.6 Determinación de la Dureza del agua.....	24
4.2.7 Determinación del Nitrógeno total (NT).....	24
4.2.8 Determinación del Fósforo total (PT).....	25
4.2.9 Determinación N-NO ₃ (nitratos).....	26
4.2.10 Determinación N-NH ₄ . Método Kjeldahl.....	26
4.2.11 Determinación de sólidos totales y volátiles.....	27
4.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	28
4.3.1 Puesta en marcha o aclimatización del fango.....	28
4.3.2 Método de análisis.....	29
5. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	30
5.1 CARACTERIZACIÓN DEL FANGO DE SIEMBRA Y DEL PURÍN Y PARÁMETROS DE DISEÑO.....	30
5.2 PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	31
5.3 PARÁMETROS DE DISEÑO (DQO, ST, SV, PH, CONDUCTIVIDAD, NT, PT, N-NO ₃ , N-NH ₄ , DUREZA DEL AGUA).....	37
6. PLANTA PILOTO.....	43
7.1 CÁLCULOS.....	43
6.2 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN.....	47
6.2.1 Diseño digestor anaerobio.....	47
6.2.2 Diseño gasómetro.....	48
6.3 ESTUDIO ECONÓMICO.....	50



6.4	DIAGRAMA DE FLUJO DE LA INSTALACIÓN	51
7.	CONCLUSIONES	52
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	52

DOCUMENTO II: PRESUPUESTO..... 55

PRESUPUESTO PLANTA PILOTO	56
1. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS.....	56
1.1 Presupuesto de la instalación.....	56
1.2 Presupuesto de mano de obra.....	57
1.3 Presupuesto de material para análisis.....	58
2. PRESUPUESTO TOTAL.....	60

DOCUMENTO III: PLANOS 63

PLANO I: DIGESTOR ANAEROBIO.....	56
PLANO II: GASÓMETRO.....	56

DOCUMENTO IV: ANEXOS 67

ANEXO I: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	69
CENTRÍFUGA SIGMA	70
PH- METRO.....	71
CONDUCTÍMETRO.....	73
TERMORREACTOR.....	74
DESTILADOR KJELDAHL	76
ANEXO II: CÁLCULOS.....	77
1. CÁLCULOS NITRÓGENO AMONIAICAL KJELDAHL (N-NH ₄).....	78
MUESTRA DÍA 6	78
MUESTRA DÍA 9	78
MUESTRA DÍA 13.....	79
MUESTRA DÍA 16.....	79
MUESTRA DÍA 20.....	80
MUESTRA DÍA 23.....	80
MUESTRA DÍA 26.....	80
MUESTRA DÍA 28.....	81
2. CÁLCULOS SÓLIDOS TOTALES (ST) Y VOLÁTILES (SV)	81
MUESTRA DÍA 6	82
MUESTRA DÍA 9	82
MUESTRA DÍA 13.....	83
MUESTRA DÍA 16.....	84
MUESTRA DÍA 20.....	84
MUESTRA DÍA 23.....	85
MUESTRA DÍA 26.....	86
MUESTRA DÍA 28.....	86
ANEXO III: DIAGRAMA DE BLOQUES.....	89



Valorización de una corriente de biogás procedente del tratamiento
anerobio de purines, mediante SBR, para la producción de energía

DOCUMENTO I: MEMORIA TÉCNICA



1. OBJETIVOS

Los objetivos de este Trabajo Fin de Grado consisten en:

- Transformar el purín en un recurso a partir de su capacidad de generación de biogás, el cual constituye un producto valorizable y además, podrá ser usado para la obtención de energía.
- Depuración del purín ya que se trata de sustancia formada por elementos contaminantes.
- Diseñar una planta piloto que permita rentabilizar el proceso.

2. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo fin de grado pretende valorizar una corriente de biogás procedente del tratamiento anaerobio de purines mediante, un reactor SBR para producción de energía. De este modo se pretende minimizar el impacto ambiental, recuperando el metano y reduciendo gases de efecto invernadero procedentes del biogás que resulta de la biodigestión y así como crear una fuente de ingresos adicional, a partir de la utilización del biogás generado, mediante la producción de energía.

La parte experimental de este trabajo, forma parte de un proyecto de investigación del Ministerio de Economía y Competitividad, dentro de la convocatoria RETOS: "Desarrollo de un proceso de valorización integral de purines. PROVIP.ES"

Actualmente, el sector pecuario es uno de los principales proveedores de alimentos para los humanos y de provisión de materias primas, llegando hasta grandes niveles industriales. En España (Martín, MB, et al 2006), el censo porcino del año 2003, alcanzó los 24 millones de animales. Según un informe elaborado por la FAO (Steinfeld, 2006) la producción mundial de carne se estima en unos 229 millones de toneladas. De seguir el ritmo de consumo actual, esta cifra se verá duplicada a 465 millones de toneladas en 2050.

El problema se genera con los purines: en una explotación de 1.000 cerdos se extraen unos 2.000 metros cúbicos de purines al año. La mayoría de estos purines son utilizados como fertilizantes para la agricultura, sin embargo, más del 30% se convierte en excedentes, ya que no pueden ser utilizados, por ejemplo, por no disponer de suelos agrícolas cercanos.



Dichos excedentes provocan graves problemas ambientales, principalmente en aguas subterráneas y superficiales, debido a los nitratos que generan y al fósforo que presenta, ya que este último, unido al nitrógeno de los purines, provoca problemas de eutrofización. Además, provoca malos olores, emite gases de efecto invernadero como el CH_4 , y si se realiza una gestión y aplicación inadecuadas, existe la posibilidad de riesgo sanitario, ya que al fin y al cabo se está tratando con deyecciones de un mamífero.

Consecuentemente, estos problemas derivados de los purines han sido materia de numerosas legislaciones, las cuales han ido estableciendo diferentes normativas y restricciones al uso y gestión de las deyecciones ganaderas, por ejemplo, respecto a la distancia máxima de aplicación, momentos específicos de aplicación, características y requisitos de las balsas de almacenamientos de purines de cerdo, etc.

Por otro lado, los costes asociados al tratamiento de purines son muy elevados. Según un informe elaborado por el Gobierno de Aragón (Iguácel, 2007), los costes oscilan entre 5.4 y 11.0 €/m³, lo que supone un coste importante para el ganadero.

En vista de todo ello, una de las soluciones asociadas al tratamiento de purines, es la digestión anaerobia de las deyecciones ganaderas y el aprovechamiento del biogás producido. Dicha digestión provoca una degradación importante de la materia orgánica, mediante la acción de unas bacterias específicas, descomponiéndose en biogás. Los beneficios resultantes de dicho proceso son: reducción notable de malos olores, mineralización y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Unido a estos beneficios, se encuentran los relacionados con el biogás resultante de la digestión. El biogás tiene un poder calorífico de unas 5.500 kcal/N m³ (6,4 kWh/N m³) por lo que se convierte en un combustible muy bueno. De este modo, el biogás se puede utilizar como fuente de generación de calor o electricidad, como combustible de automoción, en pilas de combustible, se puede utilizar en una red de transporte de gas natural y se puede usar como material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido.

Por todo ello, con este Trabajo Fin de Grado, se pretende valorar una corriente de biogás procedente del tratamiento anaerobio de purines mediante un reactor SBR para producción de energía. De este modo, se pretende minimizar el impacto ambiental, recuperando el metano y reduciendo gases de efecto invernadero procedentes del biogás que resulta de la biodigestión, así como crear una fuente de ingresos adicional, a partir de la utilización del biogás generado, mediante la producción de energía.

Por último, como justificación académica, añadir que se ha realizado este Trabajo Final de Grado para valorar la aplicación de forma transversal de conocimientos adquiridos, ya que se han requerido diferentes disciplinas estudiadas



en la titulación de Grado en Ingeniería Química, siendo algunas de ellas Tecnología del medioambiente, Gestión Ambiental, Fuentes de Energía, Operaciones de separación y Procesos. Por tanto, con el desarrollo del presente Trabajo se pretende completar y finalizar la titulación de Grado en Ingeniería Química.

3. ANTECEDENTES

3.1 Problemática de los purines

Desde siempre, los residuos ganaderos se han utilizado y considerado como un recurso de gran valor para las explotaciones agrícolas como abono orgánico y para el desarrollo y mejora de las propiedades del suelo. Estos conocimientos antiguos se fueron enriqueciendo de generación en generación con aportaciones sobre cómo mezclarlos, sobre las cualidades específicas de cada uno, o sobre el tiempo de espera hasta su aplicación, etc. En cierto modo, el concepto de tratamiento del estiércol, estaba implícito en la cultura tecnológica del sector. Sin embargo, en los últimos años el incremento de las explotaciones ganaderas intensivas, lo cual ha permitido una mayor productividad, junto a su desligamiento del marco de las explotaciones agrarias, ha desembocado en que las tecnologías de gestión del purín del sector agroindustrial, no hayan evolucionado paralelamente. Este hecho se convierte en un grave problema ambiental en muchos casos, puesto que los purines constituyen una de las fuentes más significativas de contaminación difusa por nitratos de las aguas subterráneas.

Los purines de cerdo presentan además un alto contenido en fósforo lo que supone una dificultad adicional, ya que el fósforo, a pesar de ser un elemento fundamental para la fertilización de los cultivos, presenta un elevado poder contaminante cuando afecta a las aguas superficiales, debido a que si se une al nitrógeno, provoca graves problemas de eutrofización (elevado consumo de oxígeno, debido al crecimiento incontrolado de especies vegetales en las aguas, que dificulta la vida de otras especies y altera significativamente el equilibrio natural).

Las características del purín de cerdo dependen de diversos factores como la edad, alimentación, época del año, tipo de abrevaderos, estado fisiológico de los animales, etc. Los valores de su composición son muy variables y pueden moverse en intervalos muy amplios. En la TABLA 3.1.1 se recogen los valores típicos para el purín de cerdo (Flotats, 2004).



TABLA 3.1.1: Composición de purines de cerdo.

Fuente: Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas.

Parámetro	Unidades	Mínimo	Máximo	Media
Sólidos totales (ST)	g/kg	13,68	169,00	62,16
Sólidos volátiles (SV)	g/kg	6,45	121,34	42,33
Porcentaje SV/ST	%	46	76	65
Demanda química de oxígeno (DQO)	g/kg	8,15	191,23	73,02
Nitrógeno total Kjeldhal (NTK)	g/kg	2,03	10,24	5,98
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₄ ⁺)	g/kg	1,65	7,99	4,54
Nitrógeno orgánico (Norg)	g/kg	0,40	3,67	1,54
Porcentaje N-NH ₄ ⁺ /NTK	%	57	93	75
Fósforo (P)	g/kg	0,09	6,57	1,38
Potasio (K)	g/kg	1,61	7,82	4,83
Cobre (Cu)	mg/kg	9	192	40
Zinc (Zn)	mg/kg	7	131	66

Estos valores ponen de manifiesto los principales problemas relacionados con la gestión de purines de cerdos:

- El contenido en agua es muy elevado. Se trata de la diferencia entre sólidos totales y el total de materia fresca (TABLA 3.1): $1000 - 62.16 = 937.84$ g/kg, o lo que es lo mismo, el 93.8% del purín es agua. Esto implica que los costes asociados al transporte del purín se deben mayoritariamente al agua.
- El contenido en materia orgánica escalono es muy alto. La materia orgánica se mide con la DQO y los sólidos volátiles. Por la tabla anterior se ve que es relativamente bajo el contenido de oxígeno que se necesita para oxidar la materia orgánica (73.02 g/kg).
- Elevado contenido en nitrógeno amoniacal. El nitrógeno amoniacal se eleva a un 75% del N total presente en el purín. Este hecho junto la baja concentración de materia orgánica, sitúa a los purines en el rango de fertilizante mineral.
- Contenido notable en metales (Cu y Zn). La aglomeración del Cu y Zn en el suelo puede provocar fitotoxicidad en los cultivos así como afectar de forma negativa a otros tratamientos biológicos del purín.
- Presencia de fósforo y potasio. Los dos elementos son fertilizantes necesarios para los cultivos. En los purines de cerdo, la concentración de fósforo es elevada y acarrea problemas en la contaminación de las aguas.

La Imagen 3.1.1 recoge algunos aspectos medioambientales relacionados con la cría de ganado intensivo.

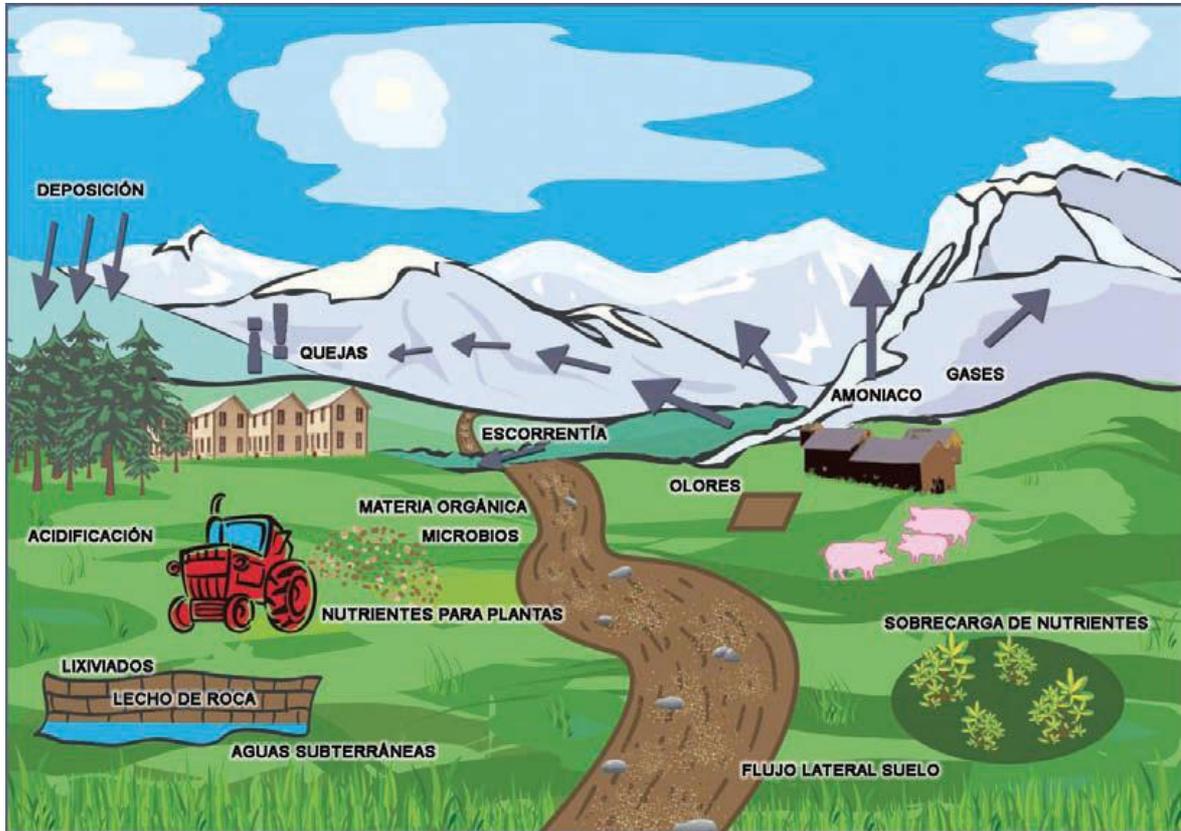


Imagen 3.1.1: Aspectos medioambientales relacionados con la cría de ganado intensivo.

Fuente: Guía MTD en España del sector porcino.

En cuanto a la distribución espacial en España del sector porcino (Gráfico 3.1.1), tres son las Comunidades Autónomas que representan más del 50% del total, siendo la de mayor censo Cataluña con un 25.8%, seguida por Aragón con un 17.3% y Castilla y León con 13.9% (Martín, MB, et al 2006).

En el siguiente gráfico se muestra la distribución, por Comunidades Autónomas, de las explotaciones de tipo intensivo.

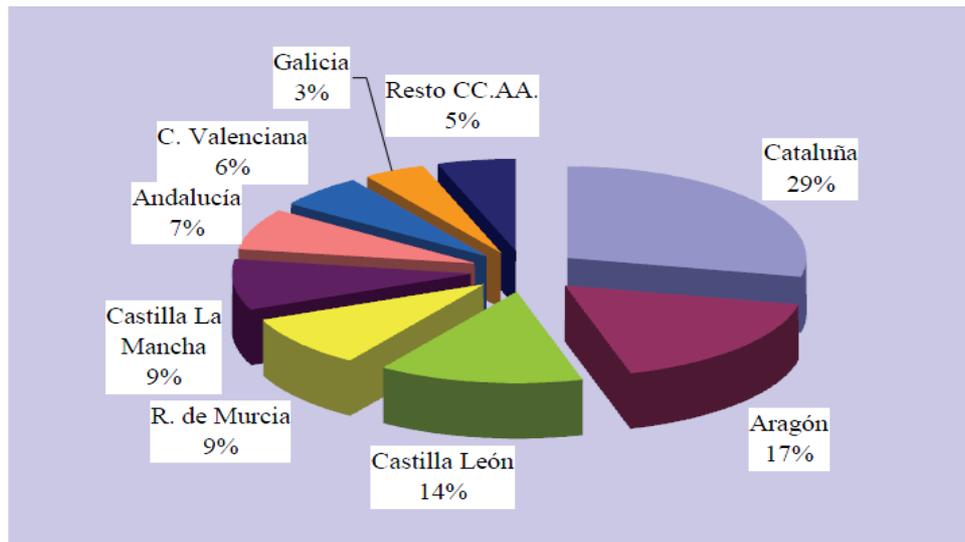


Gráfico 3.1.1: Distribución del ganado intensivo porcino por CCAA. 2003.

Fuente: Guía MTD en España del sector porcino.

Según los datos recogidos por la Universidad de Lleida para la Comunidad Autónoma de Cataluña (Teira, M.R, 2008), un 96.88% de los purines producidos se aplican como fertilizante al suelo agrícola, sin previo tratamiento excepto el almacenamiento. El 3.12% restante son tratados antes de que los subproductos generados en el tratamiento sean aplicados al suelo. La mayoría de estos tratamientos hacen referencia al paso de los purines por plantas de cogeneración. A grandes rasgos se estima que en el caso de Cataluña, los aportes al año de N al suelo son los recogidos en la TABLA 3.1.2:

TABLA 3.1.2: aportes anuales de N en Cataluña.

Fuente: Informe para la mejora de la gestión de los purines porcinos en Catalunya.

Producto	Cantidad
Purín porcino	55.000 t N/año
Deyecciones de otro ganado	64.500 t N/año
Lodos de EDAR	7.500 t N/año
Fertilizantes minerales	46.000 t N/año
Total	173.000 t N/año

Por otro lado, según los datos del informe elaborado por el gobierno de Aragón (Iguácel, F, 2007), se estima que los costes asociados a los tratamientos alternativos del purín, se encuentran entre 5.4 y 11.0 €/m³, mientras que la aplicación de estos al suelo como fertilizante se encuentra entre 2 y 4 €/m³, que supone alrededor de un 2.5% de los costes totales de producción.

Por último, otro problema a destacar es que los purines son deyecciones de mamífero, lo que conlleva a la posibilidad de riesgo sanitario en caso de una aplicación y gestión inadecuadas.

Por ello se establecen dos propuestas de actuación para la gestión de purines. La primera propuesta de actuación se basa en disminuir al máximo la cantidad generada de purín, a través del manejo, la alimentación, etc. Por otro lado, la segunda propuesta de actuación se centra en la aplicación del purín al suelo, dado que su producción es inevitable. Esta segunda propuesta se podrá llevar a cabo si se tienen parcelas agrícolas suficientes a una distancia menor a la decena de km. La imagen 3.1.2 muestra la incorporación del purín al suelo como fertilizante.

Finalmente, si no es posible ninguna de las aplicaciones anteriores, entra en juego la opción del tratamiento del purín. Si se toma esta opción, debido al elevado coste de inversión y operación del tratamiento, se pretende conseguir alguna rentabilidad y aprovechamiento del residuo.



Imagen 3.1.2: Incorporación de fertilizante mediante pase de vibrocultor.

3.2 SBR Anaerobio

Hasta la actualidad, cuando no cabía la alternativa de la aplicación al suelo del purín, la digestión anaerobia ha sido la alternativa más usada por la posibilidad que presenta de recuperar parte del coste de inversión y explotación. Esto es debido a la producción de energía eléctrica generada a partir de la combustión del biogás producido.

La digestión anaerobia es un proceso biológico de descomposición de la materia orgánica a través de una fermentación bacteriana productora de metano. Dicho proceso se da en condiciones de ausencia de aire y en un recinto cerrado. El proceso se puede dividir en cuatro fases (Imagen 3.2.1) (Mendoza, J.A, 2005):

- Fase de hidrólisis: se basa en la descomposición en cadenas más cortas por parte de sustancias de altos pesos moleculares.
- Fase de acidificación: bacterias anaerobias facultativas se transforman en ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, H_2 y CO_2 .
- Fase acetógena: es la etapa limitante en cuanto a la velocidad de reacción, donde los ácidos y alcoholes se transforman en ácido acético.
- Fase metanógena: a partir del ácido acético se genera principalmente metano.

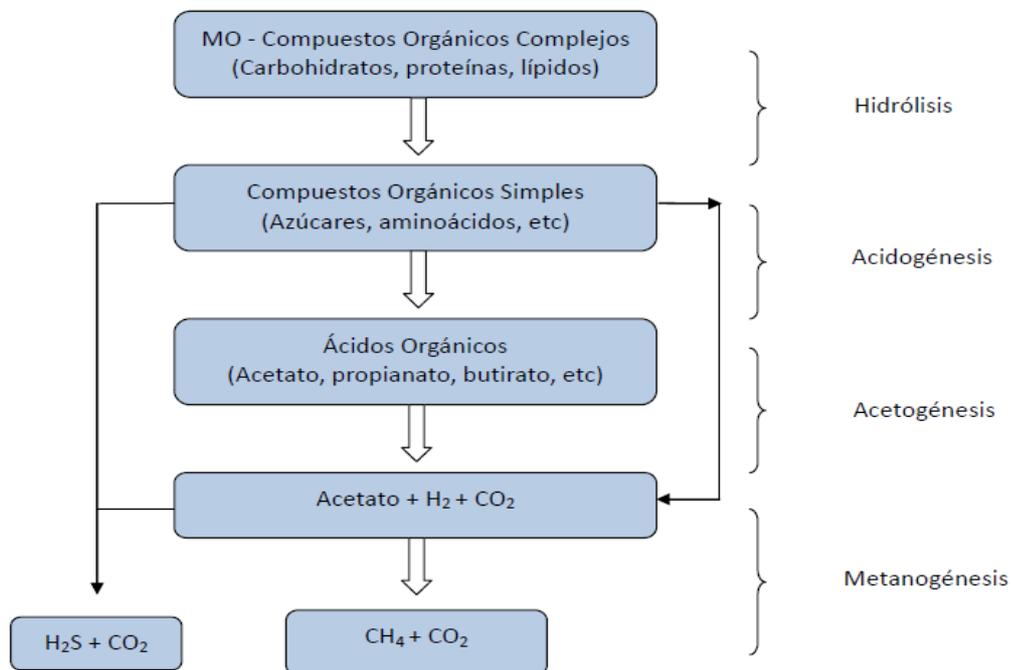


Imagen 3.2.1: Etapas Digestión Anaerobia.

Fuente: Tratamiento mediante reactores anaerobios. Curso tratamiento de aguas residuales. 2002

Los factores más importantes que determinan el buen funcionamiento de un digestor anaerobio son los siguientes:

- Uniformidad de la mezcla: es importante que la mezcla se encuentre en constante agitación.
- Tiempo de digestión/ Temperatura: la velocidad de las reacciones bioquímicas aumenta con la temperatura por lo que ambos aspectos se encuentran relacionados. Para la formación de bacterias metanógenas es necesario un tiempo de retención superior a 10 días, por lo que ningún digestor puede funcionar con un tiempo inferior. Por otro lado, la digestión se realiza en un intervalo de temperaturas comprendido entre 30-38°C (régimen mesofílico).
- pH: la mejor producción de metano se produce con un pH estable comprendido entre 6.8 y 7.2.
- Presencia de elementos tóxicos: el proceso de metanización puede verse inhibido por la presencia de ciertos elementos como el amonio, disolventes químicos, ácidos volátiles, metales pesados y cationes de metales ligeros.

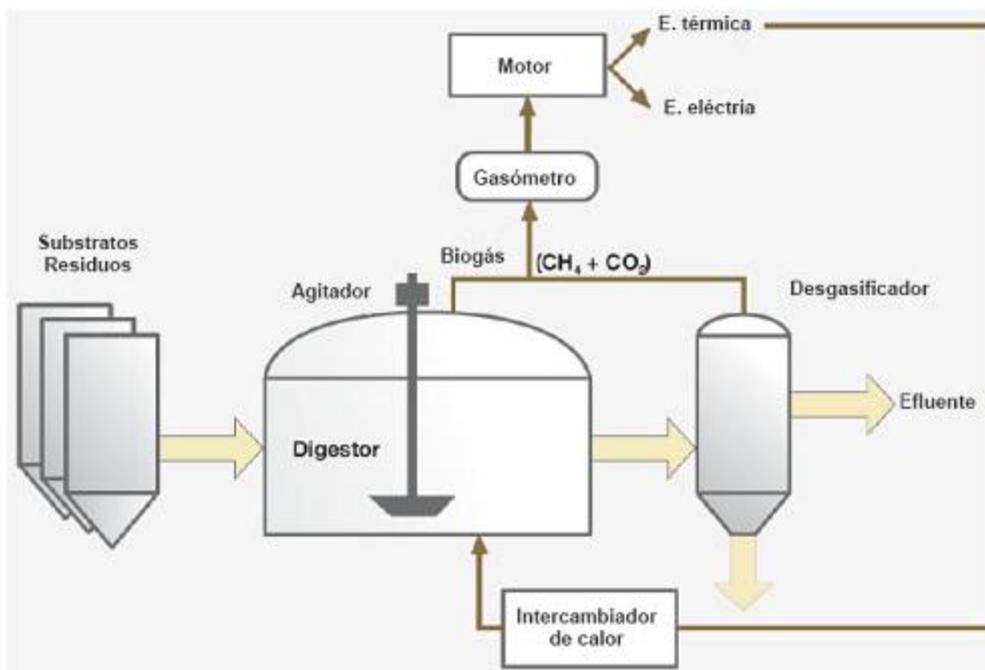


Imagen 3.2.2: Esquema biometanización para deyecciones ganaderas.

Además, con este proceso de digestión anaerobia se reduce la concentración de malos olores, de materia orgánica, de sólidos y de microorganismos patógenos.

3.3 Formación y usos del biogás

El biogás es el producto gaseoso que procede de la digestión anaerobia de productos orgánicos. Su composición depende del sustrato digerido y de la tecnología empleada y puede ser la siguiente (IDEA, 2007):

- _ 50-70% de metano (CH_4)
- _ 30-40% de dióxido de carbono (CO_2)
- _ $\leq 5\%$ de hidrógeno (H_2), ácido sulfhídrico (H_2S), y otros gases.

Gracias a su alto contenido en metano, posee un poder calorífico un poco mayor que la mitad del poder calorífico del gas natural.

Un biogás con un contenido en metano del 60% presenta un poder calorífico de unas 5.500 kcal/Nm³ (6,4 kWh/Nm³). En la Imagen 3.3.1 se muestran unas equivalencias de este combustible:

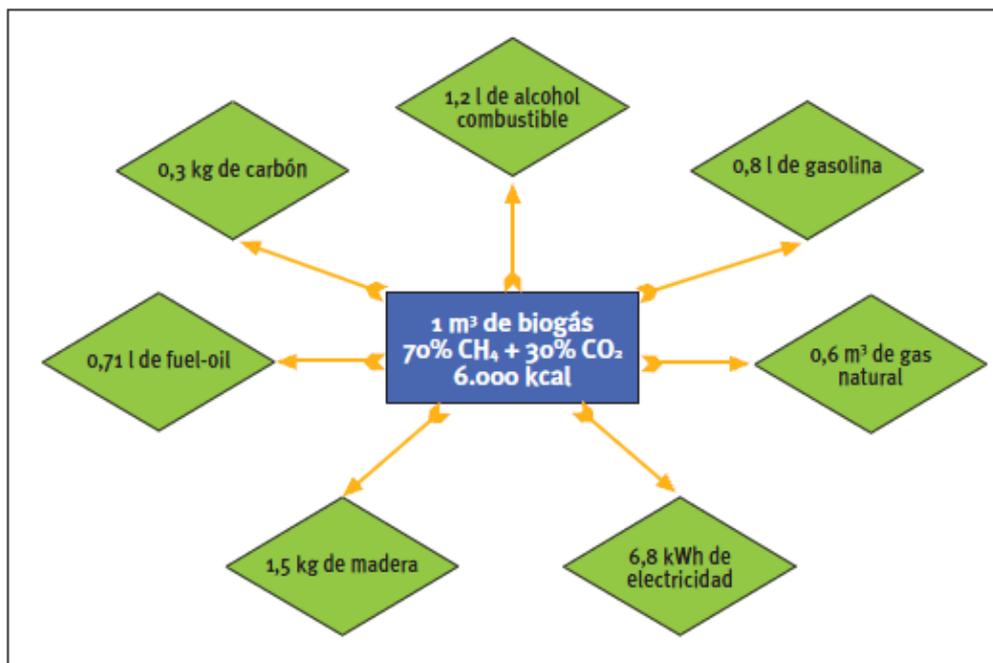


Imagen 3.3.1: Equivalencias del biogás con otras fuentes de energía.

Fuente: Biomasa: Digestores Anaerobios. 2007



Los usos del biogás producido en una digestión anaerobia pueden ser los siguientes:

- _ A través de una caldera para la generación de calor o electricidad.
- _ En motores o turbinas para generar electricidad.
- _ Tras la limpieza de H₂S y otros contaminantes, puede ser empleado en pilas de combustible.
- _ Introducción en una red de transporte de gas natural tras su purificación y adición de aditivos necesarios.
- _ Material base para la síntesis de productos de mayor valor añadido como, por ejemplo, el metanol o el gas natural licuado.
- _ Se puede emplear como combustible de automoción.

En la TABLA 3.3.1 se recogen los diferentes tratamientos de biogás para sus distintos usos, siendo 0 = no tratamiento, 1 = tratamiento parcial, 2 = tratamiento elevado.

TABLA 3.3.1: Tratamiento según el uso final del biogás.

Fuente: Biomasa: Digestores Anaerobios. 2007

Uso final	Eliminación del agua	Eliminación del CO ₂	Eliminación del H ₂ S
Producción térmica en caldera	1	0	0-1-2
Producción de electricidad en motores estacionarios	1 ó 2	0-1-2	1 ó 2
Combustible de vehículos o para turbinas	2	2	2
Gas natural para calefacción	2	2	2
Pilas de combustible	2	2	2

4. METODOLOGÍA

4.1 Material y equipo experimental

- Reactor anaerobio:

En un reactor anaerobio o biodigestor, se produce la digestión anaerobia, el cual es un proceso biológico que permite la degradación de la materia orgánica por medio de una fermentación bacteriana productora de metano, en un recinto cerrado y en ausencia de aire.

El reactor anaerobio utilizado es básicamente un recipiente de vidrio de capacidad de 2 litros donde se introducirá la mezcla de fango tratado después de digestión y el purín.

Dispone de 4 salidas o entradas:

- 1 salida o entrada que permite introducir purín o sacar muestra para su posterior análisis.
- 1 salida que corresponde al tubo colector de gas.
- 2 salidas que permanecerán cerradas ya que se trata de mantener el reactor anaerobio herméticamente cerrado.

Para la producción de biogás es necesario calentar el reactor, por lo que se introduce en una cubeta llena de agua hasta cubrirlo, provista de unas resistencias. Así se puede mantener una temperatura constante que se controla con un termómetro.

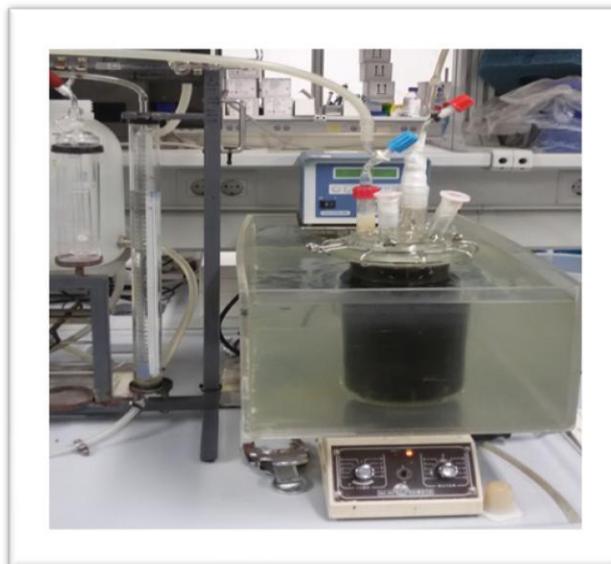


Imagen 4.1.1: Reactor anaerobio.

- Equipo de ORSAT:

Es un analizador de gases usado para determinar la composición de los gases obtenidos. Durante un análisis una muestra es pasada a través de líquidos absorbentes que separan componentes específicos.

El volumen del gas es medido antes y después de la absorción. La disminución en el volumen del gas representa la cantidad del componente que estuvo presente. Los volúmenes del gas son medidos a temperatura y a presión constante.

Dicho aparato consiste en una bureta graduada de cien mL, con escala de cero a cien, y rodeada por un cilindro lleno de agua, con el objeto de mantener la temperatura del gas. La bureta está conectada por su parte inferior por medio de un tubo de goma a un frasco nivelador lleno de agua, y en su parte superior a cuatro recipientes dobles que contienen sustancias apropiadas para absorber los gases objeto de la medición:

- Dióxido de carbono, absorbido por hidróxido de potasio (KOH)
- Oxígeno, absorbido por ácido pirogálico o solución alcalina de pirogalol ($C_6H_6O_3$)
- Monóxido de carbono, absorbido por una solución ácida de cloruro cuproso (CuCl)
- El cuarto tubo es un frasco de seguridad.

Cada uno de los recipientes tiene una válvula que permite el paso y la salida del gas que es objeto de análisis. De este modo las válvulas que miden oxígeno y monóxido de carbono permanecerán cerradas y sólo se utilizará la válvula correspondiente al dióxido de carbono, ya que el biogás está formado fundamentalmente por dióxido de carbono y metano y por ello sólo se usará el aparato de ORSAT para cuantificar CO_2 .



Imagen 4.1.2: Aparato de ORSAT

- Centrífuga SIGMA 3-18 K:

Es un equipo que genera movimientos de rotación, para acelerar por fuerza centrífuga, la decantación o sedimentación de sus componentes. Generalmente es utilizada como proceso de separación de sedimentación de los componentes líquido y sólido.

En la cámara de la centrifuga (espacio físico donde se realiza el proceso de centrifugación), se encuentra el rotor donde se introducirán los tubos porta muestras (Imagen 4.1.4).

Para realizar una correcta centrifugación, es necesario colocar las cargas que tienen la misma masa o peso de forma opuesta en el rotor.

(Ver especificaciones en hoja técnica, Anexo I)



Imagen 4.1.3: Centrífuga



Imagen 4.1.4: Rotor de la centrifuga.

- pH-metro CRISON GLP 21+ :

El pH-metro es un sensor utilizado en el método electroquímico para medir el pH de una disolución.

Está formado por una varita de soporte del electrodo, de vidrio común y no conductor, que contiene el bulbo sensible (extremo sensible del electrodo) el cual está formado por un vidrio polarizable. (Ver especificaciones en hoja técnica, Anexo I)



Imagen 4.1.5: pH-metro.

- Conductímetro CRISON GLP 31+:

Es un aparato que mide la resistencia eléctrica que ejerce el volumen de una disolución encerrado entre los dos electrodos. (Ver especificaciones en hoja técnica, Anexo I)



Imagen 4.1.6: Conductímetro

- Termorreactores:

El termorreactor se emplea para la determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), el nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT). Estos instrumentos garantizan una digestión completa de la muestra, pues mantienen la alta temperatura de reacción durante la totalidad del lapso definido.

(Ver especificaciones en hoja técnica, Anexo I)



(a)



(b)

Imagen 4.1.7: Termoreactor marca VELP ECO 16 (a), marca MERCK TR 300(b).

- Espectrofotómetros:

Es un instrumento usado en análisis químico que sirve para medir, en función de la longitud de onda, la relación entre valores de una misma magnitud fotométrica relativos a dos haces de radiaciones y la concentración o reacciones químicas que se miden en una muestra. También es utilizado para la cuantificación de sustancias y microorganismos.



(a)



(b)

Imagen 4.1.8: Espectrofotómetro marca MERCK NOVA 30 (a), marca HACH DR 6000 (b)

- Destilador Kjeldahl SELECTA PRO-NITRO M:

Se utiliza para la determinación del contenido de nitrógeno en muestras orgánicas. El método consta de tres etapas:

- Etapa de **digestión**, donde se produce la descomposición del nitrógeno que contienen las muestras orgánicas utilizando una disolución de ácido concentrado. Esto se obtiene haciendo hervir la muestra en una concentración de ácido sulfúrico. El resultado es una disolución de sulfato de amonio.
- Etapa de **destilación**, donde se libera amoníaco, el cual es retenido en una disolución con una cantidad conocida de ácido bórico. Inicialmente se realiza una destilación con vapor por el método de arrastre de vapor de agua, mediante la cual acelera la obtención del destilado.
- Etapa de **titulación**, para valorar finalmente la cantidad de amonio presente en la muestra destilada.

(Ver especificaciones en hoja técnica, Anexo I)



Imagen 4.1.9: Destilador Kjeldahl.

- **Estufa SELECTA:**

Con temperaturas regulables desde 40°C hasta 250°C.



Imagen 4.1.10: Estufa



- Desecador:

Se utiliza para mantener limpia y deshidratada una sustancia por medio del vacío. Está fabricado con un vidrio muy grueso y en él se distinguen dos cavidades, la primera cavidad más grande y superior, permite poner a secar la sustancia, y la otra cavidad inferior se usa para poner el desecante, gel de sílice.



Imagen 4.1.11: Desecador

- Mufla Naberthem:

Una mufla es un horno destinado normalmente para la cocción de materiales cerámicos y para la fundición de metales a través de la energía térmica. Dentro del laboratorio un horno mufla se utiliza para calcinación de sustancias, secado de sustancias, fundición y procesos de control.

Una mufla es una cámara cerrada construida con materiales refractarios. Se compone de una puerta por la que se accede al interior de la cámara de cocción, en la que existe un pequeño orificio de observación. En el techo del horno se ubica un agujero por donde salen los gases de la cámara. Las paredes del horno mufla están hechas de placas de materiales térmicos y aislantes.

Este horno es utilizado cuando se requiere alcanzar temperaturas mayores a 200 °C. Es necesario mencionar que dentro del horno de mufla solamente puede utilizarse materiales de laboratorio refractarios (Por ejemplo: Un crisol de porcelana) , debido a las altas temperaturas que el horno puede alcanzar.



Imagen 4.1.12: Mufla.

- Balanza analítica KERN:

Objeto de laboratorio diseñado para medir pequeñas masas (120 gramos a 10 mg).

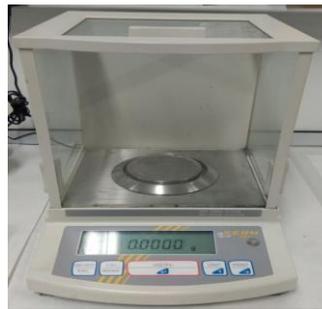


Imagen 4.1.13: Balanza analítica.

- Desecador:

Se utiliza para mantener limpia y deshidratada una sustancia por medio del vacío. Está fabricado con un vidrio muy grueso y en él se distinguen dos cavidades, la primera cavidad más grande y superior, permite poner a secar la sustancia, y la otra cavidad inferior se usa para poner el desecante, gel de sílice.



Imagen 4.1.11: Desecador

- Reactivos:

Los reactivos empleados para el desarrollo de la parte experimental son:

- Ácido clorhídrico 1M , PANREAC
- Ácido clorhídrico 0.1 M , VWR
- Hidróxido de potasio , J.T BAKER
- Sodio acetato anhidro, PANREAC
- Ácido bórico 4% , VWR
- NaOH 40% Panreac

- Kits:

Los kits empleados para realizar la parte experimental son los siguientes:

- Nitratos (N-NO₃) marca HACH
- DQO 1000-10000 ppm marca HACH
- DQO 150-1000 ppm marca HACH
- Dureza del agua marca HACH
- Fósforo marca MERCK
- Nitrógeno marca MERCK



(a)



(b)

Imagen 4.1.15: Kits marca HACH (a), marca MERCK (b).



4.2 Análisis de compuestos

4.2.1 Determinación del CO₂ en el biogás.

Para la determinación del CO₂ en el biogás se sigue el siguiente protocolo:

- Se calcula la cantidad a añadir de KOH para que la concentración sea 1M:

$$PM_{\text{KOH}} = 56 \text{ g/mol}$$

$$\frac{5.6 \text{ g}}{100 \text{ mL agua}} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{56 \text{ g}} \cdot \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} = \frac{1 \text{ mol}}{\text{L}}$$

Por tanto la cantidad necesaria es de $\frac{5.6 \text{ g KOH}}{100 \text{ mL agua}}$

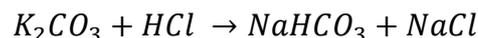
- A continuación se mide en el equipo de ORSAT el volumen generado de biogás (V_T) gracias a la bureta graduada de cien mL.

Se abre la llave de paso de la bureta que contiene el KOH de tal forma que se le permita el paso al biogás.

- Como el pH del KOH tiene un valor de casi 14, se ajusta el pH de la disolución con HCl 1M hasta que se alcance un pH de valor 12.
- A la disolución se añaden 2 gotas de fenolftaleína y se realiza una primera valoración con HCl 0.1 M hasta alcanzar el punto final, que se determinará mediante un cambio de color de la disolución de morado a incoloro.

Se tomará valor del HCl consumido (V_1)

La reacción que tiene lugar en esta primera valoración es la siguiente:

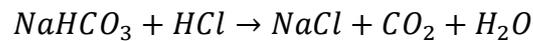


- Para finalizar se procede con una segunda valoración de nuevo con HCl 0.1M. En esta ocasión se añade a la disolución valorada anteriormente, 2 gotas de anaranjado de metilo, el cual proporcionará un cambio de color de amarillo a naranja intenso cuando se alcance el punto final.

Se tomará el valor de HCl consumido (V_2)



La reacción química que tiene lugar es la siguiente:



4.2.2 Determinación del pH

Para la determinación del pH se sigue el siguiente protocolo:

- Calibrar el pH-metro según las instrucciones del fabricante
- Introducir el electrodo de pH en la muestra que se desea analizar esperando a que se estabilice.

4.2.3 Determinación de la Conductividad

Para la determinación de la conductividad es necesario:

- Calibrar el conductímetro según las instrucciones del fabricante
- Introducir el electrodo en la muestra que se desea analizar esperando a que se estabilice.

4.2.4 Determinación del DQO soluble

Los pasos a realizar para la determinación de la DQO soluble son los siguientes:

- Agitar un tubo del kit DQO 150-1000 ppm en posición horizontal
- Añadir 2 mL de la muestra previamente filtrada
- Agitar de nuevo en posición horizontal
- Dejarlo 15 minutos en reposo e introducirlo al termoreactor marca MERCK durante 2 horas y a una temperatura de 148°C.
- Al sacarlo del termoreactor, agitar el tubo en posición horizontal
- Dejar que alcance temperatura ambiente y medirlo en el espectrofotómetro HACH.



4.2.5 Determinación del DQO total

Para la determinación de la DQO total, se siguió el siguiente protocolo:

- Agitar un tubo del kit DQO 1000-10000 ppm en posición horizontal
- Añadir 0.5 mL de la muestra sin filtración previa.
- Agitar de nuevo en posición horizontal
- Dejarlo 15 minutos en reposo e introducirlo al termoreactor marca MERCK durante 2 horas y a una temperatura de 148°C.
- Al sacarlo del termoreactor, agitar el tubo en posición horizontal.
- Dejar que alcance temperatura ambiente y medirlo en el espectrofotómetro HACH.

4.2.6 Determinación de la Dureza del agua

Para la determinación de la Dureza del agua, se siguió el siguiente protocolo:

- En un tubo del kit dureza del agua se añadieron 4 mL del reactivo A proporcionado por dicho kit.
- Agitar el tubo en posición horizontal
- Dejarlo reposar dos minutos
- Hacer lectura en el espectrofotómetro marca HACH
- Añadir 0.2 mL de la muestra
- Agitar el tubo en posición horizontal
- Dejarlo reposar 30 segundos y hacer lectura en el espectrofotómetro marca HACH
- Añadir 0.2 mL del reactivo B proporcionado por el kit
- Agitar el tubo en posición horizontal
- Dejarlo reposar 30 segundos y hacer lectura en el espectrofotómetro marca HACH

4.2.7 Determinación del Nitrógeno total (NT)

Para la determinación del NT, se siguió el siguiente protocolo:

- Pipetear 1 mL de la muestra en una cubeta redonda vacía
- Añadir a la pipeta 9 mL de agua.



- Añadir una microcucharada azul de N-1K proporcionado por el kit de nitrógeno.
- Añadir 6 gotas de N-2K proporcionado por el kit de nitrógeno, cerrar con la tapa roscada y mezclar.
- Calentar la cubeta de reacción durante 1 hora a 120°C en el termoreactor VELP
- Sacar la cubeta del termoreactor, dejarla enfriar hasta temperatura ambiente en el soporte para cubetas redondas.
- Pipetear 1 mL de la mezcla preparada en un tubo de ensayo del kit nitrógeno, no mezclar.
- Añadir a la pipeta 1 mL de N-3K proporcionado por el kit nitrógeno, cerrar con la tapa roscada y mezclar.
- Dejarlo en reposo reaccionando durante 10 minutos.
- Colocar la cubeta en el espectrofotómetro MERCK con la línea vertical frente al observador y tomar medida.

4.2.8 Determinación del Fósforo total (PT)

Para la determinación del PT, se siguió el siguiente protocolo:

- Pipetear 1 mL de la muestra en una cubeta de reacción del kit fósforo y mezclar.
- Añadir una dosis de P-1K proporcionado por el kit fósforo, con el dosificador verde, cerrar con la tapa roscada.
- Calentar la cubeta de reacción durante 30 minutos a 120°C en el termoreactor VELP
- Sacar la cubeta del termoreactor, dejarla enfriar en el soporte hasta temperatura ambiente.
- Añadir 5 gotas de P-2K proporcionado por el kit fósforo, cerrar con la tapa roscada y mezclar.
- Añadir una dosis de P-3K, proporcionado por el kit, con el dosificador azul, cerrar con la tapa roscada.
- Agitar intensamente la cubeta para disolver la sustancia sólida.
- Dejarlo en reposo reaccionando durante 5 minutos.
- Colocar la cubeta en el espectrofotómetro MERCK con la línea vertical frente al observador y tomar medida.



4.2.9 Determinación N-NO₃ (nitratos)

Para la determinación de los nitratos, se siguió el siguiente protocolo:

- En un tubo del kit nitratos, añadir 0.2 mL de la muestra
- Añadir 1 mL del reactivo A proporcionado por el kit
- Agitar el tubo en posición horizontal
- Dejar reposar durante 15 minutos y hacer la lectura en el espectrofotómetro marca HACH

4.2.10 Determinación N-NH₄. Método Kjeldahl

Para la determinación del Nitrógeno amoniacal, se utiliza el método Kjeldahl.

Como reactivos se emplearon: NaOH 40% , Ácido Bórico 4% HCl 0.1 M, indicador.

En primer lugar se procede con el calentamiento del destilador Kjeldahl: se introducen 25 mL de agua de resina en un recipiente cilíndrico. Posteriormente se calienta haciendo uso del botón steam.

Para la realización del blanco se introducen 25 mL de agua de resina en el recipiente cilíndrico. Por otro lado, se introducen 50 mL de ácido bórico mas 5 gotas de indicador mixto 5 en un Erlenmeyer. Se presiona el botón de steam.

Posteriormente se realiza un análisis de la muestra: en el recipiente cilíndrico se introducen 25 mL de agua de resina y 5 gramos de muestra (calculados por pesada en la balanza). En un Erlenmeyer se introducen 50 mL de ácido bórico y 5 gotas de indicador. Una vez colocados dentro del destilador se pulsan los botones steam y NaOH.

Finalmente se llevan a cabo las valoraciones del blanco y de la muestra: se valoran los Erlenmeyer del blanco y de la muestra con HCl 0.1 M hasta que se produzca un cambio de color a rosa oscuro.

Para calcular la cantidad en ppm de N-NH₄ en la muestra, se hace uso de la siguiente ecuación:

$$\frac{(V_{HCl} - V_{blanco}) \cdot M_{HCl} \cdot PM_N}{V_{muestra}} \quad (I)$$



Siendo:

V_{HCl} = volumen de HCl consumido en la valoración de la muestra en L

V_{blanco} = volumen de HCl consumido en la valoración del blanco en L

M_{HCl} = molaridad del HCl en mol/L

PM_{N} = peso molecular del N en g/mol

V_{muestra} = volumen exacto empleado de la muestra por pesada en L

4.2.11 Determinación de sólidos totales y volátiles

El procedimiento empleado para la determinación de los sólidos totales y volátiles es el siguiente:

- En primer lugar se pesa un crisol vacío.
- Se añade al crisol 50 mL de muestra y se pesa en la balanza analítica.
- Se introduce en la estufa 24 horas y posteriormente 30 min en el desecador.
- Se pesa el crisol.
- Se introduce en la mufla 1 hora a 550°C y posteriormente 30 min en el desecador.
- Se pesa el crisol.

Para calcular la cantidad de sólidos volátiles y de sólidos totales, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$ST = \frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0} \quad (II)$$

$$SV = \frac{P_2 - P_3}{P_1 - P_0} \quad (III)$$

Siendo:

P_0 = peso del crisol vacío en gramos.

P_1 = peso del crisol con los 50 mL de muestra.

P_2 = peso del crisol después de estufa y desecador.

P_3 = peso del crisol tras mufla y desecador.



Este procedimiento se realiza dos veces y se toma como resultado la media de los dos valores.

4.3 Desarrollo experimental

Se pretende realizar un tratamiento de purines porcinos, con el fin de estudiar la biometanización por eliminación de DQO (demanda química de oxígeno), midiendo el gas generado.

En primer lugar se realizó una caracterización del fango digerido de depuradora y del purín a tratar. Además fue necesario conocer los parámetros de diseño por lo que se determinó el tiempo de retención hidráulico (TRH) dando un resultado de 28 días.

4.3.1 Puesta en marcha o aclimatización del fango.

Los factores más importantes que determinan el funcionamiento de un digestor anaerobio son: la uniformidad de la mezcla, la temperatura y el pH.

Para el proceso de producción de biogás, son necesarias unas condiciones de alrededor de 40°C y un pH en torno a 7.

En primer lugar se introdujeron en el reactor 1750 mL de fango y se ajustó su pH inicial (pH de 7.59), mediante la adición con cuentagotas de HCl 1 M (30 mL), hasta conseguir un pH en torno a 7 (exactamente de 7.14).

Posteriormente, se introdujeron en el reactor 250 mL de purín poco a poco mediante la ayuda de una jeringuilla.

Se introdujo el reactor en el baño de agua osmotizada (provisto de resistencias), de tal forma que ésta cubriera la totalidad de la mezcla, y se mantuvo a una temperatura de alrededor de 40°C. Fue necesario ir rellenando el baño, ya que el agua se iba evaporando, y el nivel óptimo de agua se consigue cuando ésta cubre toda la mezcla del reactor.

A su vez, el baño de agua osmotizada, que contiene al reactor, se encontraba colocado encima de una placa magnética, de tal forma que se introdujo dentro del reactor un agitador magnético para que la mezcla se mantuviera en constante agitación.

A partir de aquí, se llevó un seguimiento diario de la cantidad de biogás generada, así como de los factores que afectaron a su producción.



Se realizó un análisis de la cantidad de CO₂ y CH₄ generados, obteniéndose unos valores de:

$$\text{CO}_2 = 56.57 \%$$

$$\text{CH}_4 = 43.43 \%$$

4.3.2 Método de análisis

Dos días a la semana se extrajeron 250 mL de muestra para realizar un análisis, y se alimentó con 250 mL de purín. El análisis se realizó a partir del clarificado ya que, de este modo, se analiza todo lo soluble y se evita la decantación y, por otro lado, se aseguraba de que los valores de concentración entraban dentro de los rangos establecidos por los kits.

La muestra se introducía en la centrífuga a 10000 rpm y 16 minutos y, posteriormente, el clarificado se filtraba con papel de filtro.

Además, en algunos procedimientos era necesario diluir el clarificado para que fuera analizable por los kits, es decir, que la concentración entrara dentro de los límites establecidos por cada kit. Los parámetros a analizar con el clarificado de la muestra y las diluciones pertinentes, fueron los siguientes:

- pH (procedimiento 4.2.2)
- Conductividad (procedimiento 4.2.3)
- DQO soluble 1/2 (procedimiento 4.2.4)
- Dureza del agua 1/3 (procedimiento 4.2.6)
- Nitrógeno total 1/10 (procedimiento 4.2.7)
- Fósforo total 1/3 (procedimiento 4.2.8)
- N- NO₃ (procedimiento 4.2.9)
- N-NH₄ (procedimiento 4.2.10)
- Sólidos totales y volátiles (procedimiento 4.2.11)

El parámetro más importante del que hay que llevar seguimiento es la DQO. Por ello también se analizó dicho parámetro directamente de la muestra, es decir, sin clarificar.

- DQO total 1/3 (procedimiento 4.2.5)



5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 Caracterización del fango de siembra y del purín y parámetros de diseño.

Los valores obtenidos de la caracterización del fango y del purín se muestran en las TABLAS 5.1.1 y 5.1.2.

TABLA 5.1.1: sólidos totales y volátiles del fango después de digestión.

Caracterización del fango	
ST (g/L)	2,43
SV (g/L)	1,60

TABLA 5.1.2: Caracterización del purín

PARÁMETROS	PURÍN 30/11/2015
NT (mg/L)	1270
N-NO3 (mg/L)	18,74
NO3 (mg/L)	82,99142857
PT (mg/L)	42
PO4-3 (mg/L)	103,8870968
DQO tot (mg/L)	5970
DQO sol (mg/L)	3910
Ca+2 (mg/L)	129,6
Mg+2 (kit dureza) (mg/L)	43,6
°dH	25,59
N-NH4 (mg/L)	1224,08
pH	8,04
Conductividad (mS/cm)	13,1
ST (g/L)	10,04
SV (g/L)	5,95



En cuanto a la determinación de los parámetros de diseño, el tiempo de retención hidráulico (THR) se define como:

$$THR = \frac{V_{reactor}}{Q_{alim}} \quad (IV)$$

Siendo:

$V_{reactor}$ = volumen del reactor anaerobio

Q_{alim} = caudal de alimentación

De este modo, el reactor tiene una capacidad de 2 litros y, por otro lado, se introdujo 500 mL de alimento en 7 días. En este caso se alimentó el reactor 2 veces por semana con 250 mL.

$$THR = \frac{2000 \text{ mL}}{500 \text{ mL} / 7 \text{ días}} = 28 \text{ días}$$

El tiempo de retención hidráulico es de 28 días.

5.2 Producción de biogás

Los resultados obtenidos de producción de biogás durante los 28 días, se detallan en la siguiente tabla (TABLA 5.2.1):

TABLA 5.2.1: cantidad de biogás generada.

Número de días	Volumen (mL)
1	156
2	160
2 al 6	62
6 al 8	47
9	61
10	76
10 al 15	77
16	25
16 al 28	35
Total	699

Como se observa en la tabla anterior (TABLA 5.2.1), a partir del día 2, la generación de biogás fue escasa. Haciendo un análisis de la situación se vió que el pH no se mantenía en torno a 7, sino que tendía a subir, por lo que se adoptaron una serie de variaciones en el experimento.

A continuación se muestra un gráfico (Gráfico 5.2.1) con la producción de biogás durante el desarrollo del experimento.

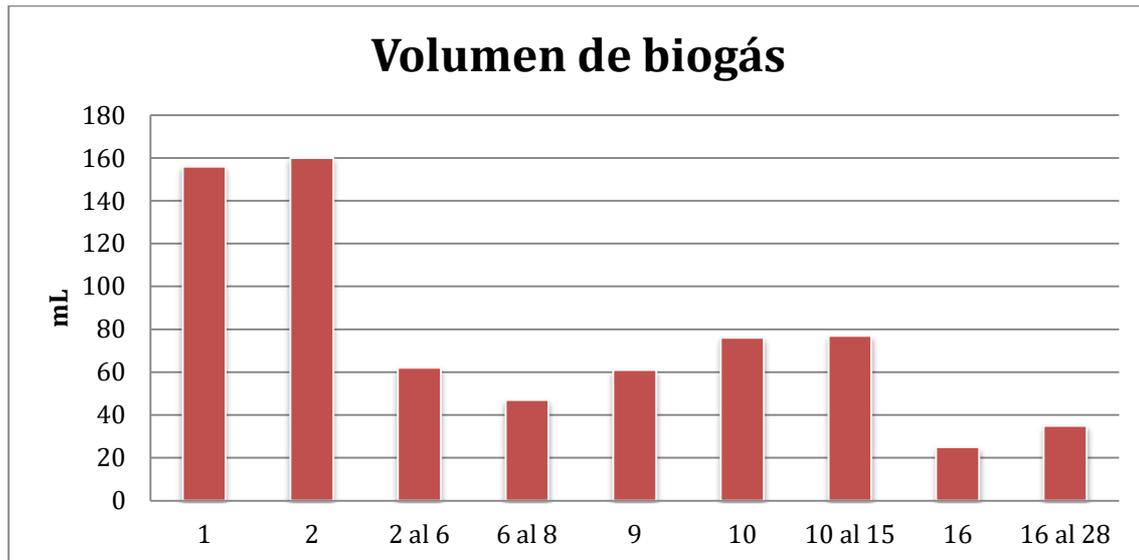


Gráfico 5.2.1: Producción de biogás.

Modificaciones en la alimentación:

La primera solución propuesta fue ir acidificando el alimento mediante la adición y regulación de HCl, esperando a que se estabilizara y que la producción de biogás fuera mayor.

Del día 2 al 8, el resultado siguió siendo el mismo (TABLA 5.2.1), el pH no se mantuvo neutro y siguió sin generarse apenas biogás.

Esta situación llevó a la siguiente hipótesis: quizás se debiera a elevadas cantidades de amonio ($N-NH_4$), que causaba la inhibición del proceso de digestión subiendo el valor del pH y por tanto, impidiendo la formación de las bacterias metanógenas. En este caso la solución propuesta fue recargar el reactor, en vez de con purín, con otro reactivo que tuviera materia orgánica pero careciera de nitrógeno amoniacal. El reactivo usado fue AcNa (sodio acetato anhidro).



Se calculó la cantidad necesaria que hubo que añadir de reactivo AcNa:

Sabiendo que:

- Una concentración de AcNa de 400 mg/L aporta una DQO de 300 mg/L
- El purín de partida tiene una DQO de 3910 mg/L
- En cada alimentación introducimos 250 mL de purín

Por tanto, la DQO que queremos añadir es de:

$$DQO = 3910 \frac{mg}{L} \cdot 0.250L = 977.5 \text{ mg DQO}$$

De este modo, la cantidad de AcNa que hubo que añadir fue de:

$$\frac{977.5 \text{ mg DQO} \cdot 400 \frac{mg \text{ AcNa}}{L}}{300 \frac{mg \text{ DQO}}{L}} = 1303 \text{ mg AcNa}$$

Se empezó a generar más biogás después de alimentar el reactor con AcNa (día 9, TABLA 5.2.1) por lo que el día 10 se hizo un análisis de la cantidad generada de CO₂ (procedimiento 4.2.1):

$$V_T = 76 \text{ mL}$$

$$V_1 = 24.5 \text{ mL}$$

$$V_2 = 10.6 \text{ mL}$$

Sabiendo que:

$$m_{eq}HCl = m_{eq}K_2CO_3$$
$$(V_1 + V_2) \cdot N = \frac{g \text{ K}_2\text{CO}_3}{P_{eq} \text{ K}_2\text{CO}_3} = \frac{g \text{ K}_2\text{CO}_3}{PMK_2CO_3 / 2}$$

Sustituyendo datos:

$$(24.5 + 10.6)mL \cdot \frac{1L}{1000 mL} \cdot 0.1 = \frac{g \text{ K}_2\text{CO}_3}{\frac{138.205 \text{ g/mol}}{2}}$$



Despejando:

$$g K_2CO_3 = 0.2425$$

Calculamos los moles de K_2CO_3 :

$$\frac{0.2425 g K_2CO_3}{138.205 g/mol} = 1.755 \cdot 10^{-3} \text{ moles } K_2CO_3$$

$$\text{moles } K_2CO_3 = \text{moles } CO_2$$

Haciendo uso de la ley de los gases ideales y teniendo en cuenta condiciones normales (1atm y 25°C):

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (V)$$

Sustituyendo:

$$1 \text{ atm} \cdot V = 1.755 \cdot 10^{-3} \text{ moles } CO_2 \cdot 0.082 \frac{\text{atm} \cdot L}{\text{mol} \cdot K} \cdot 298 K$$

Despejando:

$$V_{CO_2} = 43 \text{ mL } CO_2$$

A continuación se calculó el porcentaje de CO_2 usando la siguiente ecuación:

$$\% CO_2 = \frac{100 \cdot V_{CO_2}}{V_T} \quad (VI)$$

Sustituyendo:

$$\% CO_2 = \frac{100 \cdot 43 \text{ mL}}{76 \text{ mL}} = 56.57\%$$



Suponiendo que el biogás está compuesto por dióxido de carbono y metano, el porcentaje de metano generado fue:

$$\% CH_4 = 43.43\%$$

A pesar de haberse generado más biogás con la primera recarga de AcNa (día 9), tras la segunda recarga (día 13), volvió a apenas generarse biogás. Por ello se optó por otra solución, la tercera modificación:

Al añadir AcNa como reactivo no se daban nutrientes a la mezcla por lo que esta vez, se añadió de nuevo purín pero previamente liberando el amonio que contiene y formando amoníaco ($NH_4 \rightarrow NH_3$). Para ello se subió el pH a 10 de los 250 mL de purín que se usaron para recargar.

Se comprobó si se había liberado el amonio midiendo el purín a pH=10 con el destilador. El resultado fue el siguiente:

La cantidad de nitrógeno amoniacal después de liberarlo fue de 768,93 mg/L, mientras que la cantidad de nitrógeno amoniacal inicial fue de 1224,08 mg/L

Esta medida se utilizó del día 16 al 20 y, como se aprecia de nuevo en la TABLA 5.2.1, apenas se generó biogás.

A partir del día 23, se optó por seguir con la dinámica inicial, es decir, alimentando la mezcla con el purín inicial hasta que concluyera el TRH (día 28).

A pesar de que la generación de biogás no fue la deseada, se calcularon los valores de producción mínimo y máximo de biogás durante todo el proyecto.

Se sacaron los valores a partir de los datos obtenidos en el día que se midió la generación de biogás. De este modo:

Para 76 mL de biogás generado (día 10), la DQO que se eliminó fue de:

$$(DQO_{inicial} - DQO_{final}) \cdot V_{alimentación}$$
$$\left(1656 \frac{mg}{L} - 1230 \frac{mg}{L}\right) \cdot 0.5 L = 213 mg DQO$$

$$\frac{76 mL biogás}{213 mg DQO} = 0.35 \cdot 10^{-3} \frac{L biogás}{mg DQO elim}$$

Para esa DQO eliminada se generó un $\% CO_2 = 56.57$, por tanto:



Producción máxima de biogás (día 1 a 6):

$$0.35 \cdot 10^{-3} \frac{L \text{ biogás}}{mg \text{ DQO elim}} \cdot (3910 - 1594) \frac{mg \text{ DQO}}{L} \cdot 0.5 L = 0.40 L \text{ biogás}$$

$$\% CO_2 = \frac{100 \cdot V_{CO_2}}{V_T}$$

$$56.57 = \frac{100 \cdot V_{CO_2}}{0.4} = 0.226 L CO_2$$

$$V_{CO_2} = 226 \text{ mL } CO_2$$

Producción mínima de biogás (día 13 a16):

$$0.35 \cdot 10^{-3} \frac{L \text{ biogás}}{mg \text{ DQO elim}} \cdot (1230 - 1224) \frac{mg \text{ DQO}}{L} \cdot 0.5 L = 0.00105 L \text{ biogás}$$

$$\% CO_2 = \frac{100 \cdot V_{CO_2}}{V_T}$$

$$56.57 = \frac{100 \cdot V_{CO_2}}{0.00105} = 0.00059 L CO_2$$

$$V_{CO_2} = 0.59 \text{ mL } CO_2$$

TABLA 5.2.2: Producciones máxima, media y mínima de biogás.

BIOGÁS	V CO2 (mL)	V CH4 (mL)
Producción máxima	226	174
Producción media	43	33
Producción mínima	0,59	0,46



5.3 Parámetros de diseño (DQO, ST, SV, pH, conductividad, NT, PT, N-NO₃, N-NH₄, dureza del agua)

En cuanto al análisis de la muestra, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla (TABLA 5.3.1) (Cálculos en ANEXO II):



TABLA 5.3.1: Resultados de los análisis de la muestra.

PARÁMETROS	DÍA 6	DÍA 9	DÍA 13	DÍA 16	DÍA 20	DÍA 23	DÍA 26	DÍA 28
pH	7,94	7,85	7,83	7,87	7,75	7,64	7,82	7,54
Conductividad (mS/cm)	15,23	15,75	13,62	13,63	14,33	16,55	15,48	16,2
DQO tot (mg/L)	18525	15810	12495	11310	9144	9384	3717	8781
DQO sol (mg/L)	1594	1656	1230	1224	1194	1290	1359	1551
Ca+2 (mg/L)	274,2	267,9	243,9	215,1	214,5	191,7	195,6	179,4
Mg+2 (kit dureza) (mg/L)	90,3	88,2	73,8	64,2	61,2	49,2	52,2	56,1
°dH	59,4	57,9	51,3	45	44,1	38,4	39,6	38,1
NT (mg/L)	690	440	550	550	470	410	850	1020
PT (mg/L)	28,5	36,9	33,9	33	32,1	36,6	36,6	45,9
N-NO3 (mg/L)	4,85	4,6	4,41	3,92	4,56	5,77	6,81	7,34
N-NH4 (mg/L)	1374,39	1292,00	1148,47	1193,61	990,00	878,39	1103,74	986,55
ST (g/L)	2,03	1,34	1,56	1,49	1,44	0,90	1,37	0,78
	2,03	1,27	1,57	1,51	1,48	2,05	1,35	0,77
	2,03	1,30	1,57	1,50	1,46	1,48	1,36	0,78
SV (g/L)	1,09	1,08	0,81	0,81	0,80	0,69	0,58	0,25
	1,09	1,06	0,82	0,83	0,79	0,67	0,55	0,24
	1,09	1,07	0,81	0,82	0,79	0,68	0,57	0,24



La evolución de los distintos parámetros se muestra en las siguientes gráficas:

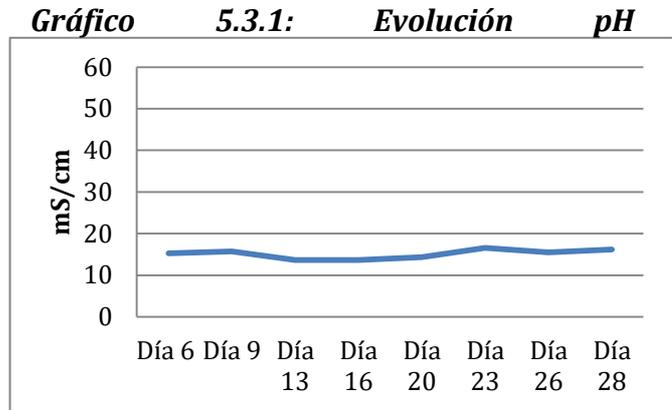
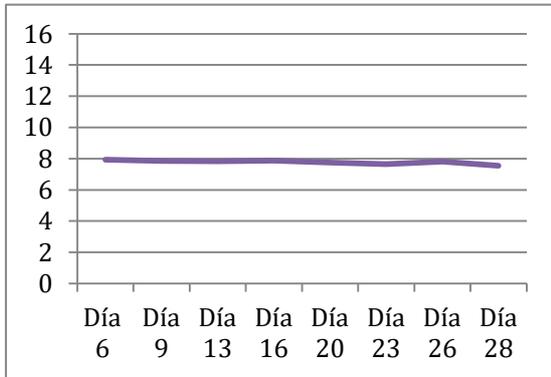


Gráfico 5.3.2: Evolución conductividad

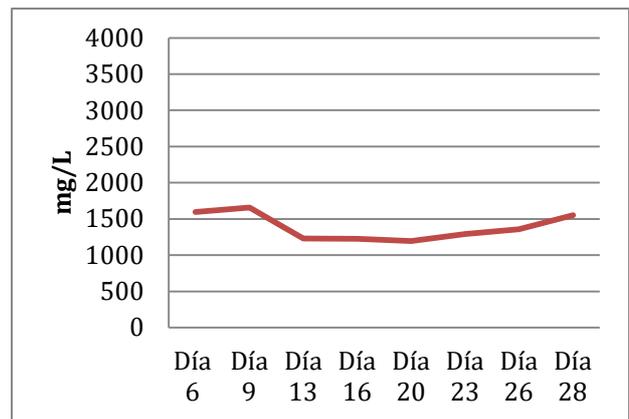
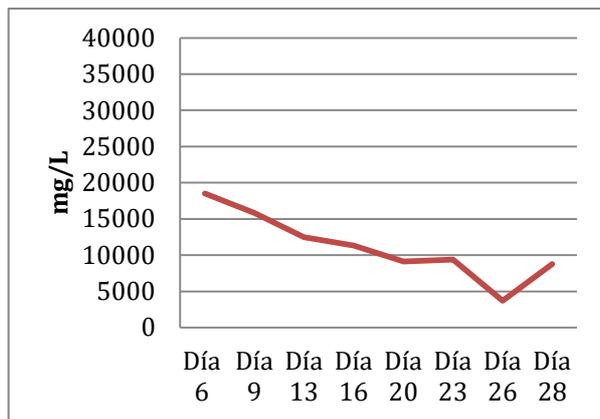


Gráfico 5.3.3: Evolución DQO total

Gráfico 5.3.4: Evolución DQO soluble

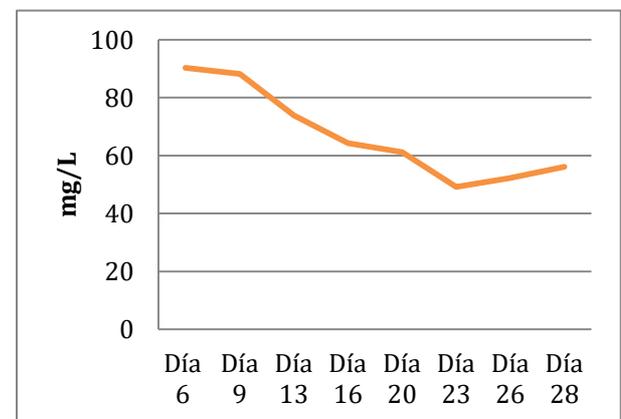
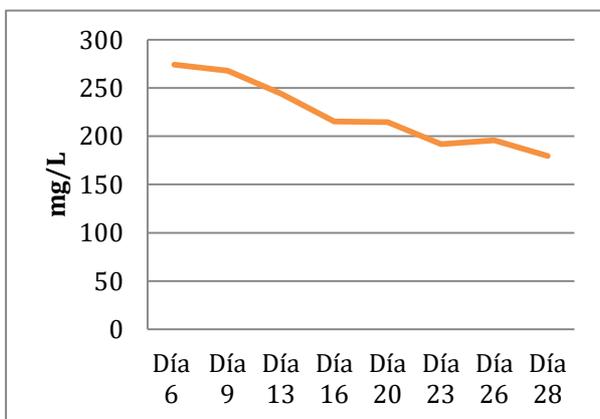


Gráfico 5.3.5: Evolución Ca+2

Gráfico 5.3.6: Evolución Mg+2

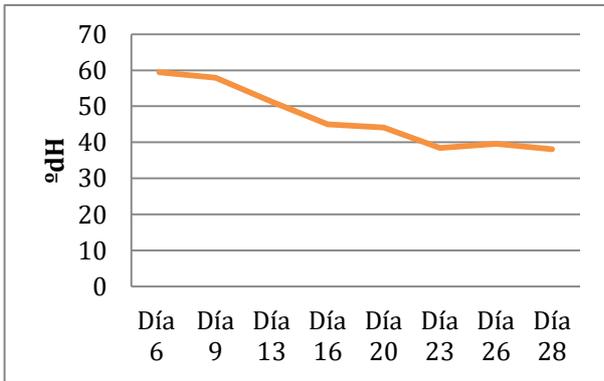


Gráfico 5.3.7: Evolución °dH

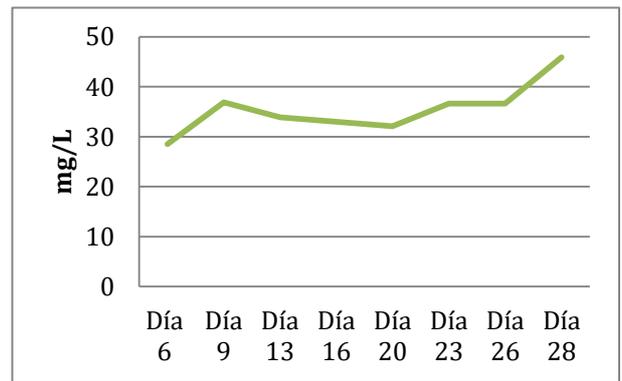


Gráfico 5.3.8: Evolución PT

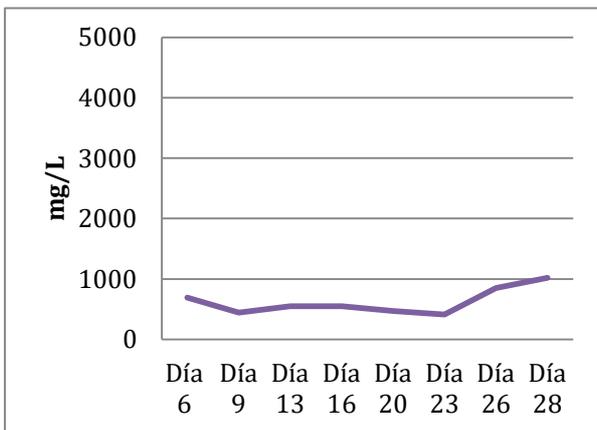


Gráfico 5.3.9: Evolución NT

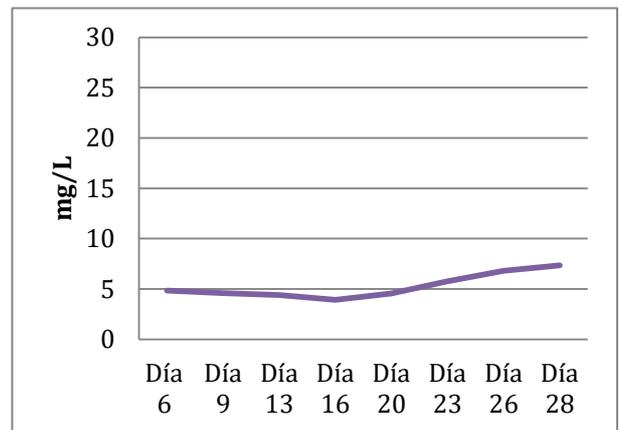


Gráfico 5.3.10: Evolución N-NO3

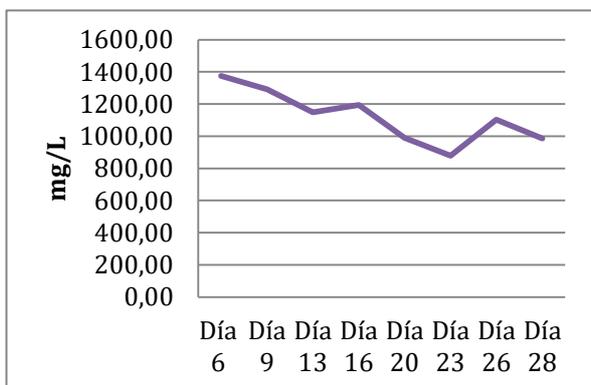


Gráfico 5.3.11: Evolución N-NH4

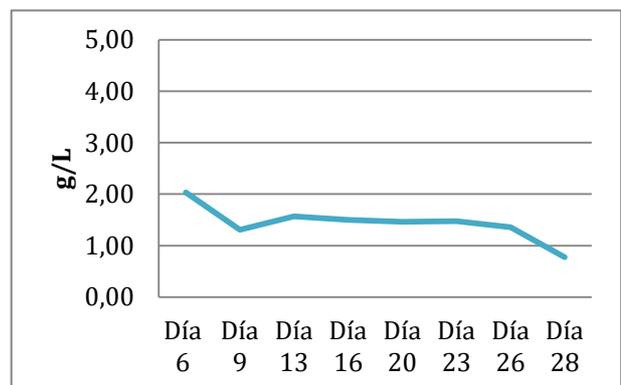


Gráfico 5.3.12: Evolución ST

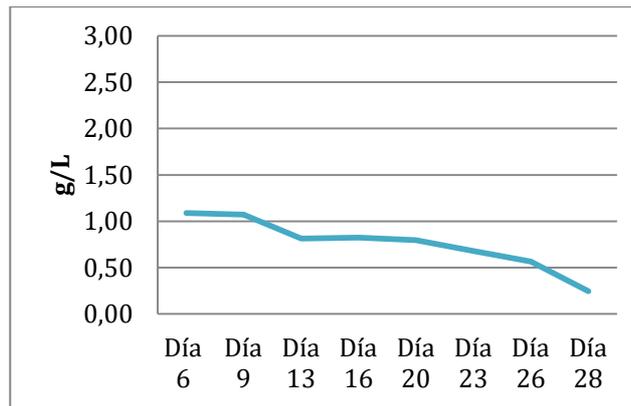


Gráfico 5.3.13: Evolución SV

Se observa que el contenido en materia orgánica disminuyó (DQO) así como los sólidos totales y volátiles por lo que el objetivo de depuración, producido por el tratamiento de reactor anaerobio, se cumple.

El porcentaje de reducción de DQO soluble del último día respecto al valor obtenido en el purín inicial (TABLA 5.2) se muestra a continuación:

$$\% \text{ reducción DQO soluble: } \left(\frac{3910 - 1551}{3910} \right) \cdot 100 = 60,33\%$$

En cuanto a los sólidos totales y volátiles, el porcentaje de reducción respecto al purín inicial (Tabla 5.1.2) fue el siguiente:

$$\% \text{ reducción ST: } \left(\frac{10,04 - 0,78}{10,04} \right) \cdot 100 = 92,23\%$$

$$\% \text{ reducción SV: } \left(\frac{5,95 - 0,24}{5,95} \right) \cdot 100 = 95,96\%$$

Además, se observa que los parámetros correspondientes a la dureza del agua (Ca^{+2} , Mg^{+2} , °dH) disminuyeron en relación a la primera muestra (Gráfico 5.3.5, Gráfico 5.3.6 y Gráfico 5.3.7)

La conductividad se mantuvo mas o menos constante en todo el experimento (Gráfico 5.3.2) mientras que el pH se elevó ligeramente, el cual, se debería haber



mantenido neutro pero, como se ha comentado anteriormente, por alguna razón aumentó, quizás por la presencia de nitrógeno amoniacal.

El fósforo no disminuyó, al igual que el nitrógeno total, el cual era de esperar que no se redujera, ya que es uno de los principales inconvenientes del tratamiento empleado (digestión anaerobia).

Por otro lado, el nitrógeno amoniacal descendió notablemente (Gráfico 5.3.11). En relación al purín inicial (Tabla 5.1.2), la reducción fue de:

$$\% \text{ reducción } N - NH_4: \left(\frac{1224.08 - 986.55}{1224.08} \right) \cdot 100 = 19,40\%$$

En general, los parámetros descendieron, es decir, el purín se depuró, por lo que se puede concluir que el experimento finalizó satisfactoriamente en cuanto a reducción de parámetros. Además, el parámetro más importante es la DQO y se produce un alto porcentaje de eliminación respecto a la del purín inicial.

A continuación se muestran en la TABLA 5.3.2 los porcentajes de eliminación de los parámetros del purín.

TABLA 5.3.2: Porcentaje de eliminación de los parámetros del purín

PARÁMETRO	% REDUCCIÓN
DQO soluble	60,33
ST	92,23
SV	95,96
N-NH4	19,4



6. PLANTA PILOTO

Para este diseño se considera una granja de 1000 cerdos y una emisión por cerdo de 5 L de purín. El tiempo de retención hidráulico será el mismo que el obtenido experimentalmente, es decir, 28 días.

De acuerdo con estos datos se procede con el diseño de la planta piloto:

Datos:

1000 cerdos

5 L de purín por cerdo = 0.005 m³ purín por cerdo al día.

TRH = 28 días

7.1 Cálculos

Acorde a los datos, la cantidad de purín generada al día (Q) será de:

$$Q = 0.005 \frac{m^3 \text{ purín}}{\text{día} \cdot \text{cerdo}} \cdot 1000 \text{ cerdos} = 5 \frac{m^3 \text{ purín}}{\text{día}}$$

A continuación se calcula el volumen del reactor (VR):

$$VR = Q \cdot TRH$$

$$VR = 5 \frac{m^3 \text{ purín}}{\text{día}} \cdot 28 \text{ días} = 140 m^3$$

Se considera que el purín tiene unas características iniciales iguales que las utilizadas para el desarrollo experimental. Se detallan a continuación en la siguiente tabla (TABLA 6.1.1)

TABLA 6.1.1: Características iniciales del purín.



PARÁMETROS	PURÍN
DQO sol (mg/L)	3910
N-NH ₄ (mg/L)	1224,08
ST (g/L)	10,04
SV (g/L)	5,95

Por tanto, para una granja de 1000 cerdos y con una producción cada cerdo de 5 L de purín, la cantidad de cada parámetro es la siguiente:

TABLA 6.1.2: Características purín en una granja de 1000 cerdos y con una producción por cerdo de 5 L de purín.

PARÁMETROS	PURÍN
DQO sol (kg/día)	19,55
N-NH ₄ (kg/ día)	6,12
ST (kg/ día)	50,2
SV (kg/ día)	29,7

Teniendo en cuenta los porcentajes de reducción obtenidos en el laboratorio para cada parámetro (TABLA 5.3.2), la reducción de cada parámetro a escala real es:

DQO soluble:

$$DQO = 19,55 \frac{kg}{día} \cdot 0,6033 = 11,8 \frac{kg}{día}$$

N-NH₄ :

$$N - NH_4 = 6,12 \frac{kg}{día} \cdot 0,194 = 1,19 \frac{kg}{día}$$

ST:

$$ST = 50,2 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,9223 = 46,30 \frac{kg}{m^3}$$

SV:



$$SV = 29,7 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,9596 = 28,50 \frac{kg}{m^3}$$

Por último se procede a calcular el volumen total de biogás que se generará en el diseño, partiendo de los datos obtenidos en el laboratorio:

En 2000 mL de purín se generan 699 mL de biogás en un tiempo de 28 días.

Volumen de biogás generado en el laboratorio:

$$V = \frac{0,699 \text{ L biogás}}{28 \text{ días}} = 0,025 \frac{\text{L biogás}}{\text{día}} = 0,025 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}}$$

Cantidad de DQO eliminada al día en el laboratorio:

$$DQO_{elim} = Q \cdot DQO$$

$$DQO = \frac{0,5 \text{ L}}{7 \text{ días}} \cdot (3910 - 1551) \frac{\text{mg DQO}}{\text{L}} = 168,5 \frac{\text{mg DQO}_{elim}}{\text{día}}$$

De este modo, la cantidad de biogás generada por cantidad de DQO eliminada es la siguiente:

$$\frac{0,025 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}}}{168,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g DQO}_{elim}}{\text{día}}} = 1,48 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{g DQO}_{elim}} = 0,148 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{kg DQO}_{elim}}$$

Haciendo la conversión, en nuestra planta piloto se generará la siguiente cantidad de biogás al día:

$$0,148 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{kg DQO}_{elim}} \cdot 11,8 \frac{\text{kg DQO}}{\text{día}} = 1,74 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}}$$



Teniendo en cuenta los datos obtenidos experimentalmente, que para 76 mL de biogás se produce un % CO₂ = 56,57%, el volumen de CO₂ generado en la planta piloto será de:

$$\% CO_2 = \frac{100 \cdot V_{CO_2}}{V_T}$$

$$56,57 = \frac{100 \cdot V_{CO_2}}{1,74 \text{ m}^3}$$

$$V_{CO_2} = 0.98 \text{ m}^3$$

Produciéndose por tanto un volumen de metano al día de: $V_{CH_4} = 0.76 \text{ m}^3$

Una composición de biogás de 70% metano y 30% CO₂ equivale a 6000 Kcal/m³ de biogás y, con esta composición, se obtienen las siguientes equivalencias con otras fuentes de energía (IDAE, 2007):

- 0.37 m³ de gas natural
- 4.21 KWh de electricidad
- 0.93 kg de madera
- 0.44 litros de fuel oil.
- 0.186 Kg de carbón
- 0.75 litros de alcohol combustible
- 0.5 litros de gasolina

Por tanto, para nuestra composición diaria de biogás de 43.43% metano y 56.57% CO₂, la producción corresponderá a 3722.57 Kcal/ m³ de biogás al día y, teniendo en cuenta que se generan 1,74 $\frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}}$, nuestra producción será de 6477,27 kcal /día. Obteniéndose por tanto, al final de los 28 días los siguientes resultados:

TABLA 6.1.1: Equivalencia de 6477,27 Kcal/día y en un total de 28 días, con otras fuentes de energía.

m3 de gas natural	18,13
KWh de electricidad	205,54
Kg de madera	45,34
Litros de fuel oil	21,46
Litros de alcohol combustible	36,27
Litros de gasolina	24,18



6.2 Descripción de la instalación

El proceso comienza cuando el purín de cerdo es transportado desde la granja, y llega a la planta de tratamiento en tractores con cisterna o camiones. Una vez se ha descargado el purín, pasa por un proceso de filtración que separará los sólidos de mayor tamaño, del purín que será el alimento del digestor.

Por otro lado, se añadirá fango digerido procedente de una EDAR a un tanque de almacenamiento, de donde se irá alimentando al digestor anaerobio.

El digestor de 150 m³, trabaja a una temperatura constante de alrededor de 40°C, gracias al intercambiador de placas externos y, se mantiene en constante agitación por el compresor, el cual recircula el propio biogás generado, evitando así la entrada de aire al reactor.

El biogás que se genera en el proceso de digestión, se almacena en un gasómetro antes de ser empleado en el motor.

El digestato se concentra por centrifugación y da lugar a una fracción líquida y una fracción sólida.

La gestión final de la fracción sólida, consiste en un secado térmico de la mezcla (el cual no es objeto de este TFG), produciendo vapor de agua y fertilizante en polvo. (Ver diagrama de bloques en ANEXO III)

Teniendo en cuenta que el principal objetivo del trabajo es la generación de biogás, a continuación se va a realizar un diseño del digestor anaerobio y del gasómetro empleado.

6.2.1. Diseño digestor anaerobio

Como ya se ha calculado previamente, el volumen del reactor es de 140 m³.

Según datos proporcionados por la empresa TADIPOL, S.L. (Barcelona), el digestor disponible para la instalación, que se adecúa a las características necesarias, es de 150 m³, cuyas medidas son 5 metros de diámetro y 7,7 metros de altura.

El digestor consta de un intercambiador de placas externos que utiliza agua como medio para calentar la mezcla, a una temperatura de 50°C.

Además dispone de un compresor que mantiene la mezcla en constante agitación, utilizando para ello, el biogás que se genera.

En el documento de Planos, como Plano I se muestra el diseño del digestor.



6.2.2 Diseño gasómetro

El gasómetro es el depósito cilíndrico que acumulará el biogás producido en la planta y tendrá capacidad para la totalidad del gas producido en un día.

El volumen del acumulador de biogás depende de la generación y consumo de éste. Para las necesidades de la planta será suficiente con acumular la producción total máxima de un día de producción.

El volumen generado al día de biogás, en nuestra planta piloto, con unas condiciones de $P = 1 \text{ atm}$ y $T = 38^\circ\text{C}$, es de: $1,74 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}}$

Haciendo uso de la ecuación de los gases ideales, se calcula el volumen para condiciones estándar: $T = 20^\circ\text{C}$ y $P = 1 \text{ atm}$. La presión total dentro del gasómetro será de $1,1 \text{ atm}$.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$1 \text{ atm} \cdot 1,74 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}} = n \cdot 0,082 \cdot 10^{-3} \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 311 \text{ K}$$

$$n = 68,23 \frac{\text{mol}}{\text{día}}$$

Pasando a condiciones estándar:

$$1,1 \text{ atm} \cdot V = 68,23 \frac{\text{mol}}{\text{día}} \cdot 0,082 \cdot 10^{-3} \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 293 \text{ K}$$

$$V = 1,5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Teniendo en cuenta que el gasómetro proporciona espacio suficiente para unas 12 horas de almacenamiento de biogás.

$$V_{\text{gasómetro}} = 1,5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot 12 \text{ horas} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} = 0,75 \text{ m}^3$$



El gasómetro se construirá en forma de cilindro, de forma que se fijará su diámetro en 1 m

A partir de la fórmula del volumen de un cilindro, se obtiene la altura del gasómetro:

$$V = h \cdot \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \quad (VII)$$

$$0,75 \text{ m}^3 = h \cdot \frac{\pi \cdot 1^2}{4}$$

$$h = 0,95 \text{ m}$$

TABLA 6.2.2.1: Dimensionamiento del gasómetro

	Altura (m)	Diámetro (m)	Volumen (m ³)
Gasómetro	1	1	0,75

En el documento de Planos, como Plano II se muestra el diseño del gasómetro.



6.3 Estudio económico

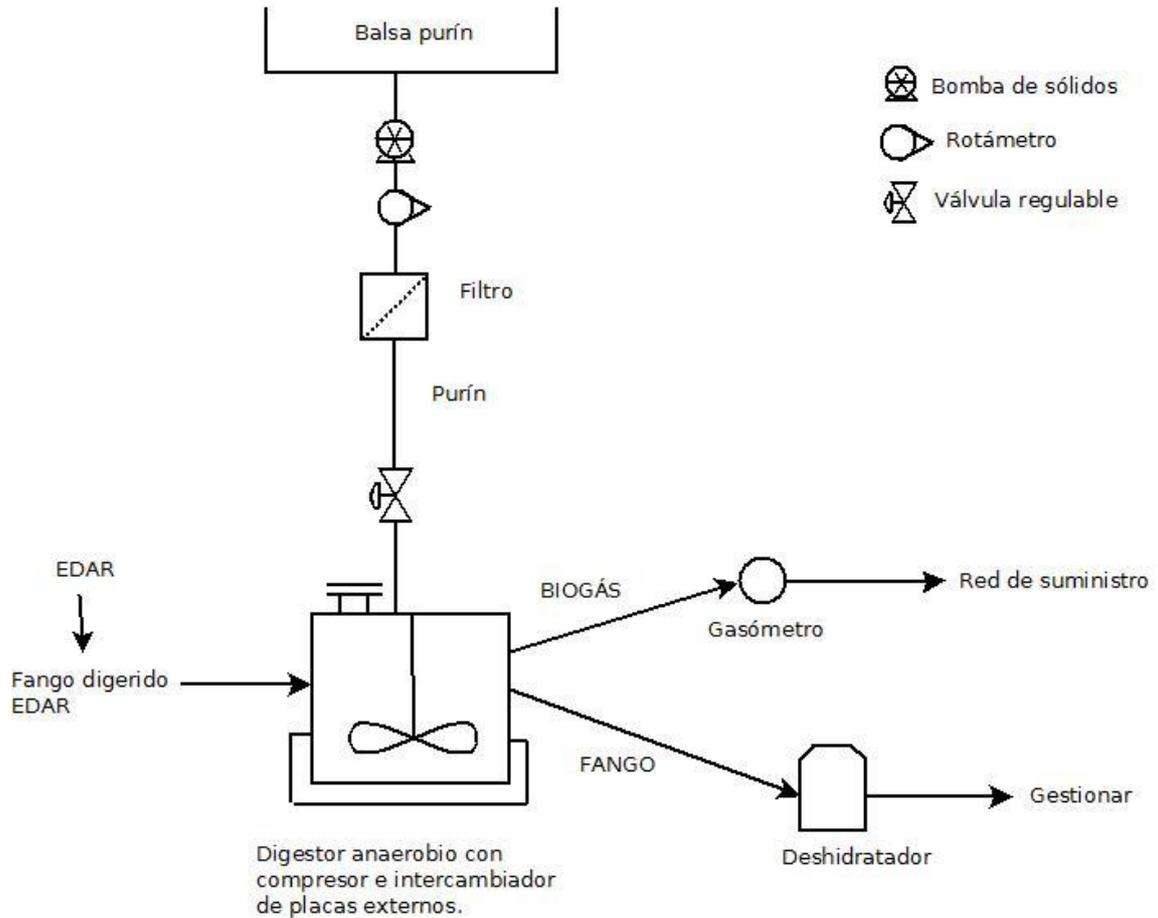
A continuación (TABLA 6.3.1) se realiza un estudio económico del material y equipo utilizados en el laboratorio para el experimento:

TABLA 6.3.1: Estudio económico del material utilizado en el laboratorio.

MATERIAL	DESCRIPCIÓN	PRECIO
Digestor anaerobio	Recipiente de 2 L. Tapa cerrada.	400 €
Equipo de Orsat	4 buretas. Pipeta graduada.	2.828 €
Centrífuga	Hasta 16 programas diferentes. Con motor de inducción	1.998 €
pH-metro	Rango de medición: -2 a 20 pH. Precisión: $\pm 0,002$ pH	1.147 €
Conductímetro	Rango de medición: 100-999 microS/cm. Precisión: $\pm 0,01$ microS/cm	1.721 €
Termorreactor	Presenta un modo temporización que puede ser programado por el usuario. Con temperatura de hasta 300 °C.	825 €
Espectrofotómetro	Para leer los ID de las muestras y los certificados de análisis.	4.131 €
Destilador Kjeldahl	Determinación del nitrógeno orgánico con valorador automático	9.111 €
Estufa	Para temperaturas regulables desde ambiente 5°C hasta 250°C. Apropiaada para procesos de secado.	2.107 €
Desecador	Con tapa botón. Capacidad 4000 mL. Con disco de porcelana	500 €
Mufla	Carcasa revestida en acero inoxidable. Salida de vapores en la parte posterior, se le puede conectar chimenea de evacuación.	1.990 €
Balanza analítica	Capacidad 220 gramos. Resolución 0.1 mg. Calibración interna.	1.051 €
Material de volumetría, densimetría...	Matraces, buretas, pipetas, tubos de ensayo, etc.	300 €
Reactivos	HCl 1M. Capacidad 1 L	25 €
	HCl 0,1 M. Capacidad 1 L	24 €
	Hidróxido de potasio. Capacidad 500 mL	18 €
	Ácido bórico. Capacidad 5 L	68 €
	NaOH 40%. Capacidad 1 L	39 €
	Sodio acetato anhidro. 500 gramos	43 €
Kits de análisis	Nitratos. De 5 a 35 mg/L de N-NO ₃	113 €
	DQO. De 15 a 150 mg/L de O ₂ .	93 €
	Dureza del agua. De 17,9 a 358 mg/L.	82 €
	Fósforo. De 0,5 a 5 mg/L.	114 €
	Nitrógeno. De 1 a 16 mg/L.	120 €
TOTAL		28.848 €

6.4 Diagrama de flujo de la instalación

A continuación se muestra un diagrama de flujo de la instalación correspondiente a la planta piloto.





7. CONCLUSIONES

Se ha comprobado por los ensayos de laboratorio que la generación de biogás producida por el purín ha sido aceptable, permitiendo su uso para la obtención de energía y, por consiguiente, transformando de esta manera un residuo como el purín en un producto valorizable.

El porcentaje de depuración ha sido elevado (superior al 50%) lo cual supone una reducción importante de la contaminación asociada al purín de cerdo.

Se ha diseñado una planta piloto, para una granja de 1000 cerdos, adecuándose a las características iniciales del purín usado en el laboratorio. El resultado ha sido satisfactorio, con una elevada depuración de los parámetros del purín y con un considerable nivel diario de producción de energía, que conllevaría a una serie de beneficios económicos.

Por tanto, se ha conseguido transformar una corriente inicialmente problemática, como es el purín de cerdo, un producto valorizable que, además, es capaz de generar energía y una corriente depurada menos perjudicial para el medio ambiente.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Flotats, X. et al. Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas. Centro UDL-IRTA y Generalitat de Catalunya. 2004.
- Iguácel, F.; Yagüe, M.R. Evaluación de costes de sistemas y equipos de aplicación de purín. Centro de Transferencia Agroalimentaria del Gobierno de Aragón. Informaciones Técnicas, núm. 178. 2007.
- IDEA. Biomasa: Digestores anaerobios. 2007.
- Martín, M.B. et al. Guía de mejores técnicas disponibles del sector porcino. 2006.
- Mendoza, J.A.; Querol S. Depuración biológica de aguas residuales. ETSII, Universidad Politécnica de Valencia. 2005.
- Steinfeld, H.; Gerber, P; Wassenaar, T.; V. Castel; Rosales, M.; De Haan, C. Livestock's long shadow. Informe Food and Agriculture Organization. FAO. 2006.
- Teira, M.R. Informe para la mejora de la gestión de los purines porcinos en Catalunya. Generalitat de Catalunya. 2008.
- Tratamiento mediante reactores anaerobios. Curso tratamiento de aguas residuales. 2002.



- Páginas web:

http://www.lets-lab.es/file/IPSELECTA/PDF_esp/155_156_157_165_166_167.pdf

<http://www.crisoninstruments.com/es/laboratorio/medidor-de-ph-/medidor-de-ph-de-sobremesa/Medidor-pH-glp-21>

<http://www.crisoninstruments.com/es/laboratorio/conductimetro/de-sobremesa/ec-metro-glp-31>

http://www.velp.com/es/productos/lines/2/family/29/termorreactores_dqo/14/ec_o_16

<http://www.grupo-selecta.com/pdfs/es/pages/Espa%C3%B1ol%20catalogo%20307.pdf>



Valorización de una corriente de biogás procedente del tratamiento
anerobio de purines, mediante SBR, para la producción de energía



Valorización de una corriente de biogás procedente del tratamiento anaerobio de purines, mediante SBR, para la producción de energía

DOCUMENTO II:

PRESUPUESTO



PRESUPUESTO PLANTA PILOTO

1. Cuadro de precios descompuestos

1.1 Presupuesto de la instalación

Atendiendo a nuestra instalación, se ha realizado un análisis orientativo de su precio.

- **DIGESTOR:**
Depósito de 150 m³, cerrado, base plana y de fibra de vidrio. 5 metros de diámetro y 7,7 metros de alto.

Precio: 14.500 €

- **COMPRESOR:**
Compresor recirculación biogás para un caudal de 5 m³ purín al día.

Precio: 6.050 €

- **INTERCAMBIADORES DE PLACAS EXTERNOS:**
Para un volumen de 150 m³, calentar hasta 40°C y con agua como medio.

Precio: 18.000 €

- **BOMBA:**
Bomba para sólidos ITC. Caudal de 335 L/min. Altura máxima 55 metros. Dimensiones 520 x 405 x 455 mm.

Precio: 150 €

- **ROTÁMETRO:**
Rotámetro para líquidos corrosivos.

Precio: 550 €

- **GASÓMETRO:**
Almacenaje de biogás producido.

Precio: 6.850

- **FILTRO:**
Filtro de malla

Precio: 1.000 €



- **DESHIDRATADOR. :**

Capacidad de 15-24,5 m³/h. Tipo de operación: tambor rotatorio

Precio: 9.750 €

TOTAL PRESUPUESTO DE INSTALACIÓN:

○ Digestor:	14.500 €
○ Compresor :	6.050 €
○ Intercambiadores de placas externos:	18.000 €
○ Bomba:	150 €
○ Rotámetro:	550 €
○ Gasómetro:	6.850 €
○ Filtro:	1.000 €
○ Deshidratador:	9.750 €

TOTAL: 56850 €

1.2 Presupuesto de mano de obra

- **INGENIERO QUÍMICO:**

Jornada completa: 8 horas/día

30 €/hora

Precio: 5.280 €/mes

- **TÉCNICO:**

Jornada completa: 8 horas/día

15 €/hora

Precio: 2.640 €/mes

TOTAL PRESUPUESTO DE MANO DE OBRA:

○ Ingeniero Químico:	5.280 €
○ Técnico:	2.640 €

TOTAL: 7.920 €



1.3 Presupuesto de material para análisis

- **CENTRÍFUGA:**
Posibilidad de introducir hasta 16 programas diferentes. Con motor de inducción, libre de mantenimiento.

Precio: 1.998 €

- **pH- METRO:**
Con pantalla gráfica. Rango de medición: -2 a 20 pH.
Precisión: ± 0.002 pH

Precio: 1.147 €

- **CONDUCTÍMETRO:**
Rango de medición: 100- 999 microS/cm.
Precisión: ± 0.01 microS/cm

Precio: 1.721 €

- **TERMORREACTOR:**
Presenta un modo temporización que puede ser programado por el usuario.
Con temperatura de hasta 300 °C.

Precio: 825 €

- **ESPECTROFOTÓMETRO:**
Para leer los ID de las muestras y los certificados de análisis.

Precio: 4.131 €

- **DESTILADOR KJELDAHL:**
Determinación del nitrógeno orgánico con valorador automático.

Precio: 9.111 €

- **ESTUFA:**
Con circulación por aire forzado. Para temperaturas regulables desde ambiente 5°C hasta 250°C.
Apropiada para procesos de secado.

Precio: 2.107 €

- **DESECADOR:**
Desecador tapa botón. Capacidad: 4000 mL.
Con disco de porcelana.

Precio: 44 €



- **MUFLA:**
Carcasa revestida en acero inoxidable. Salida de vapores en la parte posterior, se le puede conectar chimenea de evacuación.
Precio: 1.990 €

- **BALANZA ANALÍTICA:**
Capacidad 220 gramos. Resolución 0.1 mg. Calibración interna.
Precio: 1.051 €

- **REACTIVOS:**
 - HCl 1 M. 1L Precio: 25 €
 - HCl 0.1 M. 1L Precio: 24€
 - Hidróxido de potasio. 500 mL Precio: 18 €
 - Ácido bórico. 5L Precio: 68 €
 - NaOH 40%. 1L Precio: 39 €

TOTAL: 174 €

- **KITS:**
 - Nitratos. De 5 a 35 mg/L de N-NO₃. Precio: 113 €
 - DQO. De 15 a 150 mg/L de O₂. Precio: 93 €
 - Dureza del agua. De 17,9 a 358 mg/L. Precio: 82 €
 - Fósforo. De 0,5 a 5 mg/L. Precio: 114 €
 - Nitrógeno. De 1 a 16 mg/L. Precio: 120 €

TOTAL: 522 €



TOTAL PRESUPUESTO DE MATERIAL PARA ANÁLISIS:

○ Centrífuga:	1.998€
○ pH- metro:	1.147 €
○ Conductímetro:	1.721 €
○ Termorreactor:	825 €
○ Espectrofotómetro:	4.131 €
○ Destilador Kjeldahl:	9.111 €
○ Estufa:	2.107 €
○ Desecador:	44€
○ Mufla:	1.990 €
○ Balanza analítica:	1.051 €
○ Reactivos:	174 €
○ Kits:	522 €
TOTAL:	24.821 €

2. Presupuesto total

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL:

○ Presupuesto de instalación:	56.850 €
○ Presupuesto de mano de obra:	7.920 €
○ Presupuesto de material para análisis:	24.821€
TOTAL:	89.591 €

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA:

○ Presupuesto de ejecución material:	89.591 €
○ 15 % Gastos generales:	13.438 €
TOTAL:	103.029 €



Valorización de una corriente de biogás procedente del tratamiento
anerobio de purines, mediante SBR, para la producción de energía

PRESUPUESTO TOTAL:

- Presupuesto de ejecución: 103.029 €
- 21% IVA: 21.636 €

TOTAL: 124.665 €

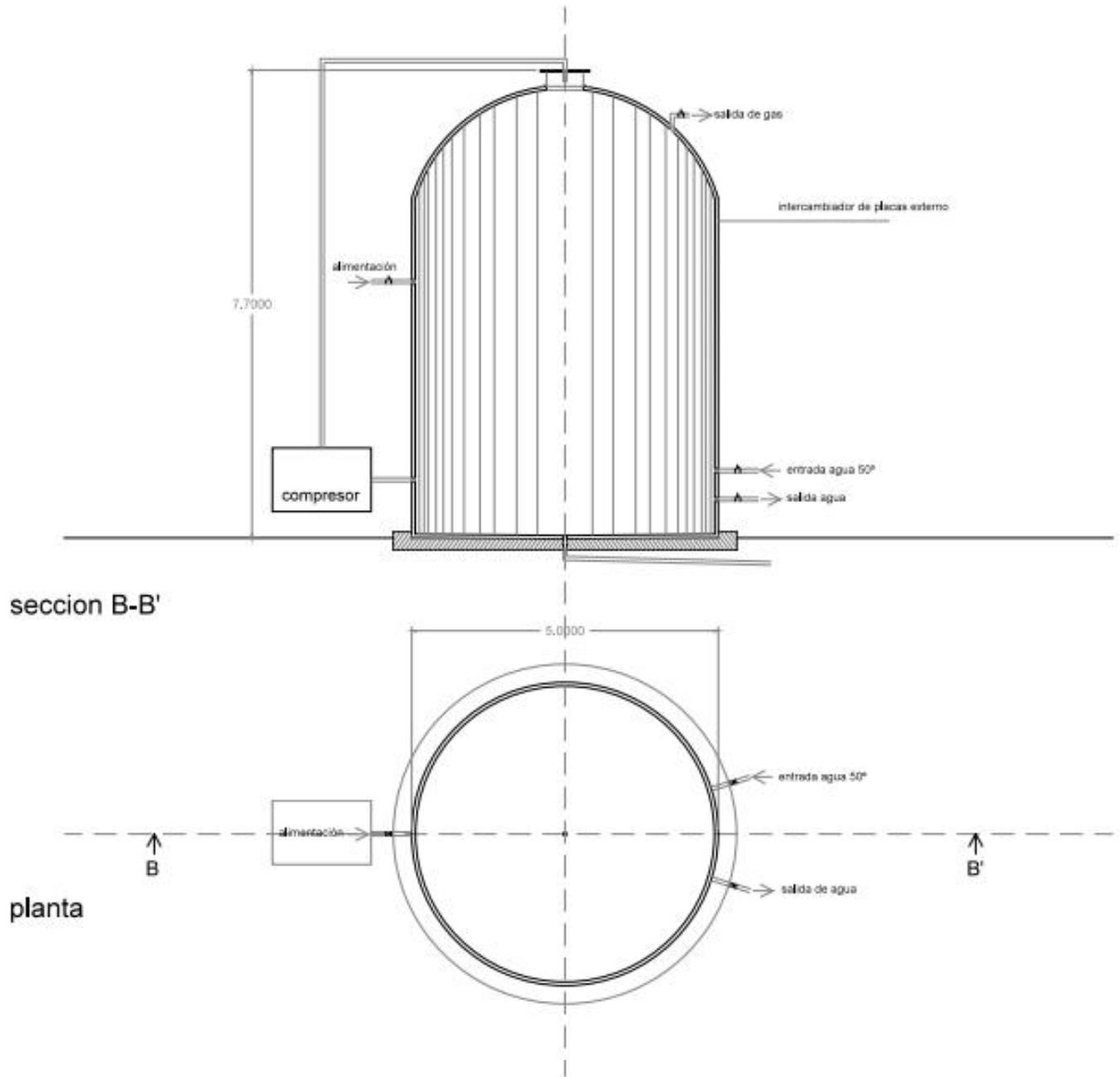


Valorización de una corriente de biogás procedente del tratamiento anaerobio de purines, mediante SBR, para la producción de energía



DOCUMENTO III:

PLANOS



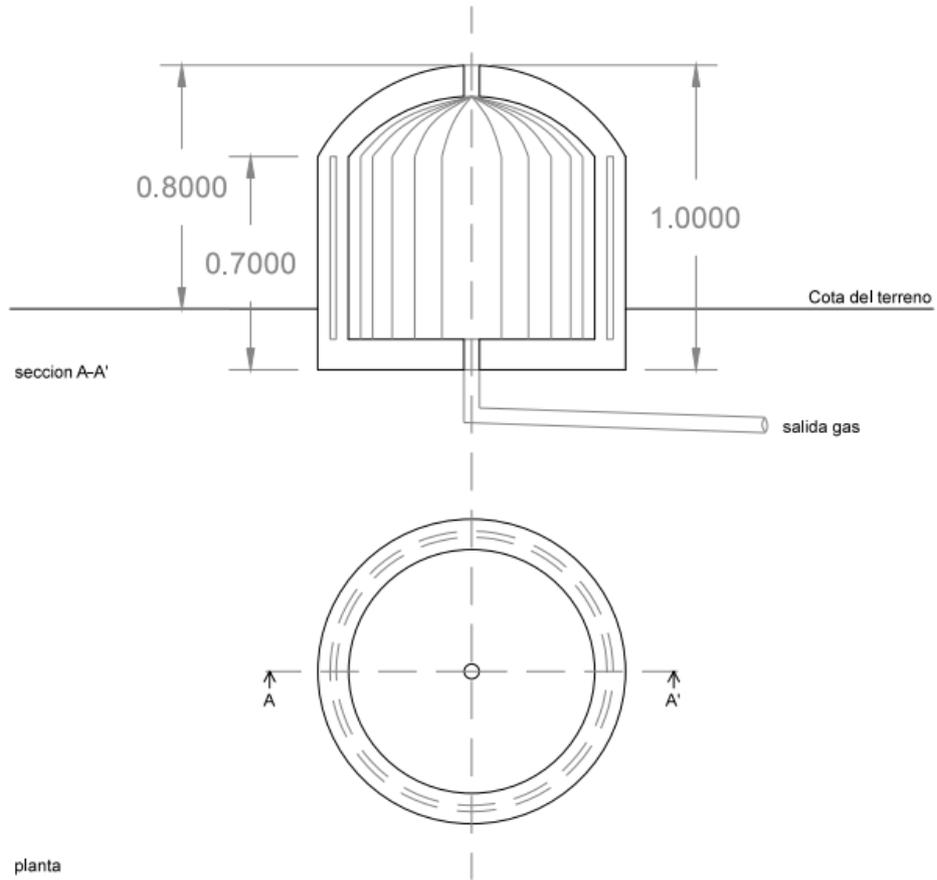
Plano I. Digestor anaerobio.

Cisela Maicas Piqueras

Valorización de una corriente de biogás procedente del tratamiento anaerobio de purines, mediante SBR, para la producción de energía



Valorización de una corriente de biogás procedente del tratamiento anaerobio de purines, mediante SBR, para la producción de energía



Plano II. Gasómetro.

Cisela Maicas Piqueras

Valorización de una corriente de biogás procedente del tratamiento anaerobio de purines, mediante SBR, para la producción de energía



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALÈNCIA



Valorización de una corriente de biogás procedente del tratamiento
anerobio de purines, mediante SBR, para la producción de energía



DOCUMENTO IV:

ANEXOS



Valorización de una corriente de biogás procedente del tratamiento anaerobio de purines, mediante SBR, para la producción de energía



ANEXO I:

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS



Valorización de una corriente de biogás procedente del tratamiento anaerobio de purines, mediante SBR, para la producción de energía

CENTRÍFUGA SIGMA

CENTRÍFUGAS SIGMA - ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Modelos Código	1-14 S710014	1-15 S710115	1-15K * S710148	1-6 S710105	2-5 S710130	2-16 S710145	2-16K* S710160	3K-30 * S710225	3-16 S710270	3-16K* S710280	3-18K * S710290	4-15 S710730	4K-15 * S710740	6-15 S710670	6K-15 * S710680
Refrigerada rango Temperatura °C	-	-	-10°C a +40°C	-	-	-	-10°C a +40°C	-20°C a +40°C	-	-10°C a +40°C	-20°C a +40°C	-	-20°C a +40°C	-	-20°C a +40°C
Volumen máx. de tubo ml.	52,8	52,8	66	180	480	480	480	510	1000	1000	1000	2000	2.000	3200	3200
Velocidad mín. R.p.m.	200	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Velocidad máx. R.p.m.	14.800	14.000	14.000	5.650	3.900	15.000	15.300	30.000	14.500	15.300	18.000	13.500	15.000	13.500	15.000
Regulación Velocidad r.p.m.	100	500	1	200	100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
R.c.f. (xg) máx.	16163	17.968	21913	3.034	2.313	20627	21.913	64.396	20.686	23.031	30.070	20.378	25.155	20.378	25.155
Aceleración en segundos	13"	18"	18"	6"	28"	Angular 30" Oscilante 34"	Angular 27" Oscilante 22"	Angular 90" Oscilante 30"	Angular 25" Oscilante 19"	Angular 26" Oscilante 20"	Angular 28" Oscilante 20"	Angular 35" Oscilante 20"	Angular 34" Oscilante 16"	Angular 78" Oscilante 29"	Angular 110" Oscilante 29"
Desaceleración en segundos	11"	20"	20"	8"	28"	Angular 23" Oscilante 17"	Angular 18" Oscilante 17"	Angular 58" Oscilante 14"	Angular 40" Oscilante 27"	Angular 41" Oscilante 28"	Angular 20" Oscilante 28"	Angular 38" Oscilante 20"	Angular 40" Oscilante 23"	Angular 108" Oscilante 28"	Angular 140" Oscilante 34"
Tiempo máx. programación	99'-59" ó infinito	30' ó infinito	30' ó infinito	30' ó infinito	30' ó infinito	30' ó infinito	30' ó infinito	9h-59' ó infinito	30' ó infinito	30' ó infinito	9h-59' ó infinito	9h-59' ó infinito	9h-59' ó infinito	9h-59' ó infinito	9h-59' ó infinito
Display LCD	Digital numérico	Digital gráfico	Digital gráfico	Digital gráfico	Digital gráfico	Digital numérico	Digital numérico	Digital gráfico + numérico	Digital numérico	Digital numérico	Digital gráfico + numérico	Digital gráfico + numérico	Digital gráfico + numérico	Digital gráfico + numérico	Digital gráfico + numérico
Memoria de programas	-	-	-	-	-	-	-	50	-	-	50	10	10	50	50
Curvas de aceleración	2	-	2	-	-	2	2	20 +10 libre programación	2	2	20 +10 libre programación	20	20	20 +10 libre programación	20 +10 libre programación
Curvas de desaceleración	2	-	2	-	-	2	2	20 +10 libre programación	2	2	20 +10 libre programación	20	20	20 +10 libre programación	20 +10 libre programación
Detector del cabezal	-	-	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Detector de desequilibrio	-	-	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Nivel sonoro máx. [dB(A)]	60	62	56	60	57	67	Angular 65 Oscilante 63	Angular 64 Oscilante 59	Angular 65 Oscilante 60	Angular 66 Oscilante 63	Angular 70 Oscilante 65	Angular 65 Oscilante 75	Angular 68 Oscilante 68	Angular 73 Oscilante 75	Angular 70 Oscilante 63
Consumo W	95	240	500	220	120	240	540	1260	450	580	980	1200	2000	1200	2200
Alto mm	176	245	300	245	300	300	310	400	355	355	355	405	405	425	425
Ancho mm	212	240	365	240	365	365	550	550	460	620	620	490	650	574	780
Fondo mm	226	320	585	320	460	460	570	650	600	600	600	685	685	685	685
Peso Kg	5,4	13	41	13	20	32	60	100	37	64	64	82	124	116	158
Voltage	230V 50/60Hz	230V 50/60Hz	230V 50Hz	230V 50/60Hz	230V 50/60Hz	230V 50/60Hz	230V 50Hz	230V 50Hz	230V 50/60Hz	230V 50Hz	230V 50/60Hz	230V 50/60Hz	230V 50Hz	230V 50/60Hz	230V 50Hz

* En los modelos REFRIGERADOS, la temperatura obtenida en la cámara está condicionada al factor de velocidad, tipo de cabezal, temperatura de la muestra, temperatura del cabezal y temperatura ambiente.

Nota: Cada centrífuga deberá completarse con un cabezal. Algunos accesorios, comunes entre centrífugas, están descritos con diferente medida en cuanto al Ø máx. y largo admisible de los tubos. Esto es debido a que cuando un mismo adaptador o reductor es insertado en un vaso o cabezal diferente en distinta centrífuga, dependerá de la menor o mayor capacidad de la cubeta de la misma.



ISO 9001 : 2000





PH- METRO

Especificaciones

Variables medidas

pH mV Temp

Escalas -2...16 ±2000 -20...150 °C (-4...302 °F)

Resolución 0.1/0.01/0.001 0.1/1 0.1 °C (0.18 °F)

Error de medida (±1 dígito) >=0.005 >=0.5 >=0.2 °C (0.36 °F)

Reproducibilidad (±1 dígito) ±0.001±0.1 ±0.1 °C (0.18 °F)

Compensación automática de temperatura

Por teclado o con sonda de temperatura Pt 1000 (C.A.T.).

pH isopotencial programable, valor estándar 7.00.

Calibración pH

Tampones Técnicos DIN 19267: 2.00, 4.01, 7.00, 9.21 y 10.90 (25 °C) (77 °F).

Tampones DIN 19266: 1.679, 4.006, 6.865, 9.180 y 12.454 (25 °C) (77 °F).

Tampones específicos elegidos por el usuario.

Con 1, 2 ó 3 tampones a seleccionar dentro de la gama.

Calibración especial a un valor cualquiera (calibración indirecta).

Introducción manual de parámetros de calibración.

Frecuencia de calibración programable entre 0 horas y 7 días.

Rechazo de electrodos en mal estado.

Calibración mV

Reconocimiento automático patrón 220 mV a 25 °C (77 °F).

Calibración especial a un valor cualquiera.

Reajuste de temperatura

Corrección de la desviación de la sonda C.A.T. a 25 °C (77 °F) y 85 °C (185 °F).

Data Logger

Almacén de datos de 400 lecturas.

Idiomas

Castellano, italiano, francés, inglés y catalán.

Pantalla

Gráfica, de cristal líquido, retroiluminada, 128 x 64 puntos.

Sensores conectables

Electrodo indicador o combinado, conector BNC (Imp.> 1012?).

Electrodo de referencia, conector banana.

C.A.T. tipo Pt 1000, conector banana o telefónico.



Periféricos conectables

Agitador magnético CRISON.

PC o impresora.

Teclado externo de PC o lector de código de barras.

Directivas baja tensión y CEM

Según 2006/95/CE. Según 2004/108/CE.

Alimentación

A través de alimentador externo 220 VCA / 12 VDC, 3.3 W.

Materiales

Contenedor, ABS y PC. Teclado, PET con tratamiento protector.

Parámetros físicos

Peso 1100 g. Dimensiones 350 x 200 x 110 mm.

*Especificaciones sujetas a cambios sin previo aviso.



CONDUCTÍMETRO

Especificaciones

Escalas de medida (resolución según escala)

Conductividad: 0.01* ?S ...1000** mS/cm

Salinidad: 5.85 mg/l ... 311.1 g/l NaCl

T.D.S 0 mg/l...500 g/l

Temperatura: -20.0 ... 150.0 °C (-4...302 °F)

* Sólo con C=0.1 cm-1 / ** Sólo con C=10 cm-1

Error de medida Reproducibilidad

(± 1 dígito) (± 1 dígito)

Conductividad $\geq 0.5\% \pm 0.1\%$

Salinidad y TDS $\geq 0.5\% \pm 0.1\%$

Temperatura $\geq 0.2\text{ °C}$ (0.36 °F) $\pm 0.1\text{ °C}$ (0.18 °F)

Compensación automática de temperatura:

TC, (coeficiente de temperatura):

Lineal 0.00... 5.00 % / °C.

No lineal para aguas naturales (UNE EN 27888).

TR (temp .de referencia): 20 °C (68 °F), 25 °C (77 °F) o cualquier valor entre 0 y 99 °C (0 y 210 °F).

Calibración CE

Patrones: 147 ?S/cm , 1413 ?S/cm, 12.88 mS/cm y 111.8 mS/cm.

Con 1, 2 ó 3 patrones a seleccionar dentro de la gama.

Calibración especial a un valor cualquiera de CE, salinidad o TDS.

Introducción manual de la constante de célula.

Frecuencia de calibración programable entre 0 y 99 días.

Factor de conversión TDS

Valores entre 0.4... 1. Configuración estándar 0.64.



Reajuste de temperatura

Corrección de la desviación de la sonda C.A.T. a 25 °C (77 °F) y 85 °C (185 °F).

Data Logger

Almacén de datos de 400 lecturas.

Idiomas

Castellano, Italiano, Francés, Inglés y Catalán.

Pantalla

Gráfica, de cristal líquido, retroiluminada, 128 x 64 puntos.

Sensores conectables

Célula de conductividad con sensor Pt1000, conector telefónico.

Periféricos conectables

Agitador magnético CRISON.

PC o impresora.

Teclado externo de PC o lector código de barras.

Directivas baja tensión y CEM

Según 2006/95/CE. Según 2004/108/CE.

Alimentación

A través de alimentador externo 220 VCA / 12 VDC, 3.3 W.

Materiales

Contenedor, ABS y PC. Teclado, PET con tratamiento protector.

Parámetros físicos

Peso 1100 g. Dimensiones 350 x 200 x 110 mm.

*Especificaciones sujetas a cambios sin previo aviso.



Características técnicas

CARACTERISTICAS GENERALES	
Estructura:	metálica recubierta con pintura epoxi
Numero de perforaciones:	14 perforaciones de Ø ext. 16 mm y 2 perforaciones Ø ext. 22 mm (análisis de lodos)
Consecución de la temperatura programada:	visualización a display
Cuenta descendiente:	visualización a display
Fin de ciclo:	señalización acústica de fin de ciclo con apagado automático
Potencia:	700 W
Voltaje:	115 V o 230 V / 50-60 Hz
Peso:	3,8 Kg
Dimensiones (LxHxP):	168x110x269 mm
PRESTACIONES	
Temperaturas de trabajo programables:	desde temperatura ambiente hasta 200°C, definición 1°C
Programación del tiempo de reacción:	desde 0 hasta 199 min.
CARACTERISTICAS TECNICAS DEL BLOQUE RISCALDANTE	
Estabilidad térmica:	± 0,5°C
Homogeneidad de temperatura:	± 0,5°C
Precisión de temperatura:	± 1°C
Seguridad de sobrecalentamiento:	
SEÑALIZACION	
Alcance de la temperatura programada:	acústica, visual
Cuenta del tiempo programado:	visual
Fin de ciclo:	acústica, visual
Sonda in corto circuito:	acústica, visual
Sonda interrumpida:	acústica, visual



DESTILADOR KJELDAHL

ESPECIFICACIONES

Rango de medición: de 0,2 a 200 mg de Nitrógeno Kjeldahl.

Tiempo de destilación programable.

Recuperación de Nitrógeno: > 99,5%

Velocidad de destilación: de 35 a 40 ml/minuto.

Duración típica de una destilación: de 7 a 10 minutos.

Consumo de agua de refrigeración: de 80 a 100 litros/h.

Consumo de agua del generador de vapor: 2,5 litros/h.

Capacidad del depósito de agua para el generador de vapor: 6 litros.

Capacidad del depósito de NaOH: 2 litros.



ANEXO II:

CÁLCULOS



1. Cálculos nitrógeno amoniacal Kjeldahl (N-NH₄)

Para el cálculo del nitrógeno amoniacal se hace uso de la siguiente ecuación:

$$\frac{(V_{HCl} - V_{blanco}) \cdot M_{HCl} \cdot PM_N}{V_{muestra}} \quad (I)$$

Siendo:

V_{HCl} = volumen de HCl consumido en la valoración de la muestra en L

V_{blanco} = volumen de HCl consumido en la valoración del blanco en L

M_{HCl} = molaridad del HCl en mol/L

PM_N = peso molecular del N en g/mol

$V_{muestra}$ = volumen exacto empleado de la muestra por pesada en L

Muestra día 6

Datos:

$$V_{HCl} = 5.3 \text{ mL}$$

$$PM_N = 14.007 \text{ g/mol}$$

$$V_{blanco} = 0.5 \text{ mL}$$

$$V_{muestra} = 4.8919 \text{ mL}$$

$$M_{HCl} = 0.1 \text{ mol/L}$$

Sustituyendo en la ecuación I:

$$\frac{(5.3 - 0.5) \cdot 10^{-3} \cdot 0.1 \cdot 14.007 \cdot 1000}{4.8919 \cdot 10^{-3}} = 1374.39 \text{ mg/L}$$

Muestra día 9

Datos:

$$V_{HCl} = 5.1 \text{ mL}$$

$$PM_N = 14.007 \text{ g/mol}$$

$$V_{blanco} = 0.5 \text{ mL}$$

$$V_{muestra} = 4.987 \text{ mL}$$

$$M_{HCl} = 0.1 \text{ mol/L}$$

Sustituyendo en la ecuación (I):



$$\frac{(5.1 - 0.5) \cdot 10^{-3} \cdot 0.1 \cdot 14.007 \cdot 1000}{4.987 \cdot 10^{-3}} = 1292 \text{ mg/L}$$

Muestra día 13

Datos:

$$V_{\text{HCl}} = 4.5 \text{ mL}$$

$$PM_{\text{N}} = 14.007 \text{ g/mol}$$

$$V_{\text{blanco}} = 0.5 \text{ mL}$$

$$V_{\text{muestra}} = 4.8785 \text{ mL}$$

$$M_{\text{HCl}} = 0.1 \text{ mol/L}$$

Sustituyendo en la ecuación (I):

$$\frac{(4.5 - 0.5) \cdot 10^{-3} \cdot 0.1 \cdot 14.007 \cdot 1000}{4.8785 \cdot 10^{-3}} = 1148.47 \text{ mg/L}$$

Muestra día 16

Datos:

$$V_{\text{HCl}} = 5 \text{ mL}$$

$$PM_{\text{N}} = 14.007 \text{ g/mol}$$

$$V_{\text{blanco}} = 0.45 \text{ mL}$$

$$V_{\text{muestra}} = 4.8454 \text{ mL}$$

$$M_{\text{HCl}} = 0.1 \text{ mol/L}$$

Sustituyendo en la ecuación (I):

$$\frac{(5 - 0.45) \cdot 10^{-3} \cdot 0.1 \cdot 14.007 \cdot 1000}{4.8454 \cdot 10^{-3}} = 1193.61 \text{ mg/L}$$



Muestra día 20

Datos:

$$V_{\text{HCl}} = 3.8 \text{ mL}$$

$$PM_{\text{N}} = 14.007 \text{ g/mol}$$

$$V_{\text{blanco}} = 0.4 \text{ mL}$$

$$V_{\text{muestra}} = 4.8105 \text{ mL}$$

$$M_{\text{HCl}} = 0.1 \text{ mol/L}$$

Sustituyendo en la ecuación (I):

$$\frac{(3.8 - 0.4) \cdot 10^{-3} \cdot 0.1 \cdot 14.007 \cdot 1000}{4.8105 \cdot 10^{-3}} = 990 \text{ mg/L}$$

Muestra día 23

Datos:

$$V_{\text{HCl}} = 3.5 \text{ mL}$$

$$PM_{\text{N}} = 14.007 \text{ g/mol}$$

$$V_{\text{blanco}} = 0.45 \text{ mL}$$

$$V_{\text{muestra}} = 4.8636 \text{ mL}$$

$$M_{\text{HCl}} = 0.1 \text{ mol/L}$$

Sustituyendo en la ecuación (I):

$$\frac{(3.5 - 0.45) \cdot 10^{-3} \cdot 0.1 \cdot 14.007 \cdot 1000}{4.8636 \cdot 10^{-3}} = 878.39 \text{ mg/L}$$

Muestra día 26

Datos:

$$V_{\text{HCl}} = 4.1 \text{ mL}$$

$$PM_{\text{N}} = 14.007 \text{ g/mol}$$

$$V_{\text{blanco}} = 0.3 \text{ mL}$$

$$V_{\text{muestra}} = 4.8224 \text{ mL}$$

$$M_{\text{HCl}} = 0.1 \text{ mol/L}$$



Sustituyendo en la ecuación (I):

$$\frac{(4.1 - 0.3) \cdot 10^{-3} \cdot 0.1 \cdot 14.007 \cdot 1000}{4.8224 \cdot 10^{-3}} = 1103.74 \text{ mg/L}$$

Muestra día 28

Datos:

$$V_{\text{HCl}} = 3.8 \text{ mL}$$

$$PM_{\text{N}} = 14.007 \text{ g/mol}$$

$$V_{\text{blanco}} = 0.4 \text{ mL}$$

$$V_{\text{muestra}} = 4.8273 \text{ mL}$$

$$M_{\text{HCl}} = 0.1 \text{ mol/L}$$

Sustituyendo en la ecuación (I):

$$\frac{(3.8 - 0.4) \cdot 10^{-3} \cdot 0.1 \cdot 14.007 \cdot 1000}{4.8273 \cdot 10^{-3}} = 986.55 \text{ mg/L}$$

2. Cálculos sólidos totales (ST) y volátiles (SV)

Para calcular la cantidad de sólidos totales y volátiles, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$ST = \left(\frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0} \right) \quad (II)$$

$$SV = \left(\frac{P_2 - P_3}{P_1 - P_0} \right) \quad (III)$$

Siendo:

P_0 = peso del crisol vacío en gramos.

P_1 = peso del crisol con los 50 mL de muestra.

P_2 = peso del crisol después de estufa y desecador.



P_3 = peso del crisol tras mufla y desecador.

El cálculo se realiza dos veces obteniendo como resultado la media de los dos.

Muestra día 6

Datos:	$P_0 = 43.485 \text{ g}$	$P_0 = 43.935 \text{ g}$
	$P_1 = 92.879 \text{ g}$	$P_1 = 93.206 \text{ g}$
	$P_2 = 44.486 \text{ g}$	$P_2 = 44.937 \text{ g}$
	$P_3 = 43.948 \text{ g}$	$P_3 = 44.402 \text{ g}$

Se calculan los ST haciendo uso de la ecuación II:

$$ST = \left(\frac{44.486 - 43.485}{92.879 - 43.485} \right) = 2.03 \text{ g/L} \qquad ST = \left(\frac{44.937 - 43.935}{93.206 - 43.935} \right) = 2.03 \text{ g/L}$$

Haciendo la media: $ST = \frac{2.03+2.03}{2} = 2.03 \text{ g/L}$

Se calculan los SV haciendo uso de la ecuación III:

$$SV = \left(\frac{44.486 - 43.948}{92.879 - 43.485} \right) = 1.09 \text{ g/L} \qquad SV = \left(\frac{44.937 - 44.402}{93.206 - 43.935} \right) = 1.09 \text{ g/L}$$

Haciendo la media: $SV = \frac{1.09+1.09}{2} = 1.09 \text{ g/L}$

Muestra día 9

Datos:	$P_0 = 77.438 \text{ g}$	$P_0 = 77.762 \text{ g}$
	$P_1 = 126.412 \text{ g}$	$P_1 = 126.871 \text{ g}$
	$P_2 = 78.093 \text{ g}$	$P_2 = 78.386 \text{ g}$
	$P_3 = 77.564 \text{ g}$	$P_3 = 77.863 \text{ g}$

Haciendo uso de la ecuación II:



$$ST = \left(\frac{78.093 - 77.438}{126.412 - 77.438} \right) = 1.34 \text{ g/L}$$

$$ST = \left(\frac{78.386 - 77.762}{126.871 - 77.762} \right) = 1.27 \text{ g/L}$$

Haciendo la media: $ST = \frac{1.34+1.27}{2} = 1.30 \text{ g/L}$

Se calculan los SV haciendo uso de la ecuación III:

$$SV = \left(\frac{78.093 - 77.564}{126.412 - 77.438} \right) = 1.08 \text{ g/L}$$

$$SV = \left(\frac{78.386 - 44.402}{126.871 - 77.762} \right) = 1.06 \text{ g/L}$$

Haciendo la media: $SV = \frac{1.08+1.06}{2} = 1.07 \text{ g/L}$

Muestra día 13

Datos:	P ₀ = 47.012 g	P ₀ = 49.702 g
	P ₁ = 96.266 g	P ₁ = 98.145 g
	P ₂ = 47.780 g	P ₂ = 50.464 g
	P ₃ = 47.382 g	P ₃ = 50.068 g

Haciendo uso de la ecuación II:

$$ST = \left(\frac{47.780 - 47.012}{96.266 - 47.012} \right) = 1.56 \text{ g/L}$$

$$ST = \left(\frac{50.464 - 49.702}{98.145 - 49.702} \right) = 1.57 \text{ g/L}$$

Haciendo la media: $ST = \frac{1.56+1.57}{2} = 1.57 \text{ g/L}$

Se calculan los SV haciendo uso de la ecuación III:

$$SV = \left(\frac{47.780 - 47.382}{96.266 - 47.012} \right) = 0.81 \text{ g/L}$$

$$SV = \left(\frac{50.464 - 50.068}{98.145 - 49.702} \right) = 0.82 \text{ g/L}$$

Haciendo la media: $SV = \frac{0.81+0.82}{2} = 0.81 \text{ g/L}$



Muestra día 16

Datos:	$P_0 = 51.135 \text{ g}$	$P_0 = 45.279 \text{ g}$
	$P_1 = 100.031 \text{ g}$	$P_1 = 94.033 \text{ g}$
	$P_2 = 51.863 \text{ g}$	$P_2 = 46.016 \text{ g}$
	$P_3 = 51.4660 \text{ g}$	$P_3 = 45.6091 \text{ g}$

Haciendo uso de la ecuación II:

$$ST = \left(\frac{51.863 - 51.135}{100.031 - 51.135} \right) = 1.49 \text{ g/L} \qquad ST = \left(\frac{46.016 - 45.279}{94.033 - 45.279} \right) = 1.51 \text{ g/L}$$

Haciendo la media: $ST = \frac{1.49+1.51}{2} = 1.50 \text{ g/L}$

Se calculan los SV haciendo uso de la ecuación III:

$$SV = \left(\frac{51.863 - 51.466}{100.031 - 51.135} \right) = 0.81 \text{ g/L} \qquad SV = \left(\frac{46.016 - 45.6091}{94.033 - 45.279} \right) = 0.83 \text{ g/L}$$

Haciendo la media: $SV = \frac{0.81+0.82}{2} = 0.82 \text{ g/L}$

Muestra día 20

Datos:	$P_0 = 77.161 \text{ g}$	$P_0 = 77.429 \text{ g}$
	$P_1 = 126.360 \text{ g}$	$P_1 = 127.165 \text{ g}$
	$P_2 = 77.868 \text{ g}$	$P_2 = 78.166 \text{ g}$
	$P_3 = 77.4761 \text{ g}$	$P_3 = 77.7717 \text{ g}$

Haciendo uso de la ecuación II:

$$ST = \left(\frac{77.868 - 77.161}{126.360 - 77.161} \right) = 1.44 \text{ g/L} \qquad ST = \left(\frac{78.166 - 77.429}{127.165 - 77.429} \right) = 1.48 \text{ g/L}$$



Haciendo la media: $ST = \frac{1.44+1.48}{2} = 1.46 \text{ g/L}$

Se calculan los SV haciendo uso de la ecuación III:

$$SV = \left(\frac{77.868 - 77.4761}{126.360 - 77.161} \right) = 0.80 \text{ g/L} \qquad SV = \left(\frac{78.166 - 77.7717}{127.165 - 77.429} \right) = 0.79 \text{ g/L}$$

Haciendo la media: $SV = \frac{0.80+0.79}{2} = 0.79 \text{ g/L}$

Muestra día 23

Datos:	P ₀ = 77.415g	P ₀ = 77.130 g
	P ₁ = 127.560 g	P ₁ = 126.985 g
	P ₂ = 77.865 g	P ₂ = 78.154 g
	P ₃ = 77.510 g	P ₃ = 77.820 g

Haciendo uso de la ecuación II:

$$ST = \left(\frac{77.865 - 77.415}{127.56 - 77.415} \right) = 0.90 \text{ g/L} \qquad ST = \left(\frac{78.154 - 77.130}{126.985 - 77.130} \right) = 2.05 \text{ g/L}$$

Haciendo la media: $ST = \frac{0.90+2.05}{2} = 1.48 \text{ g/L}$

Se calculan los SV haciendo uso de la ecuación III:

$$SV = \left(\frac{77.865 - 77.510}{127.56 - 77.415} \right) = 0.69 \text{ g/L} \qquad SV = \left(\frac{78.154 - 77.820}{126.985 - 77.130} \right) = 0.67 \text{ g/L}$$

Haciendo la media: $SV = \frac{0.69+0.67}{2} = 0.68 \text{ g/L}$



Muestra día 26

Datos:	$P_0 = 45.275 \text{ g}$	$P_0 = 51.137 \text{ g}$
	$P_1 = 95.232 \text{ g}$	$P_1 = 101.360 \text{ g}$
	$P_2 = 45.959 \text{ g}$	$P_2 = 51.8127 \text{ g}$
	$P_3 = 45.670 \text{ g}$	$P_3 = 51.534 \text{ g}$

Haciendo uso de la ecuación II:

$$ST = \left(\frac{45.959 - 45.275}{95.232 - 45.275} \right) = 1.37 \text{ g/L} \qquad ST = \left(\frac{51.8127 - 51.137}{101.360 - 51.137} \right) = 1.35 \text{ g/L}$$

Haciendo la media: $ST = \frac{1.37+1.35}{2} = 1.36 \text{ g/L}$

Se calculan los SV haciendo uso de la ecuación III:

$$SV = \left(\frac{45.959 - 45.670}{95.232 - 45.275} \right) = 0.58 \text{ g/L} \qquad SV = \left(\frac{51.8127 - 51.534}{101.360 - 51.137} \right) = 0.55 \text{ g/L}$$

Haciendo la media: $SV = \frac{0.58+0.55}{2} = 0.57 \text{ g/L}$

Muestra día 28

Datos:	$P_0 = 45.260 \text{ g}$	$P_0 = 51.129 \text{ g}$
	$P_1 = 94.331 \text{ g}$	$P_1 = 100.160 \text{ g}$
	$P_2 = 45.645 \text{ g}$	$P_2 = 51.505 \text{ g}$
	$P_3 = 45.522 \text{ g}$	$P_3 = 51.388 \text{ g}$

Haciendo uso de la ecuación II:



$$ST = \left(\frac{45.645 - 45.260}{94.331 - 45.260} \right) = 0.78 \text{ g/L}$$

$$ST = \left(\frac{51.505 - 51.129}{100.160 - 51.129} \right) = 0.77 \text{ g/L}$$

Haciendo la media: $ST = \frac{0.78+0.77}{2} = 0.78 \text{ g/L}$

Se calculan los SV haciendo uso de la ecuación III:

$$SV = \left(\frac{45.645 - 45.522}{94.331 - 45.260} \right) = 0.25 \text{ g/L}$$

$$SV = \left(\frac{51.505 - 51.388}{100.160 - 51.129} \right) = 0.24 \text{ g/L}$$

Haciendo la media: $SV = \frac{0.25+0.24}{2} = 0.24 \text{ g/L}$



ANEXO III:

DIAGRAMA DE BLOQUES.



Valorización de una corriente de biogás procedente del tratamiento anaerobio de purines, mediante SBR, para la producción de energía

