

# Trabajo Fin de Máster Energías Renovables y Eficiencia Energética

## ANÁLISIS TERMoeCONÓMICO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE PURINES CON DIGESTIÓN ANAEROBIA Y PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD

Autora

Gemma Pequerul Linares

Director

Sergio Usón Gil

## **Agradecimientos**

---

*En primer lugar mis más sinceros agradecimientos a la persona que ha dirigido este proyecto, Sergio Usón, por la dedicación a la hora de solucionar problemas y resolver dudas, siempre ha estado cuando lo he necesitado. Muchas gracias.*

*Asimismo, dedico muy especialmente el presente trabajo Fin de Máster a mi madre, M<sup>a</sup> Carmen, por el esfuerzo que ha realizado a lo largo de su vida para ofrecerme todas las posibilidades de las que he disfrutado y sigo disfrutando, así como la educación y valores que me ha inculcado desde pequeña hasta convertirme en adulta, sin olvidar su apoyo a lo largo de todos los años de mi vida.*

*Por supuesto, a una pieza vital en mi vida, a mi hermano, el cual siempre ha estado a mi lado desde que empecé este Máster y ha sabido inyectarme moral en mis peores momentos, ya que compaginar trabajo, viajes y estudios, en ocasiones, me ha resultado muy duro y he sentido ganas de abandonar. A Roberto, ya que sin él esta última etapa del Máster tampoco hubiera sido posible, ha sabido comprenderme y apoyarme, empujándome a dar el último esfuerzo para conseguir concluir este trabajo. Gracias.*

*Finalmente, también quiero mostrar mi agradecimiento a varias de las personas que trabajan en Sarga, antiguamente Sodemasa, ya que en los momentos iniciales de este trabajo, cuando más perdida me encontraba, me mostraron su ayuda desinteresada. Gracias a ellos supe cómo y hacia donde orientar la búsqueda de información relativa a las plantas de tratamiento de purines.*

# **ANÁLISIS TERMoeCONÓMICO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE PURINES CON DIGESTIÓN ANAEROBIA Y PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD**

## **RESUMEN**

El objetivo de este trabajo es llevar a cabo un análisis termoeconómico a una planta de tratamiento de purines sometida a digestión anaerobia con diferentes tipos de co-sustratos (co-digestión).

La planta sobre la que versará dicho análisis es la proyectada en 2009 por Sarga, antiguamente Sodemasa, para el municipio de Capella (Huesca), la cual dispone de dos de los tratamientos más habituales para este tipo de plantas, como son el proceso de digestión anaerobia y el proceso de tratamiento biológico.

En primer lugar, mediante el programa de cálculo EES (Engineering. Equation Solver), se ha llevado a cabo un análisis exergético de los flujos que forman parte de cada uno de los procesos de la planta objeto de estudio: flujos de purín, de valorización de fangos, energéticos y flujos de los distintos sustratos añadidos a la digestión para mejorar la eficacia de la planta.

Tras una extensa búsqueda bibliográfica sobre el estado del arte de la co-digestión, se han estudiado tres tipos diferentes de sustratos: co-digestión con paja de trigo, con glicerina y con una mezcla de residuos industriales, de matadero y vegetales, además de analizarse también el caso en el que no se lleve a cabo ningún tipo de co-digestión.

Una vez determinada la exergía contenida en cada uno de los casos analizados, se ha realizado una análisis termoeconómico con el objeto de determinar cuáles son los procesos de la planta que mayores costes exegéticos inducen en el resto de procesos, así como tratar de explicar las diferencias existentes que tienen lugar dentro de un mismo proceso en función del caso que este siendo analizado.

Finalmente, se ha llevado a cabo un análisis exergético comparativo, desde el punto de vista del transporte del purín hasta las tierras agrícolas, de dos situaciones diferentes: una en la que no se contempla la existencia de la planta de tratamiento de purines en la zona de Capella (Huesca), lo que conlleva transportar el purín desde las explotaciones ganaderas porcinas de la zona, hasta áreas alejadas para no sobrepasar el límite permitido de nutrientes en las tierras arables, y otra situación en la que sí se analiza la existencia de dicha planta.

## ÍNCIDE

---

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE PURINES. ....</b>	<b>2</b>
2.1.- Características de la planta de tratamiento de purines seleccionada.....	2
2.2.- Co-digestión en las plantas de tratamiento de purines. ....	5
<b>3. ANÁLISIS EXERGETICO DE LOS DISTINTOS FLUJOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE PURINES DE CAPELLA.....</b>	<b>6</b>
3.1.- Ambiente de referencia. ....	7
3.2.- Exergía de los flujos de purín.....	8
3.2.- Exergía asociada a los flujos en procesos de valorización del purín concentrado. Biogás. ....	12
3.3.- Exergía asociada a flujos de energía.....	13
3.4.- Exergía asociada a los flujos de residuos en el proceso de tratamiento (Co-digestión). ....	13
3.4.1.- Exergía asociada a los flujos de paja de trigo.....	13
3.4.2.- Exergía asociada a los flujos de glicerina.....	14
3.4.3.- Exergía asociada a los flujos de grasa.....	14
3.4.4.- Exergía asociada a los flujos de residuos de matadero.....	14
3.5.- Resultados del análisis exergético. ....	14
<b>4. ANÁLISIS TERMoeCONOMICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE PURINES DE CAPELLA.....</b>	<b>19</b>
4.1. Estructura productiva. ....	19
4.2.- Análisis de la asignación de costes de los residuos.....	25
4.3. Análisis de resultados termoeconómicos.....	27
4.3.1.- Eficiencia exergética de los procesos.....	27
4.3.2.- Coste exergético unitario.....	28
4.3.3.- Descomposición de los costes exergéticos unitarios.....	31
<b>5. ANÁLISIS EXERGETICO DE SITUACIONES ALTERNATIVAS.....</b>	<b>38</b>
5.1.- Análisis exergético del transporte.....	39
5.2.- Análisis de resultados.....	40
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>41</b>
6.1.- Síntesis.....	41
6.2.- Aportaciones.....	43
6.3.- Perspectivas.....	43
<b>7. NOMENCLATURA.....</b>	<b>45</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>47</b>

## ANEXOS

---

<b>ANEXO I. ANÁLISIS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE CAPELLA: DESCRIPCIÓN DETALLADA Y DATOS TÉCNICOS. ....</b>	<b>53</b>
1.1.- Descripción de los distintos procesos. ....	53
1.1.1.- <i>Recepción, descarga y almacenamiento de las materias primas.</i> ....	53
1.1.2.- <i>Filtración inicial de parte de la fracción sólida.</i> ....	54
1.1.3.- <i>Decantación/Espesamiento 1º de fangos.</i> ....	54
1.1.4.- <i>Tratamiento biológico del líquido clarificado del purín.</i> ....	54
1.1.5.- <i>Digestión anaerobia de los fangos espesados y generación de Biogás.</i> ....	55
1.1.6.- <i>Cogeneración.</i> ....	57
1.2.- Análisis de los parámetros de diseño. ....	58
1.3.- Consumos energéticos de la planta. ....	58
<b>ANEXO II. ESTADO DEL ARTE DE LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS GANADEROS Y AGROINDUSTRIALES. ....</b>	<b>60</b>
2.1.- Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de la industria aceitera. ....	61
2.2.- Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de la industria hortofrutícola. ....	62
2.3.- Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de naranja. ....	63
2.4.- Co-digestión de residuos ganaderos y cultivos energéticos. ....	64
2.5.- Co-digestión de residuos ganaderos y residuos animales. ....	65
2.5.1.- <i>Co-digestión con residuos ganaderos y residuos de matadero.</i> ....	65
2.5.2.- <i>Co-digestión con residuos ganaderos y residuos pesqueros.</i> ....	67
2.6.- Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de la industria láctea. ....	68
2.7.- Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de la fabricación de biodiesel. ....	68
2.8.- Co-digestión de residuos ganaderos y otros residuos orgánicos. ....	70
2.9.- Conclusiones. ....	71
2.10.- Casos de estudio. ....	72
<b>ANEXO III. CARACTERIZACIÓN DE LOS FLUJOS DE LOS DISTINTOS PROCESOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE PURINES OBJETO DE ESTUDIO. ....</b>	<b>73</b>
3.1.- Análisis de los flujos de la planta de Capella sin co-digestión. ....	76
3.1.1.- <i>Flujos de purín.</i> ....	76
3.1.2.- <i>Flujos asociados con los procesos de valorización de los fangos. Biogás.</i> ....	82
3.1.3.- <i>Flujos energéticos.</i> ....	82
3.2.- Análisis de los flujos de la planta de Capella con co-digestión. ....	84
3.2.1.- <i>Co-digestión con paja de trigo.</i> ....	86
3.2.2.- <i>Co-digestión con glicerina.</i> ....	88
3.2.3.- <i>Co-digestión con mezcla de residuos.</i> ....	91

<b>ANEXO IV. ANÁLISIS TERMOECONOMICO. ....</b>	<b>99</b>
4.1.- Introducción. ....	99
4.2.- Análisis de la formación de costes. ....	99
4.2.1.- <i>Revisión de los principales aspectos termoeconómicos.</i> ....	99
4.2.2.- <i>Descomposición de costes en base a la irreversibilidad y al efecto de los residuos.</i> .....	101
4.2.3.- <i>Descomposición de costes en base al origen de los recursos.</i> .....	102
4.3.- Resultados relativos a los costes exergéticos unitarios de los productos.....	103
<b>ANEXO V. ANÁLISIS DE SITUACIONES ALTERNATIVAS. ....</b>	<b>116</b>

## 1. INTRODUCCIÓN.

La exergía se define como la máxima cantidad de trabajo que en su sistema puede realizar llevándolo hasta el estado de equilibrio con el medio que le rodea (estado de referencia externo) en una secuencia de procesos reversibles [1]. En definitiva es una propiedad termodinámica que indica la energía disponible, una medida de calidad de energía en los sistemas. Al contrario que ocurre durante las transformaciones de masa o energía en las cuales ambas son conservadas, la exergía es destruida en forma de irreversibilidad.

Así, el método exergético (o análisis exergético) es una técnica basada en la energía, y por tanto es una medida de la cantidad de trabajo o calidad de diferentes formas de energía en relación con un ambiente de referencia dado. El balance exergético aplicado a un proceso o plantas nos permite saber cuánta de la exergía empleada ha sido consumida por el proceso. Las pérdidas de exergía, denominada irreversibilidades, nos indican de manera cuantitativa las ineficiencias del proceso. Estos balances son fruto de la combinación de las dos Leyes principales de la Termodinámica: la Primera Ley nos dice que la energía ni se crea ni se destruye, mientras que por la Segunda Ley introduce el término de la entropía.

La Termoeconomía puede definirse como una teoría general de ahorro de energía que conecta la física con la economía mediante la Segunda Ley de la Termodinámica [2], proporcionando métodos para:

- Evaluar la cantidad y calidad de las pérdidas energéticas.
- Evaluar el coste de las pérdidas en términos de consumo de recursos.
- Aplicar a diferentes niveles de decisión sobre sistemas energéticos.

Por otro lado, la Termoeconomía está empezando a jugar un papel importante en el análisis de parques eco-industriales expresando en las mismas unidades los flujos de materia y de energía, es decir, la posibilidad de la aplicación de la Termoeconomía a la Ecología Industrial o simbiosis industrial. La Ecología Industrial es un área multidisciplinar cuyo objetivo es organizar los sistemas industriales de una forma similar a los ecosistemas naturales, e implica una interacción entre industrias (flujos de materia, energía e información) y una relación sostenible con el medio ambiente y la sociedad. Un objetivo fundamental de esta relación entre industrias es el cierre de ciclos de materia, lo que implica la utilización de los residuos de una industria como materias primas para otras, tal y como ocurre en los ecosistemas naturales, permitiendo reducir tanto el consumo de recursos como la producción de residuos [3].

## **2. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE PURINES.**

El gran desarrollo de la industria agroalimentaria y la intensificación de las explotaciones ganaderas en los últimos años, han propiciado la producción de grandes cantidades de residuos orgánicos. Esto resulta un problema cuando se produce una excesiva concentración en determinadas áreas, superando la capacidad de asimilación de nutrientes del suelo o sobrepasando los límites establecidos por la Directiva 91/676/CEE relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos.

En este contexto, las tecnologías utilizadas para el tratamiento adecuado de los purines pueden ser de varios tipos: biológicas, físicas o físico-químicas, digestión anaerobia o evaporación a través de calor procedente de la cogeneración. Las más empleadas actualmente son los procesos de digestión anaerobia o los tratamientos físicos seguidos de un tratamiento biológico de nitrificación-desnitrificación [4].

Teniendo en cuenta las tecnologías más utilizadas hoy en día a la hora de gestionar las deyecciones porcinas, para llevar a cabo el análisis termoeconómico objeto de este trabajo, se ha seleccionado una planta que combina tratamiento biológico de nitrificación-desnitrificación con digestión anaerobia. Otro de aspecto que ha sido tenido en cuenta para la selección de la planta sobre la que versar el presente trabajo, ha sido la cantidad de información disponible de la misma.

Por lo tanto, aplicando las distintas tecnologías a los purines de cerdo se puede conseguir el cierre de materia, es decir, el objetivo principal de la Ecología Industrial, al obtenerse por un lado, un gas con alto contenido en metano, y por otro lado, tanto abono orgánico que puede ser utilizado en los cultivos agrícolas como líquido depurado apto para fertirrigación. Además, estos productos finales de los purines de cerdo, obtenidos tras un adecuado tratamiento, son homogéneos en su composición, libre de olores y de alta calidad, eliminándose, además, un residuo de elevada problemática.

### **2.1.- Características de la planta de tratamiento de purines seleccionada.**

La planta sobre la que versarán todos los cálculos termoeconómicos objeto del presente trabajo es la planta de tratamiento de purín en Capella (Huesca) [5], la cual fue proyectada en 2009 por Sodemasa (a día de hoy Sarga) si bien, a fecha del presente trabajo, todavía no ha sido construida.



En el anexo I se hace una explicación detallada de la planta seleccionada, tanto de los procesos como de los distintos flujos, así de los datos técnicos de funcionamiento de la misma. No obstante, a continuación se describe brevemente la planta, comenzando con los principales procesos o etapas de los que consta dicha planta, los cuales se son los siguientes:

- 1. *Desbaste*. En este proceso se produce la primera separación entre la parte sólida y la parte líquida, siendo la parte sólida enviada al digestor para la producción de biogás.
- 2. *Decantación primaria*. En este proceso la parte líquida proveniente del clarificado es sometida a una decantación para separar los sólidos que pudiera contener, siendo éstos enviados al digestor para la producción de biogás.
- 3. *Tratamiento biológico*. En este proceso se reduce el nitrógeno amoniacal mediante dos etapas consecutivas: nitrificación y desnitrificación.
- 4. *Decantación secundaria*. Al igual que en la decantación primaria, el flujo proveniente del tratamiento biológico es sometido a una nueva decantación para separar los sólidos que todavía pudiera contener, siendo éstos enviados al digestor para la producción de biogás.
- 5. *Digestor*. A partir de la parte sólida del purín, es decir, de los lodos, en este proceso se lleva a cabo una digestión anaerobia con el objetivo producir un gas con alto contenido en metano. Una estrategia que permite optimizar esta digestión anaerobia es la digestión conjunta (co-digestión) del purín con uno o más sustratos diferentes (co-sustratos), tal y como se verá más adelante.
- 6. *Pulmón/Centrífugadora*. En este proceso se lleva a cabo la concentración del fango. La parte líquida (digerido líquido) se recirculará hacia el tratamiento biológico ya que contiene todavía un alto contenido de nitrógeno amoniacal.
- 7. *Cogeneración*. En este proceso se transforma el gas producido tras la digestión anaerobia tanto en energía eléctrica como en energía térmica, la cual será empleada para cubrir las necesidades de la propia planta. En cuanto a la energía eléctrica sobrante, ésta se venderá a la empresa distribuidora.

Por otro lado, según consta en la memoria elaborada por Sodemasa [5], la composición del purín no tratado en la zona de Capella (Huesca) es la siguiente:

PARÁMETROS	Ud.	VALORES
DQO	ppm	50.000
DBO	ppm	30.000
Materia Seca	%	4
Materia en Suspensión	%MS	70
Nitrógeno Total	ppm	7.000
N Amoniacal	ppm	5.000
N. Orgánico	ppm	2.000
Fósforo Total	ppm	1.500

Tabla 1. Caracterización del purín no tratado de la zona de Capella (Huesca).

Finalmente, los resultados a obtener en función de los rendimientos de los distintos procesos son los siguientes [5]:

- El rendimiento del tratamiento biológico será el siguiente:
  - Reducción de nitrógeno total: 80% (reducción del nitrógeno amoniacal: 95%)
  - Reducción del fosforo total: 70%
  - Concentración DQO: 4.000 ppm
- El rendimiento de la digestión anaerobia considerando el purín espesado como único sustrato será el siguiente:
  - Producción de biogás: 666.667 m<sup>3</sup>/año (60%CH<sub>4</sub>).
  - Poder calorífico del biogás: 3.988.000 kWh/año
  - Producción de electricidad (*rendimiento eléctrico, 38%*): 1.515.440 kWh/año, trabajando la planta durante 8.000 horas al año.
  - Producción de energía térmica (*rendimiento térmico, 40%*): 1.595.200 kWh/año, trabajando la planta durante 8.000 horas al año (un 40% del calor generado irá destinado a calentar el fluido térmico de la calefacción de los digestores, mientras que el resto se utilizará para distintos usos de la propia planta).

## **2.2.- Co-digestión en las plantas de tratamiento de purines.**

La digestión anaerobia, también denominada biometanización, es un proceso biológico que ocurre en ausencia de oxígeno, en el cual gracias a la acción de varios grupos de bacterias, la materia orgánica se descompone, dando como resultado dos productos principales: biogás y digestato. Sin embargo, la producción de metano que se obtiene en el proceso no es muy elevada [6]. En concreto, en la planta objeto de análisis se producirían  $6,6 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$  por tonelada de purín [5].

Para aumentar la producción de biogás es factible añadir otros sustratos a los residuos ganaderos, tales como residuos orgánicos agroindustriales (co-digestión). La principal ventaja de la co-digestión radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado [7].

En el Anexo II se ha llevado a cabo un análisis en profundidad del estado del arte de la co-digestión anaerobia de residuos ganaderos y agroindustriales, observándose el incremento en la producción de metano al añadirse a la digestión del purín una serie de sustratos, tales como: residuos de la industria hortofrutícola, residuos de naranja, cultivos energéticos, residuos animales, residuos de la industria láctea, residuos de la fabricación del biodiesel así como FORSU (Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos). No obstante, tras dicho estudio también se ha podido comprobar que la producción de metano en la co-digestión puede presentar diferencias significativas en función no solo del co-sustrato utilizado y de la cantidad de éstos, sino también del pre-tratamiento y de las sinergias entre los residuos, entre otros aspectos.

En el presente trabajo, y tras el estudio del estado del arte de la co-digestión anaerobia, se han seleccionado los siguientes casos de estudio:

- **Caso I.** *Análisis del funcionamiento de la planta seleccionada sin co-digestión.*
- **Caso II.** *Análisis del funcionamiento de la planta seleccionada con co-digestión de paja de trigo, donde se considerará que la adición de un 1% de paja al purín, permite incrementar la producción de metano en un 10 % [8].*
- **Caso III.** *Análisis del funcionamiento de la planta seleccionada con co-digestión de glicerina, donde se considerará que la adición de un 4% de glicerina al purín, permite incrementar la producción de biogás un 150% [9] y [10].*
- **Caso IV.** *Análisis del funcionamiento de la planta seleccionada con co-digestión de residuos industriales, residuos de matadero y residuos de vegetales, donde se considerará que la co-digestión de un 66% de purín de cerdo, un 17% de residuos industriales, un 12% de residuos de matadero y 5% de residuos vegetales, produce  $84 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Tn}$  de mezcla (en [11] cita a [12]).*

### 3. ANÁLISIS EXERGETICO DE LOS DISTINTOS FLUJOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE PURINES DE CAPELLA.

Una vez estudiados los principales procesos de tratamiento existentes en la planta objeto de estudio, han podido ser identificados los distintos flujos de materia y energía que forman parte de dicha de tratamiento. En la figura 1 que se muestra a continuación, se puede observar, de una manera esquematizada, es decir, agrupando algunos de los procesos de la planta, tanto los procesos como los distintos flujos que componen la planta de tratamiento de purín estudiada.

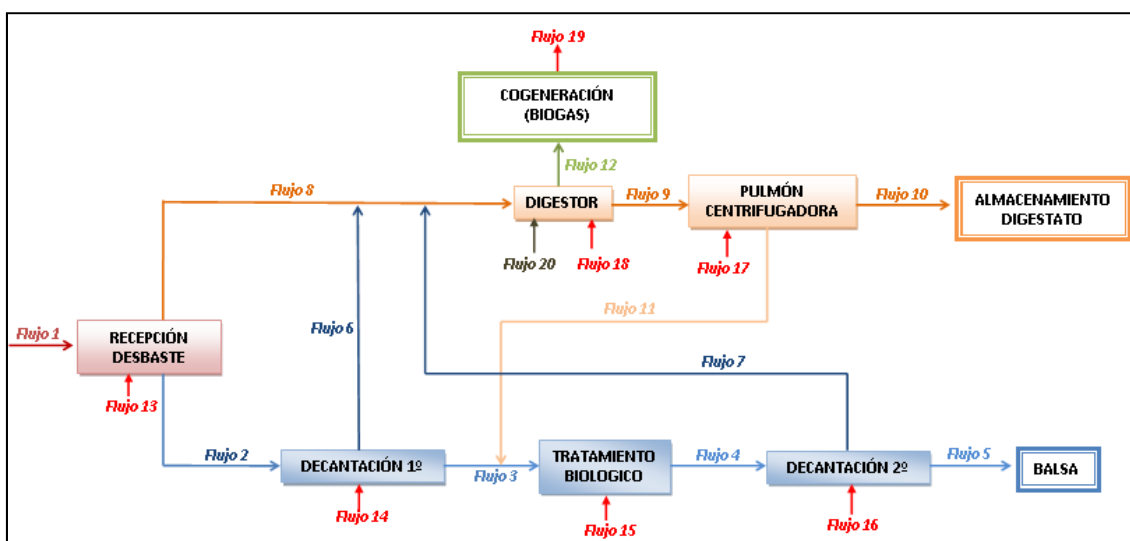


Figura 1. Esquema de los distintos procesos y flujos que forman parte de la planta de tratamiento de purines de Capella (Elaboración propia).

En cuanto a flujos representados en la figura 1, indicar lo siguiente:

- los flujos de 1 a 11 son los flujos de purín;
- los flujos de 13 a 19 son los flujos energéticos (los flujos del 13 al 17 son flujos de autoconsumo eléctrico de la propia planta, el flujo 18 indica el autoconsumo energético en la digestión, tanto eléctrico como térmico, y el flujo 19 es la energía sobrante generada y exportable al exterior, tanto eléctrica como térmica);
- el flujo 12 es el flujo asociado al proceso de valoración de fangos (biogás);
- el flujo 20, es el flujo del sustrato o sustratos añadidos al tratamiento en caso de existir co-digestión.

Para llevar a cabo el análisis exergético pretendido en el presente capítulo, una de las mayores dificultades que ha presentado el presente trabajo ha sido caracterizar cada uno de los parámetros de los distintos flujos que influyen en dicho análisis exergético, fundamentalmente los parámetros relativos a los flujos de purín, debido, principalmente, a la escasa información al respecto que figuraba en la memoria de la planta objeto de estudio [5]. Ante esta dificultad, se contactó directamente con Sodemasa, actualmente Sarga, con el objetivo de obtener un mayor conocimiento tanto del funcionamiento en general de la planta proyectada como de los parámetros más relevantes desde el punto de vista exergético. No obstante, teniendo en cuenta que la planta objeto de estudio a fecha del presente trabajo no está todavía construida, dichos técnicos no disponían de información real relativa por ejemplo al rendimiento de los distintos procesos (eliminación de materia orgánica o de nitrógeno y fosforo, entre otros aspectos), si bien, cae señalar, que la visión general del funcionamiento de una planta de tratamiento de purines facilitada por los mismos resultó vital para la realización del presente trabajo. Por lo tanto, para completar la caracterización de los flujos de purín, se realizó una amplia búsqueda de información con el objeto de recopilar toda la información necesaria para llevar a cabo el análisis exergético pretendido. En el anexo III se ha analizado detalladamente la caracterización de cada uno de los flujos, calculándose sus parámetros más importantes desde el punto de vista exergético.

### **3.1.- Ambiente de referencia.**

Para llevar a cabo un análisis exergético, lo primero que debe definirse es un ambiente de referencia.

En primer lugar, cabe señalar que la exergía de cualquier sustancia puede ser separada en exergía física y exergía química. La exergía física representa el trabajo que se puede obtener por el llevar el sistema hasta las condiciones de temperatura y presión del ambiente de referencia, manteniendo su composición constante. Por otro lado, la exergía química representa el trabajo que se puede obtener por llevar una sustancia al equilibrio químico con el ambiente de referencia a temperatura y presión constante. Esta exergía química tiene dos contribuciones: la exergía de reacción, resultante de las reacciones necesarias para producir un compuesto a partir de las sustancias existentes en el ambiente de referencia; y la exergía de concentración, resultado de la diferencia de concentración de una sustancia con la concentración en

el ambiente de referencia. Por lo tanto, la exergía de cualquier sustancia o proceso tiene que ser calculada con respecto a un ambiente de referencia.

Determinar un ambiente de referencia para llevar a cabo un análisis exergético es complejo, ya que hay discrepancias por parte de distintos investigadores a la hora de elegir uno u otro sistema de referencia para este análisis (Gaggioli and Petit [13], Sussman [14], Ahrendt [15], Van Gool [16], Szargut [17], Szargut et al. [18]).

Según varios investigadores [19] y [20], en el caso del recurso hidrológico el ambiente natural de referencia elegido es el agua de mar. En el ciclo hidrológico, el mar es la referencia natural a la cual van a parar las corrientes de los ríos, diluyéndose el agua dulce en la masa de agua salada, alcanzándose de esta forma el equilibrio termodinámico y perdiendo toda posibilidad de producir trabajo ( $T^a$ , presión, velocidad,...).

El agua de mar se puede suponer compuesta por agua pura y por una mezcla de materia inorgánica disuelta en forma de sales. Además, existen otros compuestos de nitrógeno y fosforo, así como de materia orgánica, también presentes en el agua de mar pero en bajas concentraciones.

Por lo tanto, el ambiente de referencia elegido para el agua en el análisis realizado en el presente trabajo será el agua del mar Mediterráneo, considerándose que solamente está compuesto por sales disueltas en el agua pura [20], ya que de esta manera se pretende remarcar la diferencia entre el agua contaminada debido a las secreciones porcinas (con presencia principalmente de materia orgánica, nitratos y fosfatos) y el agua de mar (Ver anexo III).

Por otro lado, el ambiente estable de referencia para otro tipo de sustancias distintas del agua, como compuestos gaseosos y fluidos térmicos estudiados en el presente trabajo, queda definido según el ambiente de referencia de Szargut [17] para las siguientes condiciones:

- $T_o$ , temperatura del ambiente de referencia, 298,15K.
- $P_o$ , presión del ambiente de referencia, 1,01325 bar.

### **3.2.- Exergía de los flujos de purín.**

La exergía de los flujos de purín estará compuesta por las dos componentes, indicadas anteriormente: la componente física y la química de la exergía. De este modo, la exergía de estos flujos va a quedar definida por su masa y por seis parámetros: temperatura, presión, composición, concentración, velocidad y altitud [19].

Considerándose un fluido incompresible, la exergía específica puede ser calculada mediante la siguiente expresión [17]:

$$b_{H_2O} (kJ / kg) = \underbrace{c_{p,H_2O} \left[ T - T_0 - T_0 \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right]}_{\text{Exergía térmica}} + \underbrace{v_{H_2O} (p - p_0)}_{\text{Exergía mecánica}} + \underbrace{\left[ \sum_i y_i \left( \Delta G_{f,i} + \sum_s n_s b_{ch,n_e} \right) \right]_p}_{\text{Exergía química}} + \underbrace{RT_0 \sum_i x_i \ln \frac{a_i}{a_0}}_{\text{Exergía concentración}} + \underbrace{\frac{1}{2} \left( \frac{C^2 - C_0^2}{1000} \right)}_{\text{Exergía cinética}} + \underbrace{g (z - z_0)}_{\text{Exergía potencial}} \quad (\text{Ec.1})$$

En la ecuación 1, el primer término corresponde a la componente térmica de la exergía, el segundo representa la componente mecánica, el quinto la componente cinética, mientras que el último hace referencia a la componente potencial (todas estas componentes determinan la exergía física). Los términos tercero y cuarto representan las componentes de formación y de concentración, componentes que determinan la exergía química.

En el presente trabajo no se tendrán en cuenta las componentes físicas para el cálculo de la exergía de los flujos de purín (exergía térmica, exergía mecánica, exergía cinética y exergía potencial), al no ser significativas las variaciones de temperatura, presión, velocidad y altitud en las plantas de tratamiento de purines.

Por lo tanto, el cálculo de la exergía para los flujos de purín en los distintos procesos vendrá definido únicamente por exergía química de sus componentes, los cuales, según la caracterización de los purines de cerdo de la zona de Capella llevado a cabo por Sodemasa [5], contienen tres tipos básicos de sustancias, además del agua: las cargas formadas por compuestos de carbono (DQO-DBO<sub>5</sub>), las cargas formadas por compuestos de nitrógeno (N-NH<sub>4</sub>-N-NH<sub>3</sub>-Norg), así como los compuestos de fosforo, sobretudo en forma de fosfato (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Para dicho cálculo de exergía se seguirá la metodología expuesta en [22].

$$b_{\text{purín}} = b_{MI} + b_{MO} + b_N + b_P \quad (\text{Ec.2})$$

donde:

- $b_{MI}$ , representa la exergía de la materia inorgánica compuesta por el agua pura y la contribución de las sales disueltas, calculada como exergía de concentración al considerarse sustancias presentes en el ambiente de referencia.
- $b_{MO}$ ,  $b_N$  y  $b_P$ , representan la exergía química de la materia orgánica y de los compuestos de nitrógeno y fosforo presentes en purín, ambos calculados como exergía química de formación al no considerarse presentes en el ambiente de referencia.

La exergía de la **materia inorgánica**, tanto del agua pura como de las sales, vendrá definida como la exergía química de concentración:

$$b_{ch,c} = R T_o \sum_i x_i \ln(a_i/a_o) \quad (Ec.3)$$

donde:

- $R$ , constante cuyo valor es 8,314 kJ/molK.
- $T_o$ , la temperatura para el ambiente de referencia (298,15K).
- $x_i$ , representa la concentración molar de cada elemento de la mezcla.
- $a_i$ , representa la actividad de la especie en la mezcla.
- $a_o$ , representa la actividad de la especie en el ambiente de referencia.

El cálculo de las actividades de las sales disueltas en el agua se debe llevar a cabo mediante las siguientes expresiones [23]:

$$a_i = \gamma_i m_i \quad (Ec.4)$$

donde:

- $m_i$ , representa la molalidad de cada sustancia. La molalidad (moles de soluto por cada kilogramo de agua) de cada especie disuelta en el agua, puede obtenerse a partir de la salinidad del agua [24]:

$$m_i = w_i \left( \frac{1}{PM_i} \right) \left( \frac{1000}{\frac{1-C}{1000}} \right) \quad (Ec.5)$$

Donde  $w_i$  es la fracción másica del compuesto en la disolución,  $PM_i$  es el peso molecular del compuesto  $i$  y  $C$  representa la salinidad.

- $\gamma_i$ , representa el coeficiente de activación. Este coeficiente puede obtenerse a partir de las siguientes expresiones:

$$\ln \gamma_i = \frac{-Az_i^2 \sqrt{I}}{1+B\phi_i \sqrt{I}} \quad (Ec.6) \quad I = \frac{1}{2} \sum_i m_i z_i^2 \quad (Ec.7)$$

Donde  $z$  es la valencia del ión,  $\phi_i$  es diámetro efectivo del ión,  $I$  es la fuerza iónica del electrolito y  $A$  y  $B$  dos constantes, cuyo valor para el agua a 25°C es de  $0,51 \text{ kg}^{1/2} \text{ mol}^{-1/2}$  y  $3,287 \cdot 10^9 \text{ kg}^{1/2} \text{ m}^{-1} \text{ mol}^{-1/2}$  respectivamente [23].

Al conocerse la salinidad para el ambiente de referencia definido en el presente trabajo (36.700 ppm), podría obtenerse la actividad de referencia para los iones cloro y sodio, sabiendo que su valencia es 1 y que el diámetros efectivo del ión es de  $3 \cdot 10^{-10}$  y  $4,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$  respectivamente ( $a_{rCl}=0,3845$ ;  $a_{rNa}=0,4232$ ). Por otro lado, en el caso del agua pura, en el cálculo de su actividad se puede considerar que el agua pura es un componente de la mezcla, por lo que aplicando la ecuación 8 y teniendo en cuenta que  $m_{tot}$  representa la molalidad de los solutos (Na y Cl en nuestro caso), se obtiene un valor de 0,9778.

$$a_{rH_2O} = 1 - 0,017 m_{tot} \quad (Ec.8)$$



En el presente trabajo, al desconocerse la salinidad del agua presente en los purines de la planta de Capella (Huesca), no podrá calcularse la actividad en la mezcla ni, por lo tanto, la exergía de concentración de la materia inorgánica. Así pues, ante la imposibilidad de conseguir tal información, se considerará un valor para la exergía de concentración de la materia inorgánica junto con el agua de 2,5 kJ/kg purín, valor promedio obtenido en el estudio de las aguas de una potabilizadora y dos depuradoras de Zaragoza [22].

La exergía de la **materia orgánica** presente en el purín se calculará utilizando el estudio llevado a cabo por Tai [25], en el que representando la materia orgánica como  $C_aH_bO_c$  (a, b y c son la cantidad de átomos de carbono, hidrogeno y oxigeno en la molécula), obtuvo relaciones entre los parámetros medidos para determinar la materia orgánica en los flujos (TOD: Total Oxygen Demand –Demanda Química de Oxígeno, DQO; TOC: Total Organic Carbon –Carbono Orgánico Total, COT) y su exergía química, las cuales se indican a continuación:

$$b_{MO} (J/l) = 13,6 \times TOD (mg/l) \quad (Ec.9)$$

$$b_{MO} (J/l) = 45 \times TOC (mg/l) \quad (Ec.10)$$

En el caso de los **compuestos de nitrógeno y fosforo**, la aplicación de la aplicación de la ecuación 11 nos daría la exergía de formación a partir de las energías estándar de los elementos que dan lugar al compuesto.

$$b_{ch}^0 (kJ/mol) = \sum_i y_i (\Delta G_{fi} + \sum_e n_e b_{ch,ne}) \quad (Ec.11)$$

Para determinar la exergía del nitrógeno tomaremos la cantidad de nitrógeno total, es decir el nitrógeno Kjeldahl, ya que éste incluye tanto el nitrógeno amoniacal como el orgánico. No obstante, para determinar la exergía específica de formación del nitrógeno, lo consideraremos como amonio ( $NH_4^+$ ), ya que esta forma del nitrógeno representa un mayor porcentaje en el total, según la caracterización de los purines que figura en la memoria de la planta de Sodemasa [5]. Por lo tanto, de acuerdo con Szargut [23], la exergía de formación del nitrógeno es  $b_{ch,N} = 322,1$  kJ/mol, mientras que la del fosforo, el cual está presente en el compuesto  $P_2O_5$ , es  $b_{ch,P} = 382,95$  kJ/mol.

Por lo tanto, teniendo en cuenta lo expuesto en el presente apartado, la exergía específica tanto de la materia orgánica como del nitrógeno y del fósforo, se determinará por medio de las siguientes expresiones:

$$b_{MO} \text{ (kJ/kg purín)} = \frac{13,6 \left( \frac{J}{mg} \right) \cdot DQO \left( \frac{mg}{l} \right)}{\rho_{purín} \left( \frac{kg}{m^3} \right)} \quad (Ec. 12)$$

$$b_P \text{ (kJ/kg purín)} = \frac{b_{ch,P2O5}^o \left( \frac{kJ}{mol} \right) \cdot P \left( \frac{mg}{l} \right)}{PM_{P2O5} \left( \frac{g}{mol} \right) \cdot \rho_{purín} \left( \frac{kg}{m^3} \right)} \quad (Ec. 13)$$

$$b_N \text{ (kJ/kg purín)} = \frac{b_{ch,NH4}^o \left( \frac{kJ}{mol} \right) \cdot NTK \left( \frac{mg}{l} \right)}{PM_{NH4} \left( \frac{g}{mol} \right) \cdot \rho_{purín} \left( \frac{kg}{m^3} \right)} \quad (Ec. 14)$$

### **3.2.- Exergía asociada a los flujos en procesos de valorización del purín concentrado. Biogás.**

Mediante el proceso de digestión anaerobia de los fangos de la planta de tratamiento de purines seleccionada, se obtiene un gas con un alto contenido en metano (60%) denominado biogás, el cual puede ser empleado como combustible.

La obtención de la exergía asociada a la corriente de biogás viene dada por la suma de la componente física y química, suponiendo el combustible gaseoso como una mezcla ideal de gases. Con estas suposiciones se ha aplicado la metodología desarrollada por Valero y Lozano [26] para determinar la exergía química del biogás:

$$b_{ch} \text{ (kJ/mol)} = \sum x_i (b_{chi}^o + R T_o \ln x_i) \quad (Ec. 15)$$

Donde:

- $x_i$ , representan la fracción molar de la sustancia en la mezcla.
- $T_o$ , la temperatura para el ambiente de referencia (298,15K).
- $R$ , constante cuyo valor es 8,314 kJ/molK.
- $b_{chi}^o$ , exergía de formación de la sustancia de la mezcla.

Por otro lado, la componente de la exergía física se calcula de la siguiente manera:

$$b_{física} \text{ (kJ/kg)} = \sum x_i ((h_i - h_o) - T_o (s_i - s_o)) \quad (Ec. 16)$$

Donde:

- $h$  y  $s$  representan la entalpía y entropía del fluido a la temperatura y presión de trabajo (300K y 1,5bar).
- $h_o$ ,  $s_o$  y  $T_o$  representan los valores de entalpía, entropía y temperatura para el ambiente de referencia (298,15K y 1,01325bar).

### **3.3.- Exergía asociada a flujos de energía.**

Dentro de los flujos de energía, se consideran los procesos de transferencia de electricidad y de calor.

- *Flujos eléctricos:* su contenido energético es igual a su contenido en exergía.
- *Flujos de calor:*

$$B \text{ (kW)} = E \cdot ((h_1 - h_2) - T_o (s_1 - s_2) / (h_1 - h_2)) \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

- o *E*, representa el valor energético de la corriente de calor.
- o *T<sub>o</sub>*, representa la temperatura a la cual tiene lugar el proceso de calor.
- o *s<sub>1</sub>*, entropía del agua a la salida del motor.
- o *s<sub>2</sub>*, entropía del agua de retorno.
- o *h<sub>1</sub>*, entalpía del agua a la salida del motor.
- o *h<sub>2</sub>*, entalpía del agua de retorno.

### **3.4.- Exergía asociada a los flujos de residuos en el proceso de tratamiento (Co-digestión).**

Como ya se ha comentado anteriormente, en el presente trabajo se van a analizar tres casos diferentes de co-digestión: uno con paja de trigo, otro con glicerina y otro con una mezcla de residuos industriales (grasa), residuos de matadero y residuos vegetales (paja de trigo).

#### **3.4.1.- Exergía asociada a los flujos de paja de trigo.**

La composición elemental de la paja de trigo es: un 45,6% de Carbono, un 5,7% de hidrogeno, un 40% de oxigeno, un 0,7% de nitrógeno, 0,09 de azufre y un 7,9% de cenizas, presentando un poder calorífico de 14.472 kJ/kg [27].

Según Kotas [28], la exergía química de los combustibles sólidos y líquidos se puede calcular asumiendo un coeficiente entre el valor de exergía química contenida y su poder calorífico.

$$\varphi = \frac{b_{ch}^0}{PCI} \quad (\text{Ec. 18})$$

Este coeficiente puede ser calculado a partir del análisis elemental en base seca y fracciones másicas mediante la siguiente expresión:

$$\varphi = 1,0437 + 0,1882 \cdot \frac{h}{c} + 0,0610 \cdot \frac{o}{c} + 0,0404 \cdot \frac{n}{c} \quad (Ec.19)$$

#### 3.4.2.- Exergía asociada a los flujos de glicerina.

La glicerina o glicerol se genera en grandes cantidades como co-producto del proceso de fabricación de biodiesel, siendo su exergía 22.300kJ/kg [29].

#### 3.4.3.- Exergía asociada a los flujos de grasa.

La molécula que representa a la mayoría de los ácidos grasos presentes en la naturaleza es  $C_{12}H_{32}O_2$ , la cual tiene un peso molecular de 282g/mol y poder calorífico de 38.874kJ/kg [30].

Al igual que en el caso de la paja de trigo, la exergía química de la grasa puede ser calculada mediante la ecuación 18.

En este caso, el coeficiente puede ser calculado a partir del análisis elemental en base seca y fracciones másicas, según la ecuación 19. Para el caso de las grasas, los valores de hidrogeno, carbono, nitrógeno y oxígeno son 0,113, 0,766, 0 y 0,113 respectivamente.

#### 3.4.4.- Exergía asociada a los flujos de residuos de matadero.

La composición de los efluentes de los mataderos, los cuales contienen, aparte de una cantidad importante de agua, sangre, estiércol, pelos, grasas, huesos, proteínas y otros contaminantes solubles, depende del proceso de producción, de la separación en la descarga de materias como sangre, intestinos y desechos del suelo, variando incluso dicha composición de un día a otro [31]. En el Anexo III se detalla la composición utilizada para el cálculo de la exergía de dichos residuos.

La exergía de los flujos de residuos de matadero se calculara igual que la de los flujos de purín, es decir, mediante las ecuaciones 2, 12, 13 y 14.

### 3.5.- Resultados del análisis exergético.

Mediante la aplicación del programa informático EES (Engineering. Equation Solver), programa que permite resolver numéricamente miles de ecuaciones no lineales,

disponiendo de una amplia base de datos de propiedades termodinámicas y de transporte para cientos de sustancias, se han simulado los cuatro casos de estudio:

- **Caso I.** *Análisis del funcionamiento de la planta seleccionada sin co-digestión.*
- **Caso II.** *Análisis del funcionamiento de la planta seleccionada con co-digestión de paja de trigo.*
- **Caso III.** *Análisis del funcionamiento de la planta seleccionada con co-digestión de glicerina.*
- **Caso IV.** *Análisis del funcionamiento de la planta seleccionada con co-digestión de residuos industriales, residuos de matadero y residuos de vegetales.*

A continuación se muestran los resultados obtenidos relativos a la exergía contenida en cada uno de los flujos de la planta de tratamiento de purines de Capella: flujos de 1 a 11 son los flujos de purín; flujos de 13 a 19 son los flujos energéticos; flujo 12 es el flujo asociado al proceso de valoración de fangos (biogás); flujo 20, es el flujo del sustrato o sustratos añadidos al tratamiento en caso de existir co-digestión.

FLUJO	SIN CO-DIGESTIÓN <i>Exergía, kW</i>	CO-DIGESTIÓN con paja de trigo <i>Exergía, kW</i>	CO-DIGESTIÓN con glicerina <i>Exergía, kW</i>	CO-DIGESTIÓN con residuos <i>Exergía, kW</i>
1	1687	1687	1687	1687
2	1347	1347	1347	1347
3	710,1	710,1	710,1	710,1
4	420,1	420,1	420,1	420,1
5	159,2	159,2	159,2	159,2
6	636,6	636,6	636,6	636,6
7	260,9	260,9	260,9	260,9
8	339,9	339,9	339,9	339,9
9	631,8	760,6	741,2	6774
10	370,8	499,6	480,3	6513
11	260,9	260,9	260,9	260,9
12	584,6	643,1	1462	6514
13	0,18	0,18	0,18	0,18
14	0,25	0,25	0,25	0,25
15	110,8	110,8	110,8	110,8
16	0,25	0,25	0,25	0,25
17	19,5	19,5	19,5	19,5
18	70,37	76,71	90,43	287,8
19	21,06	37,06	335,1	2063
20	-	198,5	1084	16320

Tabla 2. Resultados exegéticos de los flujos de los cuatro casos analizados.

Por lo tanto, a la vista de los resultados del análisis exergético se puede obtener las siguientes conclusiones:

- Algunos de los flujos de purín de la planta (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 11) no cambian su contenido exergético pese a llevarse a cabo los distintos tipos de co-digestión. Esta invariabilidad se debe a que la adición de co-sustratos a la digestión anaerobia, donde se encuentra el purín concentrado, no afecta al línea del clarificado (suponiéndose también invariable para los cálculos el flujo 11, flujo de recirculación del digerido clarificado). Por otro lado, en cuanto a los flujos energéticos de consumo de la planta (del 13 al 18), tan solo varía el flujo 18 relativo al consumo del digestor, ya que algunos co-sustratos para poder ser digeridos es necesario someterlos a una pre-tratamiento, tal y como se ha explicado en el Anexo III.
- Los flujos del 1 al 8, todos ellos flujos de purín, presentan un alto contenido exergético, principalmente debido a la materia orgánica (tablas 80, 83, 87 y 91), sin verse éstos alterados por la adición de co-sustratos a la digestión.
- Los flujos 9 y 10, flujos de purín, correspondientes al digerido y al digerido sólido respectivamente, también presentan un alto contenido exergético debido a la materia orgánica presente en su composición. En este caso, estos flujos se ven afectados por la adición de co-sustratos, comprobándose que pese a que hay un mayor aporte de exergía en el caso III con los co-sustratos respecto caso II (flujo 20), la exergía de estos flujos disminuye debido al mejor rendimiento de la digestión anaerobia con glicerina que con paja de trigo.
- Del mismo modo, el flujo 11, flujo de purín, correspondiente al digerido clarificado también contiene un alto contenido exergético sin verse afectado por la co-digestión, ya que se ha considerado que al ser líquido clarificado con un alto contenido en agua, apenas se ve modificada su composición con la adición de co-sustratos a la digestión.
- La exergía del flujo 12, flujo de biogás, aumenta conforme aumenta la exergía de los sustratos añadidos (flujo 20). La exergía contenida en dicho flujo se debe fundamentalmente a su componente química (tablas 81, 84, 88 y 92).
- La exergía contenida en los flujos energéticos debidos al consumo de la propia planta (flujos del 13 al 18) es muy pequeña comparándola con la exergía de los flujos anteriores, salvo en el caso del flujo 15, debida al alto consumo eléctrico del biorreactor en el tratamiento biológico.
- La exergía del flujo 19, flujo energético correspondiente a la energía sobrante de la planta, aumenta conforme aumenta la exergía de los sustratos añadidos

(flujo 20). Como se puede observar en las tablas 82 y 85, en el caso de que no exista ningún tipo de co-digestión o se produzca una co-digestión con paja de trigo, la exergía de dicho flujo se debe fundamentalmente al calor sobrante, ya que en estos casos, la energía eléctrica generada por la planta está destinada prácticamente en su totalidad a cubrir las necesidades de la misma. Por otro lado, tanto en la co-digestión con glicerina como con mezcla de distintos residuos, tal y como se puede observar en las tablas 89 y 93, la exergía del flujo 19 se debe principalmente a la energía eléctrica sobrante generada por la misma.

Por otro lado, una vez analizada la exergía contenida en cada uno de los flujos, y teniendo en cuenta la distribución de los mismos (Figura 1), a continuación se va a estudiar la irreversibilidad de cada uno de los procesos de los que está compuesta la planta analizada.

La irreversibilidad es la magnitud física que representa la energía perdida o destruida (destrucción de exergía) en los procesos físicos.

$$\text{Irreversibilidad} = \text{Exergía de entrada } (B_{input}) - \text{Exergía de salida } (B_{output}) > 0$$

A continuación se muestran las irreversibilidades que presentaron los distintos procesos en cada uno de los casos analizados.

PROCESO	SIN CO-DIGESTIÓN	CO-DIGESTIÓN con paja de trigo	CO-DIGESTIÓN con glicerina	CO-DIGESTIÓN con residuos
<b>Desbaste</b>	0,3	0,3	0,3	0,3
<b>Decantación Primaria</b>	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>Tratamiento Biológico</b>	<b>661,7</b>	<b>661,7</b>	<b>661,7</b>	<b>661,7</b>
<b>Decantación Sec.</b>	5,1	5,1	5,1	5,1
<b>Digestión</b>	<b>91,4</b>	<b>108,9</b>	<b>208,6</b>	<b>4557,2</b>
<b>Pulmón/Centrífuga</b>	19,8	19,9	19,8	20,8
<b>Cogeneración</b>	<b>362,2</b>	<b>398,4</b>	<b>905,5</b>	<b>4032,2</b>

Tabla 3. Irreversibilidades presentes en los distintos procesos para cada uno de los casos analizados en la planta de tratamiento de purines de Capella (unidades expresadas en kW).

A la vista de los resultados, podemos observar que los procesos con mayores irreversibilidades son: *la digestión, la cogeneración y el tratamiento biológico*:

- En el caso de *la digestión y de la cogeneración*, estas irreversibilidades tienen lugar porque estos equipos no son perfectos, y conforme aumenta la producción de biogás con la co-digestión, lógicamente aumenta su irreversibilidad.
- El caso del *tratamiento biológico* es diferente, ya que dicho proceso está proyectado para que sea irreversible, es decir, para conseguir una disminución de nitrógeno y de materia orgánica (DQO). Dicho proceso esta dimensionado para reducir el nitrógeno sobrante, ya que si hay un excedente de este nutriente debe ser transportado a largas distancias para poder ser aplicado en el suelo, lo que conlleva un alto coste en transporte.

Por otro lado, se puede comprobar que la irreversibilidad en este proceso se mantiene constante independientemente del caso analizado, lo cual es debido a que la adición de sustratos para la co-digestión influye directamente en el proceso de la digestión, al producirse un mayor biogás, y por lo tanto también en la cogeneración, y mínimamente en la decantación centrífuga, al incrementarse por un lado el digerido a decantar (flujo 9) pero también el digerido sólido obtenido (Flujo 10). El líquido clarificado tras la decantación centrífuga (flujo 11), el cual se recircula hacia el tratamiento biológico, puede verse mínimamente alterado por la adición de sustratos, si bien, al estar formado principalmente por agua, se ha considerado invariable en el presente trabajo, motivo por el cual no se refleja ninguna variación en el tratamiento biológico.



#### **4. ANÁLISIS TERMOCNÓMICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE PURINES DE CAPELLA.**

El análisis termoeconómico combina el análisis termodinámico y el económico aplicando el concepto del coste (originariamente una propiedad económica) a la exergía (una propiedad termodinámica). La mayoría de los expertos en esta materia están de acuerdo en que la exergía es la propiedad termodinámica más adecuada para asociarla al coste, ya que contiene información de la Segunda Ley de la Termodinámica y tiene en cuenta la calidad de la energía [32], [33], [34] y [35]. En el anexo IV se ha llevado a cabo una recopilación de los principales fundamentos termoeconómicos.

##### **4.1. Estructura productiva.**

Lo primero que hay que analizar para estudiar la estructura productiva de la planta de tratamiento de purines de Capella es el objetivo final de dicha planta. El objetivo de cualquier planta de tratamiento de purines, desde el punto de vista productivo (ya que el objetivo principal de las plantas de tratamiento de purines es acabar con la contaminación generada por las deyecciones ganaderas), y para lo cual se añaden sustratos a la digestión, es, principalmente, obtener un gas con alto contenido en metano (sin co-digestión el gas obtenido apenas genera energía eléctrica a cubrir las demandas de la propia planta), a partir de los lodos del purín. Además, en este proceso de tratamiento de purines también se obtiene, por un lado, fertilizante sólido, que puede ser utilizado en los cultivos agrícolas, y, por otro lado, líquido depurado apto para la fertirrigación de las fincas adyacentes a la planta, ya que ambos productos contienen nutrientes idóneos para abonar los cultivos agrícolas.

Por otro lado, cada componente de la planta tiene un propósito productivo que contribuye a alcanzar el objetivo final de producción de la planta. En el Anexo I se ha explicado en profundidad el funcionamiento de cada uno de los componentes, no obstante, a continuación se va a explicar brevemente el objetivo productivo de cada uno de los componentes indicados en la figura 1.

- *1. Desbaste.* El objetivo de esta etapa es separar la parte sólida de la líquida una vez recepcionado el purín, siendo la parte sólida enviada al digestor para la producción de biogás.

- 2. *Decantación primaria*. Al igual que el desbaste, el objetivo de esta etapa es volver separar nuevamente la parte sólida de la líquida del flujo clarificado proveniente del desbaste, siendo la parte sólida enviada al digestor para la producción de biogás.
- 3. *Tratamiento biológico*. El objetivo de esta etapa es reducir el nitrógeno amoniacal mediante dos etapas consecutivas: nitrificación y desnitrificación.
- 4. *Decantación secundaria*. Al igual que en la decantación primaria, el objetivo de esta etapa es volver separar nuevamente la parte sólida en el flujo proveniente del tratamiento biológico, para enviarla al digestor.

La parte líquida (clarificado, flujo 5), se utilizará para fertirrigación de las fincas próximas a la planta, ya que dicho clarificado proporciona un aporte importante de nutrientes. Por lo tanto, teniendo en cuenta que los nutrientes, nitrógeno y fosforo, son utilizados como fertilizantes, pero que la materia orgánica contenida en este flujo no tiene un destino final útil, para el análisis termoeconómico se considerará al flujo 5 como suma de dos flujos: flujo de nutrientes considerados como producto útil (flujo 5) y flujo de materia orgánica considerado como producto no aprovechable (flujo 22), requiriendo, por lo tanto, este flujo 22 un equipo disipativo (llamado más adelante “disipativo balsa”).

- 5. *Digestor*. El objetivo del digestor es producir un gas con alto contenido en metano, a partir de la parte sólida del purín.
- 6. *Pulmón/Centrífugadora*. El objetivo de esta etapa es la concentración del fango. La parte líquida (digerido líquido) se recirculará hacia el tratamiento biológico ya que contiene todavía un alto contenido de nitrógeno amoniacal.



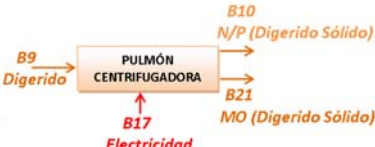


La parte sólida (digerido sólido), al poseer un alto contenido en nutrientes, se utilizara como fertilizante, sustituyendo al abono mineral requerido por el suelo. Por lo tanto, al igual que ocurría con el clarificado tras la decantación secundaria, teniendo en cuenta que los nutrientes, nitrógeno y fosforo, son utilizados como fertilizantes, pero que la materia orgánica contenida en este flujo no tiene un destino final útil, para el análisis termoeconómico se considerará al flujo 10 como suma de dos flujos: flujo de nutrientes considerados como producto útil (flujo 10) y flujo de materia orgánica considerado como producto no aprovechable (flujo 23), requiriendo, por lo

tanto, este flujo 23 un equipo disipativo, (llamado más adelante “disipativo digerido”).

- 7. *Cogeneración*. El objetivo de esta etapa es transformar el gas con alto contenido en metano proveniente del digestor tanto en energía eléctrica como en energía térmica.

Una vez analizado el objetivo de cada uno de los procesos, a continuación se indican las definiciones Fuel-Producto de los procesos tanto productivos como disipativos:

PROCESO	FUEL	PRODUCTO
<p><b>1. DESBASTE</b></p>	<p>Diferencia entre el purín virgen y la parte líquida de éste, más la energía eléctrica para accionar la reja automática circular de este proceso.</p> <p><b><math>B1-B2+B13</math></b></p>	<p>Exergía del purín concentrado.</p> <p><b><math>B8</math></b></p>
<p><b>2.DECANTACIÓN PRIMARIA</b></p>	<p>Diferencia de exergía entre el clarificado proveniente del desbaste inicial y la parte líquida de éste, más la energía eléctrica consumida por la bomba destinada a impulsar los fangos hacia el digestor.</p> <p><b><math>B2-B3+B14</math></b></p>	<p>Exergía del purín concentrado.</p> <p><b><math>B6</math></b></p>
<p><b>3.TRATAMIENTO BIOLÓGICO</b></p>	<p>Exergía del clarificado proveniente de la decantación primaria, del digerido líquido proveniente de la digestión y la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento tanto para las bombas como del Biorreactor.</p> <p><b><math>B3+B11+B15</math></b></p>	<p>Exergía del clarificado con bajo contenido en nitrógeno amoniacal.</p> <p><b><math>B4</math></b></p>

<p><b>4.DECANTACIÓN SECUNDARIA</b></p> 	<p>Diferencia entre la exergía del clarificado proveniente del tratamiento biológico y la de la Materia Orgánica y nutrientes, más la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de una bomba.</p> <p><b>B4-B22-B5+B16</b></p>	<p>Exergía del purín concentrado.</p> <p><b>B7</b></p>
<p><b>5.DIGESTIÓN</b></p> 	<p>Diferencia entre la exergía de los lodos de purín provenientes de los diferentes procesos y la del digerido, más la de los sustratos añadidos para mejorar la digestión y la energía tanto eléctrica como termina para llevar a cabo dicha digestión.</p> <p><b>B6+B7+B8-B9+B20+B18</b></p>	<p>Exergía del biogás producido.</p> <p><b>B12</b></p>
<p><b>6.CENTRIFUGADORA</b></p> 	<p>Diferencia entre la exergía del digerido y la del digerido líquido, más la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de los equipos de la decantación centrífuga</p> <p><b>B9-B11+B17</b></p>	<p>Exergía de los nutrientes aprovechables como fertilizantes y la de la materia orgánica no aprovechable.</p> <p><b>B10+B21</b></p>
<p><b>7.COGENERACIÓN</b></p> 	<p>Exergía del biogás.</p> <p><b>B12</b></p>	<p>Exergía de todos los flujos de energía de la planta, tanto de autoconsumo como exportables.</p> <p><b>B13+B14+B15+B16+B17+B18+B19</b></p>
<p><b>8. DISIPATIVO DIGERIDO</b></p> 	<p>Exergía en la materia orgánica no aprovechable.</p> <p><b>B21</b></p>	<p><b>B23</b></p>


<p><b>9. DISIPATIVO BALSA</b></p> 	<p><i>Exergía en la materia orgánica no aprovechable.</i></p> <p><b>B22</b></p>	<p><b>B24</b></p>
---	---	-------------------

Tabla 4. Definiciones Fuel-Producto de los distintos procesos de la planta de tratamiento de Capella (Huesca).

Una vez analizadas las definiciones Fuel-Producto para cada uno de los procesos por separado, así como el objetivo de dichos procesos, en la figura 2 que se muestra a continuación, se ilustra, de una manera esquematizada, la estructura productiva de la planta de tratamiento objeto de estudio.

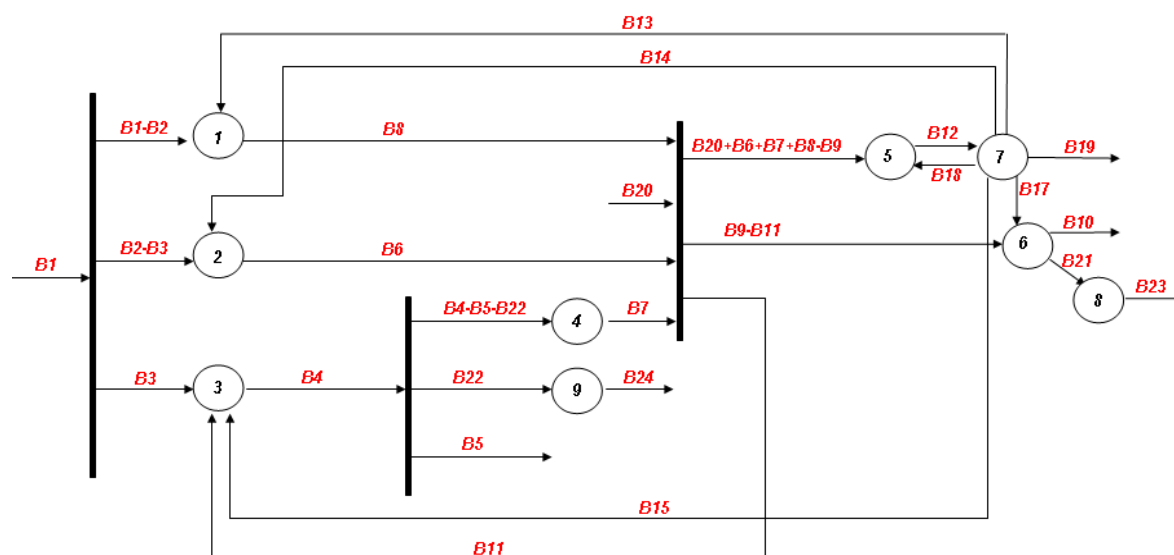


Figura 2. Estructura productiva de la planta de tratamiento de purines de Capella.

Teniendo en cuenta la estructura productiva definida para la planta de tratamiento de purines objeto de estudio (figura 2), a continuación se muestra el modelo de cálculo la tabla F-P para la planta de tratamiento de purines analizada en el presente trabajo. La tabla Fuel-Producto es la representación matricial de la interdependencia del proceso productivo de un sistema, siendo los “input” de cada proceso sus recursos y los “output” sus productos. En el anexo IV se han mostrado las tablas F-P para cada uno de los cuatro casos analizados.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F0
P0	B1 - B2	B2 - B3	$B3 + \frac{B20 \cdot B11}{(B6 + B7 + B8 + B20)}$	0	$\frac{B20 \cdot (B6 + B7 + B8 - B9 + B20)}{(B20 + B6 + B7 + B8)}$	$\frac{B20 \cdot (B9 - B11)}{(B6 + B7 + B8 + B20)}$	0	0	0	0
P1	0	0	$\frac{B8 \cdot B11}{(B6 + B7 + B8 + B20)}$	0	$\frac{B8 \cdot (B6 + B7 + B8 - B9 + B20)}{(B6 + B7 + B8 + B20)}$	$\frac{B8 \cdot (B9 - B11)}{(B6 + B7 + B8 + B20)}$	0	0	0	0
P2	0	0	$\frac{B6 \cdot B11}{(B6 + B7 + B8 + B20)}$	0	$\frac{B6 \cdot (B6 + B7 + B8 - B9 + B20)}{(B6 + B7 + B8 + B20)}$	$\frac{B6 \cdot (B9 - B11)}{(B6 + B7 + B8 + B20)}$	0	0	0	0
P3	0	0	0	$\frac{B4 \cdot (B4 - B5 - B22)}{B4}$	0	0	0	0	B22	B5
P4	0	0	$\frac{B7 \cdot B11}{(B6 + B7 + B8 + B20)}$	0	$\frac{B7 \cdot (B6 + B7 + B8 - B9 + B20)}{(B6 + B7 + B8 + B20)}$	$\frac{B7 \cdot (B9 - B11)}{(B6 + B7 + B8 + B20)}$	0	0	0	0
P5	0	0	0	0	0	0	B12	0	0	0
P6	0	0	0	0	0	0	0	B21	0	B10
P7	B13	B14	B15	B16	B18	B17	0	0	0	B19
P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B23
P9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B24

Tabla 5. Modelo de cálculo de la tabla F-P según la estructura productiva de la planta de tratamiento estudiada definida en la Figura 2.

Finalmente, y a modo de resumen, indicar que el Fuel de la planta de tratamiento de purines objeto de estudio es el purín de entrada (B1) y los sustratos utilizados en caso de co-digestión (B20), mientras que el producto final útil de la planta es la energía sobrante generada por la planta (B19), así como los nutrientes procedentes tanto del digerido (B10) como del clarificado (B5).

El proceso de tratamiento de purines genera también un producto no aprovechable, el cual será considerado como residuo. Este residuo es la materia orgánica tanto del digerido (B21) como del clarificado (B22).

En figura 3 que se muestra a continuación, se puede observar, de una manera esquematizada, el Fuel y el Producto final de la planta de tratamiento de purín objeto de estudio, indicados en el párrafo anterior.

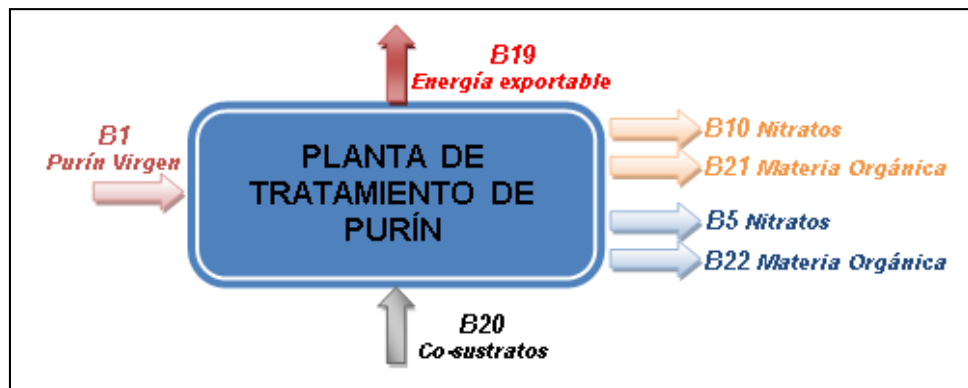


Figura 3. Fuegos y Productos de la planta de tratamiento de purines de Capella.

A continuación se indica la exergía contenida en estos flujos para cada uno de los casos analizados, calculada y analizada en el Anexo III.

Flujo	B1 (kW) Fuel	B20 (kW) Fuel	B19 (kW) Producto Aprovechable	B10 (kW) Producto Aprovechable	B5 (kW) Producto Aprovechable	B21 (kW) Producto no Aprovechable	B22 (kW) Producto no Aprovechable
Sin co-digestión	1.687	-	21,06	19,7	49,3	350,8	105
Co-dig. Paja de trigo	1.687	198,5	37,06	19,7	49,3	479,5	105
Co-dig. Glicerina	1.687	1.084	335,1	19,7	49,3	460,2	105
Co-dig. Residuos	1.687	16.320	2.063	19,7	49,3	6.492	105

Tabla 6. Resumen de la exergía contenida tanto en los distintos Fuegos como en los Productos y residuos de la planta de Capella.

Como se puede observar en la tabla anterior, los procesos de tratamiento de purines, vistos desde un punto de vista termodinámico, pueden ser considerados como anti-exergéticos, ya que, por un lado, se produce una disminución de exergía entre el estado inicial de entrada y final de salida, y, por otro lado, se genera un residuo con un alto contenido exergético, como es la materia orgánica tras la decantación secundaria y centrifuga.

#### **4.2.- Análisis de la asignación de costes de los residuos.**

No hay reglas generales para el tratamiento de los componentes disipativos, aunque en general deben ser tratados como residuos y el coste de las irreversibilidades asociadas con su operación debe ser imputada como fuel de los procesos de la planta que entran en su proceso de formación [36].

Para analizar el estudio de los costes exergéticos de los productos, en el presente trabajo se han planteado dos criterios de asignación de costes de los residuos.

##### ▪ CRITERIO 1.

Según este criterio, todo el residuo procedente del digerido, B23 (componente 8 –Disipativo Digerido–), sería asignado al proceso de digestión, mientras que el residuo procedente del clarificado, B24 (componente 9 –Disipativo Balsa–), sería asignado al tratamiento biológico únicamente. Por lo tanto, según este criterio, la matriz de los coeficientes de distribución de los residuos,  $\langle RP \rangle$ , quedaría de la siguiente manera:

«RP»	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 7. Coeficientes de distribución de residuos según el criterio 1.

#### ▪ CRITERIO 2.

En el presente trabajo se propone un nuevo criterio de asignación de los costes de los residuos en base a la exergía que se “quita” del clarificado, es decir, de la exergía tanto que se destruye como de la que pasa a la línea de fangos, ya que de esta manera, aparte de la influencia de la eficacia del tratamiento biológico, también podrá verse la influencia de la eficacia tanto del desbaste como de la decantación primaria, cuyo objetivo es separar los fangos de la corriente líquida del purín. Por lo tanto, la asignación quedaría de la siguiente manera:

##### ***Residuo procedente del clarificado, B22:***

- Desbaste: B1-B2
- Decantación 1ª: B2-B3
- Tratamiento Biológico: B3+B11-B4
- Decantación 2ª: B4-B5-B22

##### ***Residuo procedente del digerido, B21:***

En el caso del digerido, se podría asignar todo al digestor, pero, por coherencia con el clarificado, se seguiría el mismo proceso, es decir:

- Digestor: B6+B7+B8+B20-B9.
- Pulmón/Centrífuga: B9-B10-B21.

Por lo tanto, según este criterio, el modelo de cálculo de la matriz de los coeficientes de distribución de los residuos, «RP», quedaría de la siguiente manera (en el Anexo IV se muestra la matriz RP para cada uno de los cuatro casos analizados):



RP	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	$B1 - B2$
2	0	0	0	0	0	0	0	0	$(B1 - B2) + (B2 - B3) + (B3 + B11 - B4) + (B4 - B5 - B22)$
3	0	0	0	0	0	0	0	0	$B2 - B3$
4	0	0	0	0	0	0	0	0	$(B1 - B2) + (B2 - B3) + (B3 + B11 - B4) + (B4 - B5 - B22)$
5	0	0	0	0	0	0	0	0	$B3 + B11 - B4$
6	0	0	0	0	0	0	0	0	$(B1 - B2) + (B2 - B3) + (B3 + B11 - B4) + (B4 - B5 - B22)$
7	0	0	0	0	0	0	0	0	$B4 - B5 - B22$
8	0	0	0	0	0	0	0	0	$(B1 - B2) + (B2 - B3) + (B3 + B11 - B4) + (B4 - B5 - B22)$
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 8. Modelo de cálculo de los coeficientes de distribución de residuos según el criterio 1.

Teniendo en cuenta que el análisis de los residuos es sensible a la eficacia de los distintos equipos/procesos, para llevar a cabo el análisis termoeconómico pretendido en el presente capítulo, se considerará el nuevo modelo de cálculo desarrollado en el presente trabajo y definido según el criterio 2.

### 4.3. Análisis de resultados termoeconómicos.

A continuación se van ir mostrando y analizando los resultados termoeconómicos obtenidos: *eficiencia exergética*, *costes exergéticos unitarios* y *descomposición de costes exergéticos unitarios*.

#### 4.3.1.- Eficiencia exergética de los procesos.

La eficiencia exergética es definida según Valero y cols. [37] como la proporción del valor exergético de los productos (P) en relación con la exergía contenida en el fuel (F).

$$\eta = \frac{P}{F} \quad (\text{Ec. 20})$$

En la tabla 9 se muestran los resultados obtenidos relativos a la eficiencia exergética de los distintos procesos de la planta de tratamiento para cada uno de los casos analizados.

PROCESO	SIN CO-DIGESTIÓN	CO-DIGESTIÓN con paja de trigo	CO-DIGESTIÓN con glicerina	CO-DIGESTIÓN con residuos
Desbaste	99,9%	99,9%	99,9%	99,9%
Decantación Primaria	99,9%	99,9%	99,9%	99,9%
Tratamiento Biológico	38,8%	38,8%	38,8%	38,8%
Decantación Sec.	98%	98%	98%	98%
Digestión	86,4%	85,5%	87,5%	58,8%
Pulmón/Centrífuga	94,9%	96,1%	96%	99,6%
Cogeneración	38%	38%	38%	38%

Tabla 9. Eficiencia exergética de los distintos procesos para cada uno de los casos analizados en la planta de tratamiento de purines de Capella (Huesca).

A la vista de los resultados, se puede comprobar que el proceso menos eficaz, desde el punto de vista exergético, es el tratamiento biológico, ya que como ya se ha explicado anteriormente, dicho proceso está concebido para eliminar materia orgánica y nitrógeno, seguido de la cogeneración.

Por otro lado, también se puede observar que el rendimiento del digestor en la co-digestión con mezcla de residuos es muy bajo en comparación con el que presenta el resto de casos analizados. Dicha diferencia puede deberse a que en este caso, la materia orgánica de los sustratos añadidos, en concreto de los residuos industriales, considerada para el cálculo exergético puede estar sobre valorada, ya que se han tenido que realizar ciertas suposiciones al desconocerse qué tipo de grasas habían sido empleadas para el experimento en el que se determinó la cantidad de metano producido por tonelada de mezcla de residuos [11].

#### 4.3.2.- Coste exergético unitario.

El coste exergético unitario se define como la cantidad de recursos, medidos en términos de exergía, necesarios para obtener una unidad de producto, lo que permite establecer de forma objetiva el precio de los productos en cada proceso. Por tanto, el análisis de costes en el presente trabajo nos va a permitir identificar de forma objetiva el posible ahorro que conlleva incorporar una co-digestión en una planta de tratamiento de purines.

Los costes exergéticos unitarios de los productos se determinaran mediante las siguientes expresiones [37]:

$$k_P^* = \frac{P^*}{P} \quad (Ec.21)$$

Donde:

- $P^*$ , representa el vector de los costes exergéticos de los productos, kW.
- $P$ , representa el vector de los productos de los procesos ( $n \times 1$ ), kW.
- $k_P^*$ , representa el coste exergético unitario de los productos.

$$P^* = (U_D - \langle FP \rangle - \langle RP \rangle)^{-1} \cdot F_e \quad (Ec.22)$$

Donde:

- $U_D$ , representa la matriz de identidad ( $n \times n$ ).
- $\langle FP \rangle$ , representa la matriz de coeficientes de distribución ( $n \times n$ ).
- $F_e$ , representa el vector de los recursos externos de los componentes ( $n \times 1$ ), kW.
- $\langle RP \rangle$ , representa la matriz de coeficientes de distribución de los residuos ( $n \times n$ ).

En la tabla 10 se muestran los costes exergéticos unitarios de los productos obtenidos en cada uno de los procesos de la planta mediante las ecuaciones 21 y 22 (en el Anexo IV se pueden observar las operaciones anteriores detalladas para cada uno de los cuatro casos analizados).

PROCESO	SIN CO-DIGESTIÓN	CO-DIGESTIÓN con paja de trigo	CO-DIGESTIÓN con glicerina	CO-DIGESTIÓN con residuos
<b>1.Desbaste</b>	1,91	1,77	1,29	1,29
<b>2.Decantación Primaria</b>	1,90	1,77	1,29	1,29
<b>3.Tratamiento Biológico</b>	15,26	12,98	5,03	5,01
<b>4.Decantación Sec.</b>	16,49	14,02	5,43	5,41
<b>5.Digestión</b>	13,43	11,37	2,81	3,27
<b>6.Pulmón/Centrífuga</b>	9,58	6,91	2,22	1,13
<b>7.Cogeneración</b>	35,30	29,88	7,39	8,59
<b>8.Disipativo Digerido</b>	9,58	6,91	2,22	1,13
<b>9.Disipativo Balsa</b>	15,26	12,98	5,03	5,01

Tabla 10. Costes exergéticos unitarios de los productos para cada uno de los cuatro casos analizados.

A la vista de los resultados, podemos observar que los mayores costes exergéticos unitarios tienen lugar en el caso en el que no exista co-digestión alguna en el tratamiento de los purines.

Por un lado, se puede observar una tendencia decreciente de los costes en todos los procesos conforme se incrementa la producción de biogás, tanto en la co-digestión con paja de trigo como en el caso de la glicerina. En la co-digestión de paja de trigo, cuya producción de biogás es de  $733.333\text{m}^3/\text{año}$ , los costes disminuyen respecto al caso base, y con co-digestión de glicerina, cuya producción de biogás es de  $1.666.667\text{m}^3/\text{año}$ , los costes disminuyen respecto a la co-digestión de paja de trigo. Dicha disminución de los costes exergéticos unitarios es debida, fundamentalmente, a los siguientes aspectos termoeconómicos:

- La mayor producción de biogás y, por lo tanto, de producto final útil (energía sobrante, B19), permite que los costes debidos a los residuos generados, los cuales incluso en el caso de la materia orgánica del digerido aumentan con la co-digestión (tabla 6), sean más repartidos, traduciéndose este hecho en una disminución de los costes exergéticos de cada uno de los procesos.
- Al llevarse a cabo la co-digestión, se introduce a la digestión una serie de sustratos, (B20), los cuales al ser producto del exterior tienen coste exergético unitario igual a uno. Por lo tanto, cuanto mayor sea este flujo

(tabla 6), y teniendo en cuenta que la eficacia de los equipos es similar en el caso sin co-digestión y con co-digestión de paja y glicerina, menores son los costes exergéticos de los productos de la digestión.

Por otro lado, se puede observar que en el caso de la co-digestión con mezcla de residuos, pese a que la producción de biogás es de  $7.428.400\text{m}^3/\text{año}$ , esta tendencia decreciente de los costes exergéticos en todos los procesos no se mantiene. En concreto, en el proceso de la digestión estos costes aumentan con respecto al caso de la glicerina, lo cual es debido a la baja eficiencia exergética de dicho proceso (tabla 9) y, por lo tanto, este aumento de los costes en el digestor induce que también aumenten los costes en la cogeneración, ya que este proceso va seguido de la digestión. Sin embargo, llama la atención que los costes en el proceso 6 (pulmón/centrifuga), proceso que también está seguido de la digestión, bajan con respecto a la glicerina. Si observamos la estructura productiva definida para la planta de tratamiento de purines objeto de estudio (figura 2), se puede observar la influencia directa que tiene el flujo 20 en este proceso, por lo tanto, al tener el flujo 20 coste exergético uno, como se comentó en el párrafo anterior, y contener una gran cantidad de exergía ( $16.320\text{kW}$ , tabla 6), este hecho se traduce en que el coste exergético unitario del proceso 6 se aproxime más a uno, produciéndose, por lo tanto, una disminución con respecto a los otros casos en los que el contenido exergético del flujo 20 es menor. Del mismo modo, esta disminución de los costes en el pulmón/centrifuga induce que también disminuyan los costes en componente disipativo del digerido.

En el resto de los procesos de la co-digestión con mezcla de residuos (desbaste, decantación primaria, tratamiento biológico, decantación secundaria y en el disipativo de la balsa), los costes se mantienen prácticamente igual que en el caso de la glicerina, ya que al tener estos componentes, en mayor o menor medida, relación tanto con la digestión como con el pulmón/centrifuga, en los que aumentan y disminuyen los costes respectivamente, tal y como se ha explicado, una influencia compensa a la otra, traduciéndose en un equilibrio de los costes en estos equipos.

Finalmente, en la tabla 11 que se muestra a continuación se resumen las variaciones de los costes exergéticos unitarios de los productos de los casos analizados con co-digestión con respecto al caso base, es decir, sin co-digestión.

	Prod. Biogás	Costes exergéticos unitarios								
		Desb.	Dec. 1ª	Trat. Biol.	Dec. 2ª	Dig.	Pulmón/ Centrif.	Cogen.	D. Digerido	D. Balsa
Co-dig. Paja de trigo	+10%	-7%	-7%	-14%	-14%	-15%	-27%	-15%	-27%	-15%
Co-dig. Glicerina	+150%	-32%	-32%	-67%	-67%	-79%	-77%	-79%	-77%	-67%
Co-dig. Residuos	+1000%	-32%	-32%	-67%	-67%	-76%	-88%	-76%	-88%	-67%

Tabla 11. Variaciones de los costes exergéticos unitarios de los productos de los casos analizados con co-digestión con respecto al caso base.

#### 4.3.3.- Descomposición de los costes exergéticos unitarios.

Según Usón y col [38], el análisis de la descomposición de los costes puede llevarse a cabo mediante los siguientes métodos:

- Descomposición de costes en base a la irreversibilidad y al efecto de los residuos [39].
- Descomposición de costes en base al origen de los recursos.

La descomposición de los costes de la planta de tratamiento analizada será estudiada en base tanto la irreversibilidad de los diferentes procesos como el efecto de los residuos, siguiendo las siguientes ecuaciones [39]:

$$\langle P^* \rangle = (U_D - \langle FP \rangle)^{-1} \cdot \langle I \rangle + (U_D - \langle FP \rangle)^{-1} \cdot \langle R^* \rangle \quad (\text{Ec.23})$$

Donde:

- $U_D$ , representa la matriz de identidad ( $n \times n$ ).
- $\langle FP \rangle$ , representa la matriz de coeficientes de distribución ( $n \times n$ ).
- $\langle I \rangle$ , representa la matriz diagonal de la irreversibilidad de los procesos ( $n \times n$ ).
- $\langle R^* \rangle$ , representa la matriz de los costes exergéticos de los residuos ( $n \times n$ ).

$$k_p^* = \frac{P^*}{P} \quad (\text{Ec.23})$$

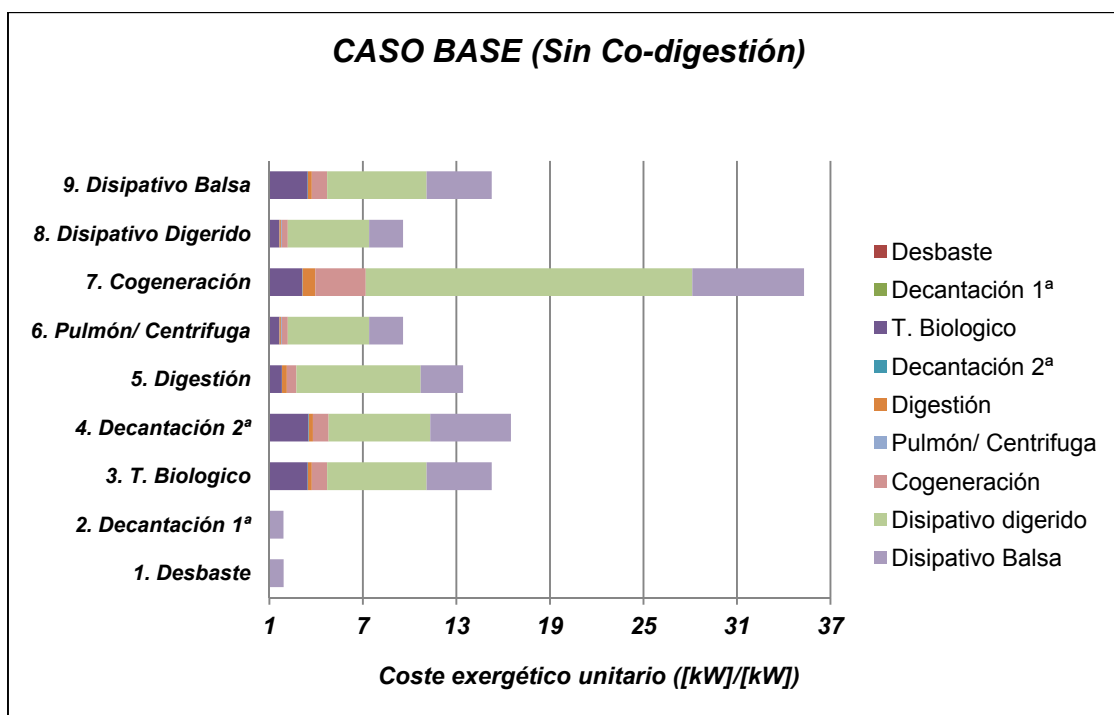
Donde:

- $P^*$ , representa los costes exergéticos de los productos.
- $P$ , representa los productos de los procesos, kW.
- $k_p$ , representa el coste exergético unitario de los productos.

En las gráficas 1, 2, 3 y 4 se muestran a continuación, se pueden observar los resultados de la descomposición de los costes exergéticos unitarios de los productos

obtenidos en cada uno de los procesos de la planta mediante las ecuaciones 23 y 24 (en el Anexo IV se pueden observar las operaciones anteriores detalladas).

▪ **Análisis de los costes exergéticos unitarios para el caso sin co-digestión.**

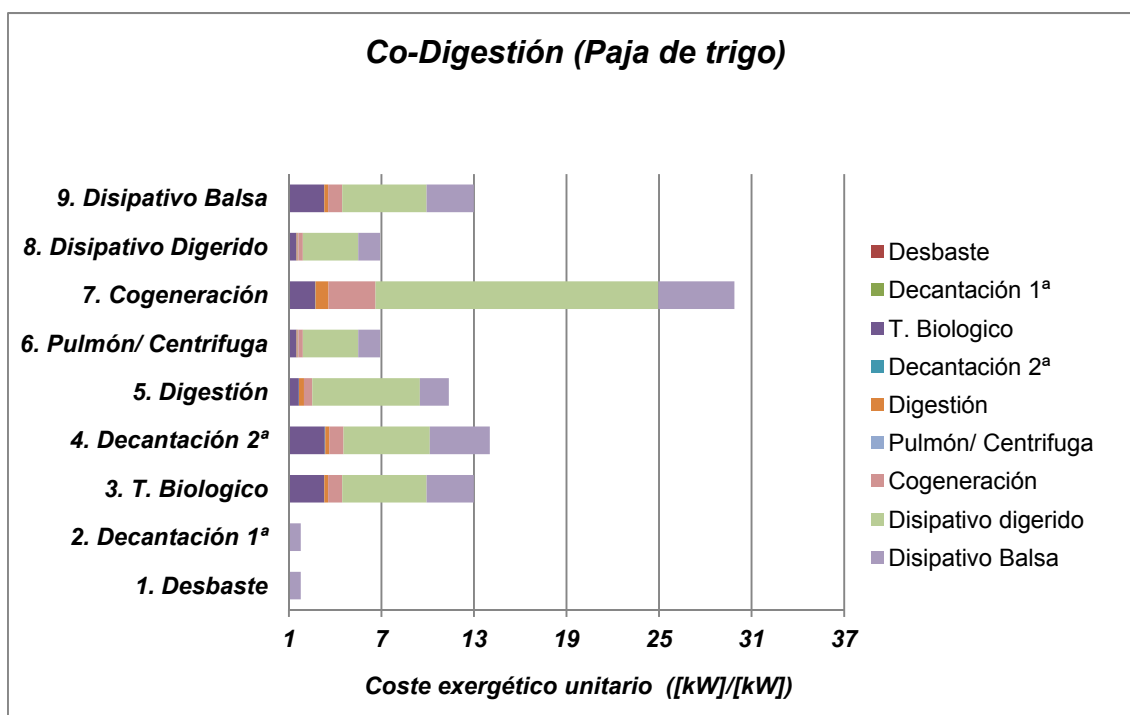


Grafica 1. Descomposición de los costes exergéticos unitarios de los productos de cada uno de los procesos de la planta de tratamiento de purín analizada para el caso sin co-digestión.

Según la gráfica 1, se puede observar que los mayores costes exergéticos unitarios son inducidos por el residuo tanto del clarificado como del digerido sólido, es decir, por la exergía contenida en la materia orgánica no aprovechable. Otro proceso que contribuye al incremento de estos costes pero en menor medida, es el tratamiento biológico, ya que como se ha explicado anteriormente, dicho proceso presenta una elevada irreversibilidad debido a esta concebido para eliminar tanto materia orgánica como nitrógeno, evitándose con ello un problema medioambiental por un exceso de nutrientes. Finalmente, también se observa una mínima contribución en los costes por parte de la cogeneración y de la digestión, al no ser perfectos estos equipos.

Por otro lado, se puede comprobar que el proceso con mayor coste inducido por los residuos es la cogeneración.

- **Análisis de los costes exergéticos unitarios para el caso de co-digestión con paja de trigo.**

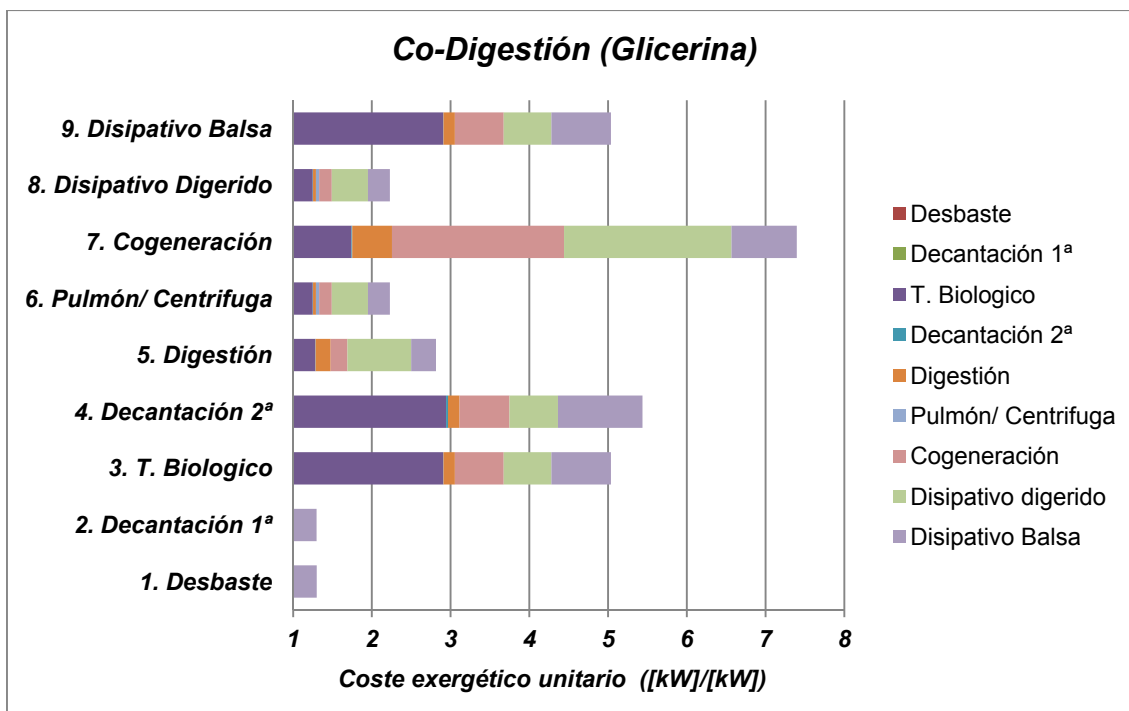


Gráfica 2. Descomposición de los costes exergéticos unitarios de los productos de cada uno de los procesos de la planta de tratamiento de purín analizada para el caso de co-digestión con paja de trigo.

Según los resultados mostrados en la gráfica 2, se puede observar que la contribución de los equipos a la formación de los costes en este caso es muy similar al caso sin co-digestión, es decir, en el caso de co-digestión con paja de trigo los mayores costes son inducidos por los residuos, seguidos, pero en una muy inferior proporción, por el tratamiento biológico, la cogeneración y la digestión. Además, también puede observarse que en este caso, pese a ser mayores las irreversibilidades de los procesos (tabla 3), todos los costes de los productos se han reducido respecto al caso sin co-digestión, ya que, por un lado, la producción de producto final útil es mayor y, por otro lado, se ha introducido un producto del exterior con coste exergético uno como es la paja de trigo.

Por otro lado, al igual que ocurría en el caso base, el proceso con mayor coste inducido por los residuos es la cogeneración y en concreto por el residuo procedente del digerido.

- **Análisis de los costes exergéticos unitarios para el caso de co-digestión con glicerina.**



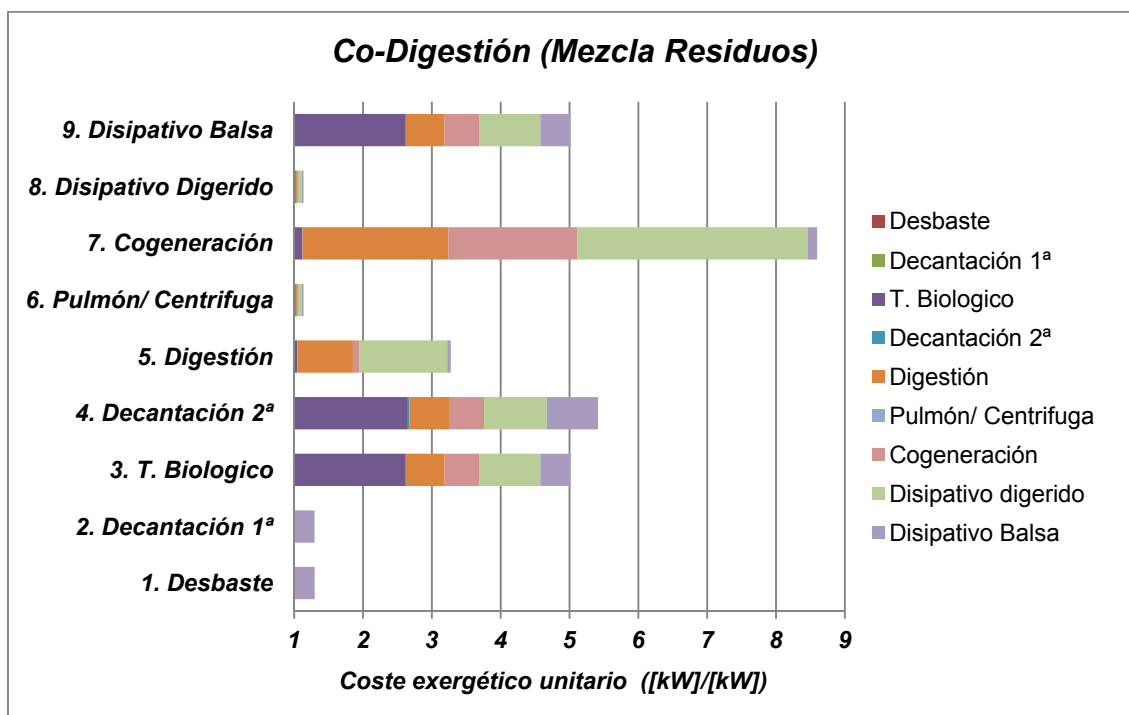
Grafica 3. Descomposición de los costes exergéticos unitarios de los productos de cada uno de los procesos de la planta de tratamiento de purín analizada para el caso de co-digestión con glicerina.

A la vista de los resultados presentes en la gráfica 3, se puede observar que los costes debidos al producto no aprovechable del digerido han disminuido considerablemente en comparación con el caso sin co-digestión y con co-digestión de paja, ya que en este caso la exergía de dicho residuo, como se puede observar en la tabla 6, disminuye respecto al caso de co-digestión con paja de trigo, al ser más optima la digestión con este sustrato. Por otro lado, los costes debidos al producto no aprovechable del clarificado también han disminuido pero en menor proporción. Finalmente, también puede observarse que en este caso, pese a ser mayores las irreversibilidades de los procesos (tabla 3), todos los costes de los productos se han reducido respecto al caso sin co-digestión y con co-digestión de paja, ya que, por un lado, la producción de producto final útil es mayor y, por otro lado, se ha introducido un producto del exterior con coste exergético uno como es la glicerina, cuyo contenido exergético es mayor en la paja de trigo.



- **Análisis de los costes exergéticos unitarios para el caso de co-digestión con mezcla de residuos industriales, de matadero y vegetales.**

Finalmente, a continuación se muestran los resultados obtenidos para el caso de co-digestión con mezcla de diversos residuos, en los que se podrá observar una discrepancia en la tendencia de los costes respecto a los casos anteriores.



Grafica 4. Descomposición de los costes exergéticos unitarios de los productos de cada uno de los procesos de la planta de tratamiento de purín analizada para el caso de co-digestión con mezcla de residuos industriales, de matadero y vegetales.

En la gráfica 4 anteriormente mostrada, se puede observar la influencia que tiene la digestión en prácticamente todos los procesos de la planta, ya que la menor eficacia de la misma en este caso respecto a los otros casos estudiados, induce unos mayores costes exergéticos en los procesos. Pese a que la digestión induce unos mayores costes exergéticos en los procesos, se puede observar que salvo en la propia digestión y en la cogeneración, los costes totales se mantienen constantes en el resto de los procesos, e incluso disminuyen en el pulmón/centrifuga y en componente disipativo del digerido debido, como se ha explicado anteriormente, a la introducción de un flujo con alto contenido exergético y con coste exergético unitario, como es el flujo de los sustratos, producto del exterior.

Por lo tanto, a la vista de los resultados obtenidos para este caso, co-digestión con mezcla de residuos, se puede concluir que si bien los cálculos exergéticos no son muy

precisos, al no conocerse la caracterización exacta de los sustratos añadidos, desde el punto de vista termoeconómico su análisis resulta muy interesante, puesto que se puede apreciar por un lado, la repercusión de la baja eficacia de la digestión y, por otro lado, la influencia en los procesos al introducir un flujo con alto contenido exergético procedente del exterior para una estructura productiva como la definida para la planta objeto de estudio (figura 2).

Por otro lado, y finalmente, a continuación se analizará también la descomposición de los costes de la planta de tratamiento estudiada en base al origen de los recursos, según la metodología expuesta en el Anexo IV [39]. Este nuevo enfoque de análisis de los costes, desarrollado por Usón. S y col, resulta muy interesante en Ecología Industrial debido a los distintos tipos de fueles que entran a la planta. En el caso objeto de este trabajo entra, por un lado, purín virgen y, por otro lado, sustratos que son añadidos a la digestión anaerobia para llevar a cabo la co-digestión.

En la tabla 12 que se muestra a continuación, se puede observar la descomposición de los costes exergéticos de la planta según el origen de los recursos, es decir, el coste exergético debido al purín y el coste exergético debido a los sustratos añadidos en los casos de co-digestión para cada uno de los procesos.

PROCESO	SIN CO-DIGESTIÓN		CO-DIGESTIÓN con paja de trigo		CO-DIGESTIÓN con glicerina		CO-DIGESTIÓN con residuos	
	PURÍN	CO-SUSTRATOS	PURÍN	CO-SUSTRATOS	PURÍN	CO-SUSTRATOS	PURÍN	CO-SUSTRATOS
<b>1.Desbaste</b>	1,91	0	1,70	0,07	1,22	0,07	1,12	0,17
<b>2.Decantación Primaria</b>	1,90	0	1,69	0,07	1,22	0,07	1,12	0,17
<b>3.Tratamiento Biológico</b>	15,26	0	11,75	1,23	3,73	1,29	2,11	2,90
<b>4. Decantación Sec.</b>	16,49	0	12,69	1,33	4,03	1,40	2,28	3,13
<b>5.Digestión</b>	13,43	0	10,11	1,25	1,67	1,13	0,29	2,98
<b>6.Pulmón/Centrífuga</b>	9,58	0	6,15	0,76	1,32	0,90	0,10	1,03
<b>7.Cogeneración</b>	35,30	0	26,57	3,30	4,40	2,99	0,76	7,83
<b>8.Disipativo Digerido</b>	9,58	0	6,15	0,76	1,32	0,90	0,10	1,03
<b>9.Disipativo Balsa</b>	15,26	0	11,75	1,23	3,73	1,29	2,11	2,90

Tabla 12. Análisis de la descomposición de los costes exergéticos unitarios de los productos en base al origen de los recursos para cada uno de los casos analizados.

A la vista de los resultados podemos observar que, por un lado, en el caso con co-digestión, al no haberse añadido ningún tipo de co-sustrato, todos los costes provienen del purín. Por otro lado, en el caso de co-digestión con paja de trigo, se puede observar que la influencia en el coste exergético unitario de los co-sustratos no es muy relevante respecto a la influencia en el mismo que genera el purín, empezando a ser algo significativo dicho coste de los co-sustratos en el caso del co-digestión con glicerina. Finalmente, en el caso de co-digestión con mezcla de residuos, la influencia

en el coste exergético unitario de los co-sustratos es incluso superior a la del purín en todos los procesos menos en el desbaste y decantación primaria, siendo claramente superior en el caso de la cogeneración.

## 5. ANÁLISIS EXERGETICO DE SITUACIONES ALTERNATIVAS.

A la vista de los resultados obtenidos tras el análisis exergético realizado en el presente trabajo, se ha podido comprobar que, desde un punto de vista termodinámico, las plantas de tratamiento de purines pueden ser consideradas con anti-exergéticas, ya que, por una lado, se genera un residuo con alto contenido exergético y, por otro lado, se produce una disminución de exergía entre el estado inicial de entrada y final de salida. No obstante, pese a que dichas plantas generan una pérdida de exergía, de no existir, los purines tendrían que ser transportados a grandes distancias desde las explotaciones ganaderas para no generar problemas medioambientales, lo que conllevaría, indudablemente, un alto coste exergético debido a dicho transporte.

En el presente capítulo se va a realizar un análisis exergético desde el punto de vista del coste exergético del transporte del purín en diferentes situaciones:

- SITUACIÓN 1. Suponiendo la no existencia de una planta de tratamiento de purines en la zona de Capella (Huesca). Esta situación conllevaría transportar el purín desde las explotaciones ganaderas porcinas de la zona, hasta áreas alejadas para no sobrepasar el límite permitido de nutrientes en las tierras arables. Por otro lado, también se analizará el abono mineral que puede ser sustituido por el purín en esta situación, ya que la producción de abono mineral acarrea un coste exergético.
- SITUACIÓN 2. Suponiendo la existencia de una planta de tratamiento de purines en la zona de Capella (Huesca). Esta situación conllevaría transportar el purín desde las explotaciones ganaderas porcinas de la zona, hasta la planta de tratamiento y, posteriormente, transportar el abono orgánico generado hasta las tierras arables, analizándose también, la cantidad de abono mineral que puede ser sustituido.
- SITUACIÓN 3. Suponiendo la existencia de la planta de tratamiento de purines pero sin la existencia del tratamiento biológico, ya que es dicho proceso es el que más irreversibilidad presenta, al destruir materia orgánica y eliminar parte de los nutrientes del purín, para de esta manera no tener que transportar el purín a zonas alejadas para no contaminar las tierras arables próximas. Esta situación no será analizada, ya que al disponer la planta objeto de estudio de diversas recirculaciones (flujo 7 y el 11) su cálculo necesitaría un nuevo diseño de la planta, lo cual queda fuera del alcance del presente trabajo.

### 5.1.- Análisis exergético del transporte.

En el Anexo V se ha analizado detalladamente los litros de combustible líquido (gasoil) que serían necesarios en caso de no existir la planta de tratamiento y, por lo tanto, tener que transportar los purines mediante vehículos agrícolas a zonas alejadas de las explotaciones ganaderas con el objeto de no superar la presión ganadera para el tipo de producción agrícola de la zona. En el mencionado anexo también se han analizado los litros de combustibles necesarios para transportar el purín hasta la planta de tratamiento y, posteriormente, transportar el digerido sólido hasta las tierras agrícolas (no se ha considerado el transporte del agua que va a balsa destinada a fertirrigación ya que, al contener un bajo porcentaje de nutrientes, ésta es empleada en las fincas adyacentes a la planta, tanto para tierras arables como hortofrutícolas).

El cálculo de la exergía química del gasoil se ha realizado mediante la expresión propuesta por Kotas [28] para la obtención del coeficiente  $\phi$ , que relaciona el poder calorífico inferior del combustible mencionado y su exergía, tal y como ocurría en el caso de las grasas y de la paja de trigo:

$$\phi = 1,04010 + 0,1728 \cdot \frac{h}{c} + 0,0432 \cdot \frac{o}{c} + 0,2169 \cdot \frac{s}{c} \cdot (1 - 2,0628 \cdot \frac{h}{c}) \quad (Ec.25)$$

Donde h, c, s y o representan las fracciones másicas en base seca de cada uno de estos elementos en el combustible.

$$\phi = \frac{b_{ch,gasoil}^0}{PCI} \quad (Ec.26)$$

Por lo tanto, aplicando la ecuación 26, y teniendo en cuenta los litros de gasoil necesarios en cada una de las situaciones analizadas (Anexo V), obtenemos los siguientes resultados exergéticos:

	Combustible, l/año	Exergía, kW
<b>SITUACIÓN 1: Transporte granja/TA</b>	100.800	<b>123,8</b>
<b>SITUACIÓN 2: Transporte granja/ planta</b>	7.200	<b>8,8</b>
<b>Transporte planta/TA</b>	890	<b>1</b>

Tabla 13. Análisis exergético del transporte en cada una de las situaciones analizadas, es decir, sin y con planta de tratamiento de purines en la zona de Capella (Huesca).

## **5.2.- Análisis de resultados.**

En el presenta capitulo se ha llevado cabo un análisis comparativo desde el punto de vista del coste exergético del transporte del purín de dos situaciones diferentes: sin la existencia de la planta de tratamiento y suponiendo su existencia en el municipio de Capella (Huesca).

A la vista de los resultado, el coste exergético invertido en transportar el purín virgen desde una explotación ganadera hasta las tierras arables (situación 1), en una zona con alta concentración de explotaciones porcinas como es la zona de Capella, es muy superior al coste exergético necesario para el transporte del purín hasta la planta de tratamiento más el transporte del abono orgánico hasta tierras arables (situación 2), puesto que dicho purín virgen tiene que ser desplazado lejos de las explotaciones ganaderas para no sobresaturar y, por lo tanto, contaminar el suelo de las explotaciones agrícolas próximas a las granja (Tabla 13).

Por otro lado, cabe señalar que el purín virgen al no estar sometido a ningún tratamiento, posee una gran cantidad de nutrientes y, por lo tanto, podría sustituir a una mayor cantidad de abono mineral que el digerido sólido tras la digestión, suponiendo, por lo tanto, un ahorro exergético al no tener que producirse abono mineral. No obstante, en zonas de alta concentración ganadera, como es la zona de Capella (Figura 12), las tierras arables difícilmente pueden absorben tanta cantidad de nutrientes aunque el purín sea almacenado adecuadamente en fosas de desafectación para un uso progresivo del mismo (actualmente existe en dicho municipio fosas de almacenamiento pero debido a la sobresaturación de purín, se ha visto la necesidad de crear la planta de tratamiento de purines proyectada y estudiada en el presente trabajo).

## **6. CONCLUSIONES.**

### **6.1.- Síntesis.**

El presente trabajo ha abarcado el análisis tanto el proceso global como las distintas etapas que se llevan a cabo dentro de la planta de tratamiento proyectada para la localizada de Capella (Huesca), con especial interés en la etapa de valorización del purín concentrado, ya que el objetivo de cualquier planta de tratamiento de purines, desde el punto de vista productivo (el objetivo principal de las plantas de tratamiento de purines es acabar con la contaminación generada por las deyecciones ganaderas), es obtener biogás mediante un tratamiento de digestión anaerobia de dichos fangos (posteriormente el biogás es usado en el proceso de cogeneración). Además, en el proceso de tratamiento de purines también se obtiene, por un lado, fertilizante sólido, producto de la digestión anaerobia, que puede ser utilizado en los cultivos agrícolas, y, por otro lado, líquido depurado apto para la fertirrigación de las fincas adyacentes a la planta, producto de un tratamiento biológico al que se ve sometida la parte líquida del purín (ambos productos contienen nutrientes idóneos para abonar los cultivos agrícolas).

Para aumentar la producción de biogás es factible, y muy habitual, añadir distintos sustratos a los residuos ganaderos, tales como residuos orgánicos agroindustriales (co-digestión). La principal ventaja de la co-digestión radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado. En el presente trabajo se ha analizado la co-digestión con tres tipos diferente de sustratos: co-digestión con paja de trigo, co-digestión con glicerina y co-digestión con una mezcla de residuos industriales, de matadero y vegetales, con el objetivo de analizar la influencia de distintos sustratos en el funcionamiento de la planta, así como comparar estas situaciones con respecto a la caso en el que no se lleve a cabo ningún tipo de co-digestión.

El análisis exergético llevado a cabo en el presente trabajo ha permitido determinar que, los distintos procesos de tratamiento de las purines, vistos desde un punto de vista termodinámico, pueden considerarse como anti-exergéticos, ya que se produce una disminución de exergía entre el estado inicial de entrada y final de salida. En el caso de la digestión y de la cogeneración, las irreversibilidades tienen lugar porque dichos equipos no son perfectos, y conforme aumenta la producción de biogás, aumenta su irreversibilidad. Sin embargo, el tratamiento biológico está proyectado para que sea irreversible, es decir, para conseguir una disminución de nitrógeno y de materia orgánica (DQO), estando dimensionado para reducir el nitrógeno sobrante,

para, de esta manera, no sobresaturar el terreno arable de la zona con dicho nutriente. Además, dicho análisis también permite conocer que el tratamiento de purines analizado en el presente trabajo da lugar a un residuo con un alto contenido exergético, como es la materia orgánica todavía presente tras la decantación secundaria y centrifuga, es decir, en el líquido depurado apto para fertirrigación y en el digerido sólido, utilizado también para la fertilización de las tierras agrícolas.

Por otro lado, tras el análisis termoeconómico, en el que ha tenido que definirse una compleja estructura productiva así como realizarse un exhaustivo estudio sobre el reparto de los costes de los residuos en los distintos procesos, dada la peculiaridad de la planta de tratamiento –gran número de flujos, proceso anti-exergético y residuo con alto contenido exergético–, se puede comprobar que los mayores costes exergéticos unitarios de los productos para cada uno de los procesos de la planta tienen lugar en el caso en el que no lleve a cabo co-digestión alguna, disminuyéndose dichos costes conforme se mejora la producción de energía con la adición de sustratos. Dicha disminución es debida, fundamentalmente, a que, por un lado, la mayor producción de biogás permite que los costes debidos a los residuos generados sean más repartidos y, por otro lado, a que al llevarse a cabo la co-digestión, se introducen en la digestión una serie de sustratos, los cuales al ser producto del exterior tienen coste exergético unitario igual a uno, por lo que, cuanto mayor sea el contenido exergético de estos sustratos, teniendo en cuenta que la eficacia de los equipos es similar en todos los casos, menores serán los costes exergéticos de los productos.

Finalmente, analizado el coste exergético invertido en transportar directamente el purín virgen desde una explotación ganadera hasta las tierras arables (suponiendo que no exista planta de tratamiento), en una zona con alta concentración de explotaciones porcinas como es la zona de Capella, se puede comprobar que dicho coste es muy superior al coste exergético necesario para el transporte del purín desde la explotación ganadera hasta la planta de tratamiento más el transporte del abono orgánico desde la planta de tratamiento hasta tierras arables (en el caso de que exista planta de tratamiento), puesto que dicho purín virgen tiene que ser desplazado muy lejos de las explotaciones ganaderas para no sobresaturar y, por lo tanto, contaminar el suelo de las explotaciones agrícolas próximas a las granja.



## **6.2.- Aportaciones.**

Se ha realizado un gran esfuerzo para tratar de caracterizar cada uno de los parámetros de los distintos flujos que influyen en el análisis exergético, fundamentalmente los parámetros relativos a los flujos de purín, dada la poca información disponible, contactándose directamente con Sodemasa, empresa proyectista de la planta objeto de estudio, y realizándose una amplia revisión bibliográfica sobre la composición de dichos flujos tras someterse a los distintos procesos presentes en la planta objeto de estudio. Dicho esfuerzo ha permitido crear una metodología para el cálculo de la exergía para las plantas de tratamiento de purines.

Por otro lado, se ha llevado a cabo una revisión en profundidad de la co-digestión, digestión anaerobia de purín de con distintos sustratos, analizándose tanto las peculiaridades de cada tipo de sustrato así como sus potenciales beneficios respecto al aumento de la producción de biogás, mostrándose diferentes ejemplos de plantas de tratamiento de purines que llevan a cabo co-digestión en su proceso productivo.

Además, teniendo en cuenta la peculiaridad de las plantas de tratamiento de purines (gran número de flujos, proceso anti-exergético y residuo con alto contenido exergético), se ha definido una estructura productiva que permite ser adaptada para el análisis termoeconómico de otras plantas con características similares a la objeto de estudio de este trabajo.

Del mismo modo, se ha planteado un nuevo criterio de reparto de residuos proporcional a la no solo a la exergía que se destruye, sino también a la exergía que pasa a la línea de fangos, para de esta manera poder estudiar la influencia de los equipos en los distintos procesos de la planta.

Para analizar los costes de los productos de los diferentes procesos con los que cuenta la planta de tratamiento estudiada, se ha mostrado un análisis detallado de la descomposición de los mismos bajo dos criterios: teniendo en cuenta las irreversibilidades y el efecto de los residuos, y teniendo en cuenta el origen de recursos.

## **6.3.- Perspectivas.**

En cuanto a las consideraciones con respecto a los cálculos, y su posible error sistemático, conveniente destacar que para realizar el análisis exergético de los distintos flujos de la planta de tratamiento estudiada, ha sido necesario, en algunos

casos, emplear valores, ratios y rendimientos de procesos encontrados en bibliografía, resultando crucial conocer la composición exacta de los flujos, ya que éstos incorporan un contenido exergético muy alto y por tanto afecta a la exactitud de los resultados finales. Por lo tanto, una vez que la planta de tratamiento estudiada este construida y puedan conocerse los valores exactos, podrían obtenerse valores más precisos teniendo en cuenta la metodología desarrollada en el presente trabajo, así como aplicar dicha metodología a otras plantas de tratamiento.

Pueden destacarse como futuras línea de investigación las siguientes propuestas: monitorización de una planta de tratamiento de purines para el análisis de distintas malfunciones o distintos tipos de co-sustratos, análisis y comparación de distintas plantas con las mismas o distintas tecnologías...

Por otro lado, teniendo en cuenta que tanto purín virgen como el purín tratado tras una digestión anaerobia posee una cantidad de nutrientes importante y, por lo tanto, puede ser utilizado como abono orgánico, se podría llevar a cabo un análisis exergético teniendo en cuenta el abono mineral que puede ser sustituido y la exergía necesaria para producir dicho abono mineral.

## 7. NOMENCLATURA.

A continuación se va a indicar la nomenclatura más relevante utilizada en el presente trabajo.

a	Actividad de la especie
b	Exergía específica, kJ/kg <i>(salvo que se indique unidad diferente)</i>
$b_{ch}$	Exergía química, kJ/kg <i>(salvo que se indique unidad diferente)</i>
$b_{ch}^0$	Exergía química de formación, kJ/kg <i>(salvo que se indique unidad diferente)</i>
$b_{ch,c}$	Exergía química de concentración, kJ/kg <i>(salvo que se indique unidad diferente)</i>
$b_{física}$	Exergía física, kJ/kg <i>(salvo que se indique unidad diferente)</i>
B	Exergía, kW
c	Salinidad, ppm
E	Valor energético de las corrientes de calor, kW
F	Fuel, kW
<b>F</b>	Vector de fuel (nx1), kW
$F^*$	Coste exergético del fuel, kW
<b><math>F^*</math></b>	Vector del coste exergético del fuel (nx1), kW
$F_e$	Vector de los recursos externos de los componentes (nx1), kW
$\langle FP \rangle$	Matriz de distribución de coeficientes (nxn)
$\Delta G$	Energía libre de Gibbs, kJ/kg
h	Entalpía, kJ/kg
I	Vector que contiene la irreversibilidad de los componentes (nx1), kW
$k^*$	Coste exergético unitario
m	Molalidad de una sustancia, moles/kg agua
n	Número de componentes del sistema
$n_f$	Número de recursos externos
P	Producto, kW
$P^*$	Coste exergético del producto, kW
<b><math>P^*</math></b>	Vector del coste exergético del producto (nx1), kW
PCI	Poder calorífico inferior, KJ/kg
PM	Peso molecular, g/mol
$P_0$	Presión del ambiente de referencia, 1,01325 bar
<b><math>R^*</math></b>	Vector del coste exergético de los residuos (nx1), kW
R	Constante gases ideales, 8,314kJ/molK
$\langle RP \rangle$	Matriz de los coeficientes de distribución de los residuos (nxn)
s	Entropía, kJ/kgK

$T$	Temperatura, K
$T_o$	Temperatura del ambiente de referencia, 298,15K
$U_D$	Matriz identidad (nxn)
$x$	Concentración molar
$y$	Coeficientes de distribución

### **Símbolos griegos**

$\varphi$	Coeficiente que relaciona la exergía con el PCI
$\eta$	Rendimiento
$\rho$	Densidad, kg/m <sup>3</sup>
$\Psi$	Coeficientes de distribución de los costes de los residuos

### **Subíndices y superíndices**

$i$	Componente genérico
$j$	Componente genérico
$k$	Tipo de recurso externo
$NKT$	Nitrógeno Kjeldahl
$MO$	Materia orgánica
$MI$	Materia inorgánica
$P$	Fósforo
$r$	Residuo
$s$	Producto final

## 8. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Valero Capila, A. and Valero Delgado, A. *Exergy analysis of resources and processes*. Universidad de Zaragoza. 2010.
- [2] Valero, A. and Torres, C. "Thermoeconomic Analysis". Ed. Frangopoulos C.A., *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK. 2005.
- [3] Frosch R.A. and Gallopoulos N.E. *Strategies for Manufacturing: Waste from one industrial process can serve as the raw materials for another, thereby reducing the impact of industry on the environment*. Scientific American, 261(3), pp.144-152. 1989.
- [4] Flotats Ripoll, X., Campos Pozuelo, E., Illa Alibés, J., Magrí Aloy, A., Palatsi Civit, J. y Solé Mauri, F. *Guía de de los tratamientos las deyecciones ganaderas*. Generalitat de Catalunya. 2004.
- [5] Proyecto básico. *Planta de tratamiento de purín en Capella (Huesca)*. Empresa redactora: Sodemasa (S.A.U.). 2009.
- [6] Flotats, X., Sarquella, L. *Producció de biogas per codigestió anaerobia*. Institut català d'Energia. Generalitat de Catalunya. 2008.
- [7] Angelidaki, I. and Ellegaard, L. *Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants*. Applied Biochemistry and Biotechnology 109 (1-3), 95-105. 2003.
- [8] Moller, H.B., Sommer, S.G., Ahring, B.K. *Methane productivity of manure, Straw and solid and manure*. Biomass and Bioenergy. 2003.
- [9] Marañón Maison, E., Fernandez Nava, Y., Castrillón Peláez, L. *Manual de Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales*. Universidad de Oviedo. Proyecto PROBIOGAS. 2009.
- [10] Astals, S., Nolla-Ardevol, V., Mata-Alvarez. J. *Anaerobic co-digestion of pig manure and crude glycerol at mesophilic conditions: Biogas and digestate*. Bioresource Technology 110, 63-70.
- [11] Daudén, A. *Valorización energética de residuos orgánicos: co-digestión de purines*. Cambio climático, agricultura y eficiencia energética en el medio rural. 2012.
- [12] Murto, M., Björnsson, L. and Mattiasson, B. *Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure*. Journal of Environmental Management 70, 101-107. 2004.
- [13] Gaggioli, R. and Petit, P. *Second Law analysis for pinpointing the true inefficiencies in final conversion systems*. A.C.S. Division of Fuel Chemistry, 21. 1976.
- [14] Sussman, M. *Choosing a reference environment-state for available-energy computations*. In 72nd Annual Meeting. American Institute of Chemical Engineers, San Francisco (USA). 1979.
- [15] Ahrendts, J. *The exergy of chemically reacting systems*. Technical report, DI. Forschungsheft 579, Düsseldorf. 1977.

- [16] Van Gool W. *The thermodynamics of chemical references for exergy analysis*. Florence world energy research symposium, Florence, Italy: SGE Editorial, pp 949-957.
- [17] Szargut, J. *Chemical exergies of the elements*. *Applied Energy*, Vol. 32, pp 269-286. 1989.
- [18] Szargut, J.; Valero, A.; Stanek, W. y Valero, A. *Towards an international legal reference environment* In: *Proceedings of ECOS 2005, Trondheim, Norway (June 20-22)*, pp. 409- 420. 2005.
- [19] Valero, A; Uche, J; Valero, A; Martínez, A. *Physical Hydronomics: Application of the exergy analysis to the assessment of environmental costs of water bodies. The case of the inland basins of Catalonia*. *Energy*. Vol. 34 pp.2101-2107. 2008.
- [20] Martinez, A. *Exergy cost assessment of water resources: Physical Hydronomics*. Ph.D. Thesis. Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza. 2009.
- [21] Zaleta-Aguilar, A., Ranz, L. and Valero, A. *Towards a Unified measure of renewable resources availability: The exergy method applied to the water of a river*. *Energy Conversion Management*. Vol. 39 nº 16-18, pp. 1911-1917. Pergamon. 1998.
- [22] Lozano Garcia, A.I. *Análisis exergético en plantas de tratamiento en el ciclo integral del agua*. Proyecto Fin de Máster. CIRCE. Universidad de Zaragoza. 2011.
- [23] Szargut, J. *Exergy Method, Technical and Ecological Application*. WIT Press. 2005.
- [24] Rivero, R; Garfias, M. *Standard chemical exergy of elements updates*. *Energy*. Vol 31, pp. 3310-3326. 2006.
- [25] Tai, S.; Matsushige, K.; Goda, T. *Chemical exergy of organic matter in wastewater*. *International Journal Environmental Studies*. Vol 27, pp. 301-315. 1986.
- [26] Lozano, M.A, Valero, A. *Determinación de la exergía para sustancias de interés industrial*. ETSII Universidad de Zaragoza. Departamento de Termodinámica y Fisicoquímica.
- [27] Valero, A. and Usón, S. *Oxy-co-gasification of coal and biomass in an integrated gasification combined cycle (IGCC) power plant*. *Energy* 31 1643–1655. 2006.
- [28] Kotas, T.J. *The exergy method of thermal plant analysis*. Ed Essex. 1985.
- [29] Cynthia Ofori-Boateng, Teong Lee Keat and Lim JitKang. *Feasibility study of microalgal and jatropha biodiesel production plants: Exergy analysis approach*. *Applied thermal engineering* 36 (2012) 141-151. Elsevier. 2011.
- [30] Martínez, A; Uche, J; Rubio, C; Carrasquer, B. *Exergy cost of water supply and water treatment technologies*. *Desalination and water treatment*. Vol 24. Pp 123-131. 2010.
- [31] A. Marcos, A. Al-Kassir, A.A. Mohamad, F. Cuadros and F. López Rodríguez. 2009. *Combustible gas production (methane) and biodegradation of solid and liquid mixtures of meat industry waste*. *Applied Energy* 87. 1729-1735. Elsevier. 2010.

- [32] Tsatsaronis, G. *A Review of Exergoeconomic Methodologies*. *International Symposium on Second Law Analysis of Thermal Systems*. Rome (ASME Book I00236). ASME, pp. 81-87. New York, USA. 1987.
- [33] Tsatsaronis, G. *Recent Development in Energy Economics*. *Proceedings of ECOS'98*. Nancy, France. Vol. I, pp. 37-38. 1998.
- [34] Gaggioli, R. A., El-Sayed, Y. M. *A Critical Review of Second Law Costing Methods*. *Proceedings of the IV International Symposium on Second Law Analysis of Thermal Systems* (ASME Book I00236). ASME, pp. 59-73. New York, USA. 1987.
- [35] Moran, M. J. *Second Law Analysis. What is the State of the Art?* *International Symposium: A future for energy*. Florence (Italy). Pergamon Press, pp. 249-260. 1990.
- [36] Torres, C. y Valero, A. *Curso de Doctorado en Termoeconomía*. Departamento Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza. 2000.
- [37] Valero, A; Lozano, M, Muñoz, M.A. *A general theory of exergy saving I. On the exergy costs*. Departamento de Termoeconomía y Química Física de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad de Zaragoza. 1986.
- [38] Usón, S., Valero, A., Agudelo, A. *Thermoeconomics and Industrial Symbiosis. Effect of By-product Integration in Costo Assessment*.
- [39] Torres, C., Valero A., Rangel, V., Zaleta, A. *On the cost formation process of the residues*. *Energy*; 33: 144-152. 2008.
- [40] <http://www.adap.org.es/> (Asociación de Empresas para el Desimpacto Ambiental de los Purines).
- [41] Flotats, L., Sarquella, L. *Producció de biogàs per codigestió anaeròbia*. Institut català d'Energia. Generalitat de Catalunya. 2008.
- [42] Angelidaki, I. and Ellegaard, L. *Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants*. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 109 (1-3), 95-105. 2003.
- [43] Angelidaki, I., and Ahring, B.K. *Codigestion of olive oil mill wastewaters with manure, household waste or sewage sludge*. *Biodegradation* 8: 221-226. 1997.
- [44] Angelidaki, I., Ellegaard, L., and Ahring, B.K. *Modelling anaerobic codigestion of manure with olive oil mill effluent*. *Water Science and Technology* 36 (6-7), 263-270. 1997.
- [45] Nallathambi Gunaseelan, N. *Biochemical methane potencial of fruits and vegetable solid waste feedstocks*. *Biomass and Bioenergy* 26, 389-399. 2004.
- [46] Molinuevo-Salces, B., González-Fernández, C., Gómez, X., García-González, M.C., Morán, A. *Vegetable procesing wastes addition to improve swine manure anaerobic digestion: Evaluation in terms of methane yield and SEM characterization*. *Applied energy* 91, 36-42. 2011.
- [47] Lane, A.G. *Anaerobic digestión of orange peel*. *Food Technology Australia* 36 83), 125-127. 1984.



- [48] Srilatha, H.R., Fabbri, C. and Madhukara, K. *Fungal pretreatment of orange processing waste by solid-state fermentation for improved production of methane*. *Process Biochemistry* 30 (4), 327-331. 1995.
- [49] Rutledge, B. *Swedish Biogas Industry Education Toru 2004: Observations and Findings*. WestStart-CALSTART, Inc. 2004.
- [50] DeBruyn, J., House, H. and Rodenburg, J. *Ontario Large Herd Operators European Anaerobic Digestion Tour Report. Germany, Denmark and the Netherland*. August 21-29. Ontario Ministry of Agriculture, food and Rural Affairs. 2006.
- [51] Edström, M. *Anaerobic treatment of animal byproducts from slaughterhouses at laboratory and pilot scale*. *Applied Biochemistry Biotechnology* 109, 127-138. 2003.
- [52] Hejnfelt, A., Angelidaki, I. *Anaerobic digestión of slaughterhouse by-products*. *Biomass and Bioenergy* 33, 1041054.2009.
- [53] Marcos, A., Al-Kassir, A., Mohamad, A.A., Cuadros, F., López-Rodriguez, F. *Combustible gas production (methane) and biodegradation of solid and liquid mixtures of meat industry wastes*. *Applied Energy* 87 1729-1735. 2010.
- [54] Francese, A.P., Aboagye-Mathiesen, G., Olesen, T., Cordoba, P.R. and Siñeriz, F. *Feeding approaches for biogas production from animal wastes and industrial effluents*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 16, 147-150. 2000.
- [55] Amon T., Amon B., Kryvoruchko V., Bodizola V., Pötsch E., and Zollitsch W. *Optimising methane yield from anaerobic digestion of manure: Effects of dairy systems and glycerine supplementation*. *International Congress Series* 1293, 217-220. 2006.
- [56] Ruihong Zhang, Hamed M. El-Mashad, Karl hartman, Fengyu Wang, Guangqing Liu, Chris Choate, Paul Gamble. *Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion*. *Bioresource Technology* 98. 929-935. 2007.
- [57] <http://www.seafriends.org.nz/oceano/seawater.htm>
- [58] Domini, C., Vidal, L., Cravotto, G., Canals, A. *A simultaneous, direct microwave/ultrasound-assisted digestion procedure for the determination of total Kjeldahl nitrogen*. *Ultrasonic Sonochemistry* 16, 564-569. 2009.
- [59] González, V., Pomares, F. *La fertilización y el balance de nutrientes es sistemas agroecológicos*. *Sociedad Española de Agricultura Ecológica, SEAE*. 2008.
- [60] Elías Castells, X. *Tratamiento y valorización energética de residuos*. *Fundación Universitaria Iberoamericana*. Ediciones Díaz de Santos. 2005.
- [61] Smith, K.A., Metcalfe, P., Grylls, J., Jeffrey, W., Sinclair, A. *Nutrient value of digestate from farm-based biogas plants in Scotland*. *Report for Scottish Executive Environment and Rural Affairs Department-ADA/009/06*. 2007.  
<http://www.scotland.gov.uk/Resource/Doc/1057/0053041.pdf>
- [62] Chadwick, D. *Digestate as a fertilisier-Environmental concerns*. In: *Anaerobic Digestion Stakeholder Workshop*. Session IV: *Building the Market for Digestate*. Exeter University, UK. 2007.



[63] Siebert, S., Thelen-Jungling, M., Kehres, B. *Development of quality assurance and quality characteristics of composts and digestates in Germany*. 6<sup>th</sup> International conference ORBIT 2008, *Moving Organic Waste Recycling Towards Resource Management and Biobased Economy*. Wageningen, The Netherlands. 2008.

[64] Nuchdang, S., Phalakornkule, C. *Anaerobic digestion of glycerol and co-digestion of glycerol and pig manure*. *Journal of Environmental Management* 101, 164-172. 2012.

[65] Torres C. *Symbolic thermoeconomic analysis of energy systems*. In: Frangopoulos CA, Ed. *Exergy, energy system analysis and optimization, from Encyclopedia of life support systems (EOLSS)*. Oxford: EOLSS Publishers; 2006.

[66] Brizuela, E y Romano S.D. *Combustión*. Departamento de Ingeniería Mecánica y Naval Facultad de Ingeniería, UBA. 2003.

[67] Real Decreto 1088/2010, de 3 de septiembre, por el que se modifica el Real Decreto 61/2006, de 31 de enero, en lo relativo a las especificaciones técnicas de gasolinas, gasóleos, utilización de biocarburantes y contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo.

[68] *Well to Wheels analysis of future automotive fuel and powertrains in the European context*; TANK TO WHEELS Report. 2007.

[69] <http://sigpac.aragon.es/visor/>

[70] <http://www.magrama.gob.es>

[71] ORDEN de 11 de diciembre de 2008, del Consejero de Agricultura y Alimentación, por la que se designan y modifican las zonas vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes agrarias en la Comunidad Autónoma de Aragón. DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA Y ALIMENTACIÓN.

[72] ORDEN de 18 de mayo de 2009, del Consejero de Agricultura y Alimentación, por la que se aprueba el III Programa de Actuación sobre las Zonas Vulnerables a la contaminación producida por nitratos procedentes de fuentes agrarias designadas en la Comunidad Autónoma de Aragón. DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA Y ALIMENTACIÓN.

# ANEXOS

## **ANEXO I. ANÁLISIS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE CAPELLA: DESCRIPCIÓN DETALLADA Y DATOS TÉCNICOS.**

### **1.1.- Descripción de los distintos procesos.**

La línea de tratamiento de la planta seleccionada dispone de los siguientes procesos:

- Recepción, descarga, desbaste y homogeneización del purín.
- Filtración inicial de parte de la fracción sólida
- Decantación/Espesamiento 1º de fangos.
- Tratamiento biológico del líquido clarificado del purín (nitrificación-desnitrificación).
- Digestión anaerobia de los fangos espesados y generación de biogás.
- Cogeneración de electricidad y calor con el biogás producido.
- Almacenamiento de fracción sólida (digestato).
- Almacenamiento del efluente líquido final.

Teniendo en cuenta la información disponible en la memoria de la planta de tratamiento de Capella [5], a continuación se van a ir analizando cada uno de los procesos antes mencionados detalladamente.

#### **1.1.1.- Recepción, descarga y almacenamiento de las materias primas.**

La materia prima de la planta de tratamiento será el purín porcino procedente de las explotaciones de la zona de Capella.

En la primera etapa del tratamiento, el purín se decepcionará, se descargará y se almacenará de manera previa a su introducción al proceso.

El canal de desbaste inicial estará compuesto por una reja de gruesos de 1,5 cm de luz de paso, en la que se separarán los sólidos de mayor tamaño. De igual modo, el purín transportado mediante colectores será depositado en una arqueta de recepción y desbaste inicial.

El líquido se impulsará mediante gravedad hacia la fosa de recepción, depósito de forma rectangular impermeabilizado, con capacidad suficiente para garantizar el almacenamiento del purín durante un periodo de 3,3 días. Este depósito estará equipado con dos agitadores para homogeneizar el purín procedente de las distintas granjas de la zona.

### 1.1.2.- Filtración inicial de parte de la fracción sólida.

El purín almacenado en la fosa de recepción será conducido a través de un tamiz con malla de 0,65 mm de luz de paso donde se producirá la separación de parte de los sólidos, que pasarán a ser introducidos al tanque de fangos que se dimensionará para un tiempo de retención de 12 horas, mientras que la fracción líquida será conducida, por gravedad, al decantador primario.

### 1.1.3.- Decantación/Espesamiento 1º de fangos.

El purín, previamente tamizado, se separará de su parte sólida mediante un sistema de decantación (decantación primaria) que podrá ser potenciado con la adición de floculantes y coagulantes. De esta manera se tratará de evitar la entrada de materia en suspensión al proceso biológico, así como aportar materia orgánica al proceso de digestión anaerobia.

Los sólidos serán bombeados e introducidos de nuevo en el tanque de fangos donde se mezclarán con los lodos biológicos procedentes del decantador 2º y con los sólidos procedentes de la rampa de separación de sólidos. Por su parte, la fracción líquida será conducida por gravedad a la cámara anoxia donde iniciará su tratamiento biológico.

### 1.1.4.- Tratamiento biológico del líquido clarificado del purín.

El tratamiento biológico de la fracción líquida del purín tiene como principal objetivo la obtención de un efluente depurado susceptible de ser empleado como líquido de fertirrigación. Teniendo en cuenta la alta concentración de nitrógeno amoniacal en el purín, éste será el elemento principal a eliminar. La reducción del nitrógeno total se conseguirá mediante un tratamiento biológico con nitrificación-desnitrificación.

La línea de tratamiento contará con dos procesos principales:

- Tratamiento biológico. Nitrificación-desnitrificación.
- Decantación secundaria.

## TRATAMIENTO BIOLÓGICO

En el tratamiento biológico se producirá la reducción del nitrógeno total mediante dos etapas consecutivas: nitrificación y desnitrificación. Para ello se dispondrán de dos áreas físicamente independientes, de tal manera que en la primera se llevará a cabo el

proceso biológico aerobio y el de nitrificación (conversión del nitrógeno amoniacal en nitratos), mientras que en la segunda se conseguirán las condiciones requeridas de escasez de oxígeno que favorecen la desnitrificación (conversión de los nitratos en nitrógeno gas). El líquido clarificado será conducido por gravedad desde el decantador primario a la cámara de anoxia, dimensionada para un tiempo de retención de 4,4 días, donde se mezclará con el efluente procedente del reactor biológico.

Desde la cámara de anoxia, la mezcla será bombeada al proceso biológico, donde se producirá una reducción de la materia orgánica ( $DBO_5$ ) y el proceso de nitrificación. Este proceso se llevará a cabo en un reactor biológico, donde un motor de hélice situado en la parte superior del mismo será el encargado de garantizar el flujo vertical del licor, dirigido hacia la chimenea por medio de un embudo también situado en la parte superior. El licor retornará por gravedad hacia la cámara de anoxia, donde se producirá la desnitrificación final.

## DECANTACIÓN SECUNDARIA

El licor mixto procedente del tratamiento biológico se conducirá desde la cámara de anoxia hacia la concentración o decantación secundaria, diseñada para un tiempo de retención de 39,1 horas. Parte de los fangos se bombearán hacia el tanque de fangos y otra parte se recirculan. El efluente clarificado será conducido por gravedad hacia la balsa de fertirrigación.

### 1.1.5.- Digestión anaerobia de los fangos espesados y generación de Biogás.

Los fangos obtenidos de la decantación del purín serán sometidos a un proceso de digestión anaerobia con el objetivo principal de obtener biogás para su posterior aprovechamiento energético.

Las principales etapas que componen el proceso son las siguientes:

- Alimentación a digestión
- Digestión anaerobia
- Separación de fases del digestato
- Producción de biogás

## ALIMENTACIÓN A DIGESTIÓN

La fracción sólida del purín obtenida en las diversas etapas de separación de fases del proceso, será conducida al tanque de fangos donde se almacenará un tiempo de 12 horas para posteriormente ser impulsada mediante bombeo al mezclador de sustratos.

## DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión se basa en un proceso de almacenamiento y circulación, donde se utilizaran dos digestores, a través de los cuales circulará el fango de manera continua. La alimentación a los digestores se realizará mediante el purín separado y decantado en la entrada de la planta, así como mediante los fangos recirculados del proceso biológico. En los digestores la materia orgánica fermenta. Una vez alcanza cierto nivel, el fango digerido (digestato) se vaciará por bombeo al depósito pulmón.

El aporte de energía calorífica necesario para mantener estable la temperatura en el proceso de digestión (80°C) se conseguirá mediante un sistema de intercambiador de calor externo, en el que el fluido térmico calentado con parte de la energía térmica producida en la cogeneración, transferirá el calor al circuito de fangos de digestión.

Una estrategia que permite optimizar esta digestión anaerobia es la digestión conjunta (co-digestión) del purín con uno o más sustratos diferentes (co-sustratos), tal y como se verá en el Anexo II.

## SEPARACIÓN DE FASES DEL DIGESTATO

El digestato se conducirá por bombeo desde los digestores hacia un depósito pulmón.

La concentración del fango se realizará mediante un sistema de decantación por centrífuga con adición opcional de polielectrolito. Se alimentará mediante una bomba de caudal constante, para asegurar el adecuado funcionamiento de la centrífuga.

La parte sólida del digestato se transportará a la zona de almacenamiento. La fase líquida clarificada se recirculará, por gravedad, a la cámara anoxia, para introducirse en el tratamiento biológico.

## PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

El biogás es un producto que se obtiene a partir de la fermentación de la materia orgánica, y está constituido mayoritariamente por metano (60% aprox.) y dióxido de carbono (30% aprox.).

El biogás almacenado en la parte superior de los digestores se transportará mediante tubería hacia el sistema de depuración de gases antes de ser valorizado energéticamente en el sistema de cogeneración.

### 1.1.6.- Cogeneración.

El biogás se convertirá en energía eléctrica y térmica dentro de la planta de cogeneración.

- La energía eléctrica generada se empleará en cubrir las necesidades de la planta eléctrica de la planta. La sobrante se exportará a la red de servicio pública de la compañía eléctrica distribuidora.
- Una parte de la energía térmica obtenida se empleará en el proceso de calentamiento de los digestores. El calor residual queda disponible en planta.

## RECUPERACIÓN TÉRMICA

Existirán dos fuentes de calor debidas al funcionamiento del motor:

- Circuito interno del motor: destinado a recuperar el calor contenido en el circuito de agua interno de refrigeración del motor.
- Intercambiador de calor: destinado a aprovechar el calor contenido en los gases de escape para calentar el fluido térmico de la calefacción de los digestores.

El circuito primario del conjunto de intercambiadores de los motores recorrerá diferentes elementos del bloque motor de forma que la potencia total entregada sea la suma de la refrigeración de las camisas, refrigeración aceite y refrigeración intercooler 1. La temperatura de salida de agua será de 90 °C. Se dispone de aerorrefrigeradores para el caso de no aprovechamiento de esta energía térmica asegurando el correcto funcionamiento del sistema de refrigeración del motor.

Los gases de combustión del motor se conducirán hasta el intercambiador de calor, de flujo cruzado a contracorriente, con el fin de obtener un mejor aprovechamiento energético.

Los gases de escape entrarán al intercambiador a una temperatura entre 372 y 425 °C. A la salida del intercambiador, los gases de combustión ya a baja temperatura, serán conducidos a la atmósfera.

### **1.2.- Análisis de los parámetros de diseño.**

A continuación se indican los parámetros de diseño adoptados en el cálculo de los principales elementos de la planta [5]:

DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
Purín	60.000	m <sup>3</sup> /año
DIGESTIÓN Purín a digestión	35.020	tm/año
ALMACENAMIENTO A FRACCIÓN SÓLIDA Purín digerido a almacenamiento	4.436	m <sup>3</sup> /año
TRATAMIENTO BIOLÓGICO Influyente	164	m <sup>3</sup> /día

Tabla 14. Parámetros de diseño de la planta según proyecto [5].

### **1.3.- Consumos energéticos de la planta.**

En la tabla 15 que se muestran a continuación, se indican los consumos eléctricos de los distintos equipos para el correcto funcionamiento de la planta.

PROCESO	EQUIPO	kWe
DESBASTE	1 Reja automatic circular	0,18
DECANTACIÓN 1ª	1 Bomba	0,25
TRATAMIENTO BIOLÓGICO	1 Biorreactor 3 Bombas	110 0,75
DECANTACIÓN 2ª	1 Bomba	0,25
DIGESTIÓN	1 Motor principal 1 Retrovariador 1 Rasca-sólidos 1 Motor ventilador	15 4 0,25 0,25
PULMON/CENTRIFUGA	2 Cargadores de sólidos 2 Mezcladores 2 Agitadores	5 15 11

Tabla 15. Consumos eléctricos de los equipos de la planta de Capella (Huesca) [5].



En cuanto al consumo de energía térmica, se considerará que el 40% del calor producido por la planta se destinará al calentamiento de los digestores en el proceso de la digestión anaerobia [5].

## **ANEXO II. ESTADO DEL ARTE DE LA CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS GANADEROS Y AGROINDUSTRIALES.**

La digestión anaerobia, también denominada biometanización, es un proceso biológico que ocurre en ausencia de oxígeno, en el cual gracias a la acción de varios grupos de bacterias, la materia orgánica se descompone, dando como resultado dos productos principales: biogás y digestato.

Los residuos ganaderos son, en la mayoría de países, los residuos orgánicos que se producen mayor cantidad (en España se producen del orden de cincuenta millones de toneladas de purines [40]) y la digestión anaerobia es un proceso idóneo para llevar a cabo el tratamiento de estos residuos.

No obstante, la producción de metano que se obtiene en el proceso no es muy elevada:  $11,8\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{t}$  residuo con purín de porcino,  $17,7\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{t}$  residuo con purín de vacuno y  $54,4\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{t}$  residuo con gallinaza [41].

Para aumentar la producción de biogás es factible añadir otros residuos biodegradables a los residuos ganaderos, tales como residuos orgánicos agroindustriales (co-digestión). La principal ventaja de la co-digestión radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado. Además de incrementar el potencial de producción de biogás, la adición de co-sustratos fácilmente biodegradables confiere una estabilidad adicional al sistema. Este efecto puede deberse a un aumento en la biomasa activa resultando en una mayor resistencia a fenómenos de inhibición. También las partes inorgánicas de algunos de estos co-sustratos, como es el caso de las arcillas y compuestos de hierro, han mostrado un efecto positivo frente a los procesos de inhibición por amonio o sulfhídrico [42]. Además, unifica la gestión de estos residuos al compartir instalaciones de tratamiento, reduciendo los costes de inversión y explotación.

Dinamarca cuenta con un larga experiencia en la explotación de plantas de biometanización, pasando de 9 plantas centralizadas construidas en 1987 sólo para el tratamiento de residuos ganaderos, a 30 plantas en el año 2000, que utilizan un sistema de co-digestión de mezclas de diferentes de residuos orgánicos, incluyendo lodos biológicos y FORSU (Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos), con una proporción mayoritaria de residuos ganaderos. La producción media de las plantas danesas que utilizan mezclas fue, para el mes de marzo de 2000, de  $41,8 \text{ m}^3$  de biogás/t de residuo tratado, con un valor medio en la planta de Vegger de  $143 \text{ m}^3$  de biogás/t residuos. Mediante datos de 1999, se comprobó que la producción en las

plantas que trabajaban únicamente con residuos ganaderos fue siempre inferior a 26,6m<sup>3</sup> de biogás/t, con un valor medio de 14,5m<sup>3</sup> de biogás/t [9].

La evaluación de la experiencia danesa se considera positiva, ya que contribuye al reciclaje de los residuos orgánicos, contribuye a la producción de energía renovable y a disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>, ofrece una alternativa económica para muchos residuos de la industria alimentaria y lodos de pequeñas plantas depuradoras, contribuye a disminuir los costes de inversión en instalaciones de tratamiento colectivo, permite controlar la calidad de los productos que se aplican al suelo, y crea un marco de control y gestión en la zona de influencia de cada planta. Estas pueden considerarse centros de gestión integral e integrada de residuos orgánicos.

Junto a Dinamarca existen otros países como Alemania, Austria y Suecia que se pueden considerar punteros en Europa en la obtención de biogás mediante co-digestión anaerobia de residuos ganaderos y agroindustriales.

Suecia se ha convertido en el líder mundial en la utilización de biogás como energía renovable para aplicaciones de transporte. Según datos de 2004, aproximadamente 4.500 vehículos funcionan ya con combustible gas, incluyendo la mayoría de autobuses urbanos de sus principales ciudades. El 45% del combustible de estos vehículos procede del biogás mientras que el restante 55% procede del gas natural. Para el año 2020 se prevé que aproximadamente 200.000 vehículos estén operando con biogás.

Las últimas implementaciones realizadas en Suecia, aparte de la mayor incorporación de co-sustratos de reacción, están enfocadas en el aumento de los índices de producción mediante pre-tratamientos térmicos, aplicados sobre todo a subproductos animales ó residuos ricos en líquidos.

El aprovechamiento energético de los residuos ganaderos tiene un doble efecto positivo: reducciones de las emisiones de gases de efecto invernadero y reducciones de las emisiones equivalentes de vida a la fuente fósil que se sustituye. Este doble efecto solo se consigue si se optimiza tanto la producción como el uso de la energía obtenida en forma de biogás.

### **2.1.- Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de la industria aceitera.**

Experimentalmente se ha comprobado que la co-digestión de alpechín con purín de porcino es un método económicamente rentable al no ser necesario el aporte de nutrientes ó la adición de reactivos químicos para mejorar la capacidad tampón [43].

Sin embargo, es necesario conocer la cantidad óptima de purín para realizar la co-digestión de forma efectiva. Un modelo cinético desarrollado para el proceso de co-digestión de mezclas de alpechín y purín de cerdo establece que el proceso resulta estable cuando se tratan de mezclas que contienen entre el 10 y el 25% de purín [44].

## **2.2.- Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de la industria hortofrutícola.**

Los restos de frutas y vegetales se generan en grandes cantidades tanto en mercados como en industrias transformadoras, como por ejemplo, la industria de zumos. La composición de estos residuos hace que tengan un alto potencial para producir metano, pero deben ser usados con cuidado, alimentándolos al proceso a un ritmo controlado. En la tabla 16 se recoge el potencial de producción de metano de diferentes frutas y vegetales, obtenidos mediante ensayos BMP – Biochemical Methane Potencial– [45].

Sustrato	Sólidos Volátiles (% de Sólidos Totales)	Producción de Metano (m <sup>3</sup> /t SV alimentado)
Mango	95,7	496
Plátano	91,2	292
Naranja	93,5	479
Mandarina	94,6	471
Limón	96,8	473
Piña	93,9	356
Patata	90,9	267

Tabla 16. Producción de metano en residuos de frutas y vegetales.

En esta línea de investigación, Molinuevo-Salces et al [46] también comprobaron que la co-digestión con una mezcla de restos de vegetales procesados (judías verdes, maíz, zanahorias y puerros -25:25:25:25% en MS-) al 50%, mejoraba en 3 veces la producción de metano con tiempos de retención de 25 días.

Existen algunas plantas que operan a escala industrial en las que se co-digieren residuos ganaderos con restos de residuos vegetales y frutas, siendo los restos de patatas los residuos agroindustriales que más se utilizan. En la tabla 17 se reúne la información obtenida sobre dichas plantas.

PLANTA	DESCRIPCIÓN
<b>Miralcamp</b> (Lérida-España)	<i>Purín de cerdo</i>  <i>Co-sustratos: aceite de soja, fangos de depuradora, residuos de mermeladas y residuos de patata.</i>  <i>50 t mezcla/día (3,5% m.s.), TRH de 30 días, 35°C</i>  <i>40 m<sup>3</sup> biogás/t mezcla, &gt; 65% de CH<sub>4</sub></i>
<b>Vila-Sana</b> (Lérida-España)	<i>Purín de cerdo (80%)</i>  <i>Co-sustratos (20%): Residuos orgánicos de la zona como derivados de alcohol, derivados de aceites vegetales, lodos de depuradora de aguas industriales, derivados de frutas, cebolla y leche.</i>  <i>30,7 t mezcla/día, TRH de 15 días, 52-55°C</i>  <i>71,4 m<sup>3</sup> biogás/t mezcla</i>

Tabla 17. Plantas industriales de biometanización que co-digieren residuos ganaderos y residuos hortofrutícolas [9].

### **2.3.- Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de naranja.**

La utilización de residuos cítricos en la co-digestión anaerobia podría contribuir a solucionar el problema de gestión de estos residuos en zonas de elevada producción (principalmente el Levante español). Sin embargo, la presencia de aceites esenciales en la corteza dificulta el proceso por su efecto inhibitor. Estudios de laboratorio [47], han mostrado que el efecto inhibitor depende de la concentración de aceites esenciales, ya que se reduce este efecto cuando la concentración en el digestor baja de 0,075 g/L. la concentración de aceites esenciales puede reducirse aplicando pre-tratamientos al residuo de naranja.

Existen datos sobre la co-digestión anaerobia de estiércol de vacuno y restos de procesado de naranja obtenidos en un estudio realizado a escala piloto en 1995 en India [48], en la que se estudiaba el efecto del pre-tratamiento con diferentes hongos sobre la producción del biogás. Se comprobó que el pre-tratamiento realizado aumento la biodegradabilidad de los compuestos poliméricos presentes y, de esta manera, el contenido de azúcares y proteínas. Una alimentación de residuos del procesado de naranja con un 8% (peso seco) de residuo pre-tratado, aumento los niveles de producción de biogás, alcanzándose una producción de 500-600 m<sup>3</sup> biogás/t SV (equivalente a 450-540 m<sup>3</sup> biogás/t residuo de naranja).

## 2.4.- Co-digestión de residuos ganaderos y cultivos energéticos.

Los cultivos energéticos presentan propiedades que los hacen muy buenos sustratos en la obtención de biogás mediante digestión anaerobia, hasta el punto de que existen plantas industriales que realizan la digestión anaerobia solamente con estos cultivos. La cantidad de biogás generado de un sustrato en particular depende fuertemente de la composición del sustrato. La composición típica de un cultivo energético (paja de trigo, de maíz,...), está compuesta por carbohidratos, proteínas, grasas y agua. En la tabla 18 se recogen valores de producción de biogás de los diferentes cultivos energéticos según datos de Tekniska Verken, empresa constructora de una de las mayores plantas de tratamiento anaerobio de cultivos energéticos (ubicada en Linköping, Suecia).

COMPONENTE	Producción de biogás (m <sup>3</sup> N/t)	Contenido en CH <sub>4</sub> (%)
Grasas	1390	69
Proteínas	650	78
Carbohidratos	850	50

Tabla 18. Biogás producido durante la completa degradación de 1 kg de sustrato (Tekniska Verken) [49].

Estimaciones realizadas sobre la capacidad de algunos cultivos para producir electricidad, muestran que con 1 ha de maíz (alrededor de 50tn) puede producirse entre 2-2,5kW<sub>e</sub>, 1ha de pasto (alrededor de 25tn) entre 0,8-1,2kW<sub>e</sub>, mientras que una vaca (alrededor de 18,25tn/año) genera alrededor de 0,2kW<sub>e</sub> [50].

Por otro lado, la paja de cereales también es un buen co-sustrato para la digestión anaerobia, ya que una co-digestión de purín de cerdo con un 1% de paja, permite incrementar la producción de metano en un 10% [8].

En la tabla 19 se recogen los datos técnicos de algunas de las plantas que operan a escala industrial y utilizan como sustratos para la digestión anaerobia, residuos ganaderos y cultivos energéticos. En estas plantas el biogás se quema en motores de cogeneración, obteniendo electricidad y calor, mientras que la fracción líquida del digestato se emplea como fertilizante.

	ROHKRAFT (baja Austria)	ARCHEA (Alemania)	JUHNDE BIOENERGY VILLAGE (Alemania)
<b>CO-SUSTRATOS</b>	<i>Purín de cerdo (30%) con lixiviados de los silos cultivos. Cultivos energéticos y restos vegetales (70%).</i>	<i>Purín de cerdo; 12,5% Hierba fresca; 12,5% Silo; 75%</i>	<i>Vacuno; 51% Silo hierba y maíz; 42% Maíz grano; 7%</i>
<b>CAPACIDAD DE TRATAMIENTO</b>	<i>50 t/día</i>	<i>10 t/día</i>	<i>55-60 t/día</i>
<b>PRODUCCIÓN DE BIOGÁS</b>	<i>11008 m<sup>3</sup>/día (220 m<sup>3</sup>/t)</i>	<i>&gt;2000 m<sup>3</sup>/día (&gt;200 m<sup>3</sup>/t)</i>	<i>7200-8400 m<sup>3</sup>/día (131-140 m<sup>3</sup>/t)</i>
<b>CONTENIDO EN CH<sup>4</sup> DEL BIOGÁS</b>		<i>52-55%</i>	<i>50%</i>
<b>PRODUCCIÓN ENERGÉTICA</b>	<i>Elect: 8030 MWh/año Calor: 8223 MWh/año</i>	<i>Elect: 240 kW Calor: desconocido</i>	<i>Elect: 680 kW Calor: 700 kW</i>

Tabla 19. Datos técnicos de plantas de biometanización que co-digieren residuos ganaderos y cultivos energéticos [9].

## 2.5.- Co-digestión de residuos ganaderos y residuos animales.

Los subproductos animales y los residuos de matadero presentan propiedades que los hacen aptos para ser usados como co-sustratos en la co-digestión anaerobia con residuos ganaderos (alto contenido graso).

La Unión Europea exige la pasteurización o la esterilización de los residuos procedentes de matadero cuando estos vayan a ser utilizados en tierras agrícolas.

Respecto a la existencia de plantas industriales que obtienen biogás a partir de la co-digestión anaerobia de residuos ganaderos y animales, Dinamarca aparece como el país que cuenta con un mayor número de plantas, con la particularidad de que en ellas se co-digiere residuos ganaderos y mezclas de residuos animales procedentes de mataderos y de la industria del procesado de pescado. Suecia, Alemania, Polonia y España cuentan también con plantas en operación en los que el proceso de co-digestión anaerobia se realiza con este tipo de residuos. En España existe una planta ubicada en la Junquera (Lérida).

### 2.5.1.- Co-digestión con residuos ganaderos y residuos de matadero.

Son numerosas las investigaciones realizadas sobre digestión anaerobia de residuos animales generados en mataderos, aunque usados como único sustrato en el proceso.

Respecto a la higienización exigida en la UE para los residuos de matadero, en [51] se estudió el efecto de este pre-tratamiento en una mezcla de residuos animales procedentes de mataderos (harinas de carne, rumen, estómago y contenido estomacal) y residuos alimentarios. Se observó que con este pre-tratamiento la

producción de biogás es 4 veces mayor cuando se higieniza la mezcla a tratar ( $1140 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{SV}}$  frente a  $310 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{SV}}$  obtenido con mezcla sin higienizar).

Según las investigaciones llevadas a cabo por Hejnfelt et al. 2009 [52], la co-digestión de purín con un 5% de subproductos de matadero de cerdo mejora la producción de metano en un 40% respecto al purín sólo.

A continuación, en la tabla 20 se muestra la producción de metano a partir de la digestión anaerobia de diferentes subproductos animales.

TIPOLOGÍA	PRODUCCIÓN DE $\text{CH}_4$ ( $\text{m}^3/\text{t}$ )
Sangre	58
Intestino y su contenido	33
Harinas de car y huesos	305
Subproductos animales pasteurizados	225
Subproductos animales no pasteurizados	56
Mezclas de matadero	160
Residuos de matadero	130

Tabla 20. Producción de metano a partir de la digestión anaerobia de diferentes subproductos animales [9].

En los mataderos, los animales son faenados para separar las partes comestibles y los efluentes, los cuales contienen sangre, estiércol, pelos, grasas, huesos, proteínas y otros contaminantes solubles. Dichos efluentes tienen un problema adicional, la gran variabilidad en la composición y en la concentración, las cuales pueden variar aparte de un día para otro, en el curso de un mismo día. La composición media de efluente procedente de faena de cerdo es: ST  $4000 \text{ mg/l}$ ; SV  $2000 \text{ mg/l}$ ; DQO  $2500 \text{ mg/l}$ ;  $\text{DBO}_5$   $1000 \text{ mg/l}$ ; nitrógeno total  $250 \text{ mg/l}$ ; fósforo  $25 \text{ mg/l}$ ; aceites y grasa  $150 \text{ mg/l}$  [53].

Por otro lado, las sinergias de los residuos matadero con otros sustratos tal como residuos industriales y restos de restaurante, de frutas y de desechos vegetales también mejoraba la producción de metano. Se comprobó que una mezcla con un 66% de purín de cerdo, un 17% de residuos industriales (87% grasas y 13% residuos de la industria alimenticia), un 12% de residuos de matadero (50% fangos, 25% rumen y 25% estiércol) y un 5% de restos de restaurantes, de frutas y de derechos vegetales llegaba a producir un  $84,46 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{tn}$  de mezcla [11].



Como ya se ha indicado, son numerosas las plantas que operan a escala industrial que obtienen biogás a partir de mezclas de residuos ganaderos y residuos de matadero. En la tabla 21 se recogen los datos técnicos de algunas de ellas.

	JUNEDA-LÉRIDA (España)	LAHOLM (Suecia)	PAWLOWKO (Polonia)
CONSTRUCTOR	TRACJUSA	Laholm Biogas AB	
CO-SUSTRATOS	Cerdo Lodos de depuradora de matadero	Ganaderos; 60% (79% cerdo, 21% vacuno) Matadero; 40%	Ganaderos; 87% (cerdo) Matadero; 13%
PRE-TRATAMIENTO	Trituración y desarenado	Higienización (70°C, 1 hora)	Higienización (70°C, 1 hora)
CAPACIDAD DE TRATAMIENTO	300 t/día	150 m <sup>3</sup> mezcla/día	
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	6000-7500 m <sup>3</sup> /día (20-25 m <sup>3</sup> /t mezcla)	9000 m <sup>3</sup> /día (60 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> mezcla)	1200 m <sup>3</sup> /día + 199 m <sup>3</sup> (almacen.)
CONTENIDO EN CH <sup>4</sup> DEL BIOGÁS	>65%	75%	65%
PRODUCCIÓN ENERGÉTICA	16,3 MW	20-30 GWh/año	1,4 (Elect) + 2,6 (calor) GWh/año

Tabla 21. Datos técnicos de plantas de biometanización que co-digieren residuos ganaderos y residuos de matadero [8].

#### 2.5.2.- Co-digestión con residuos ganaderos y residuos pesqueros.

También son numerosos los datos experimentales obtenidos en investigaciones realizadas a escala de laboratorio sobre el proceso de digestión anaerobia utilizando como sustrato residuos de la industria pesquera, ya sea como sustrato único o con otros sustratos como residuos ganaderos.

En la tabla 22 se recogen datos de producción de biogás a partir de diferentes residuos de la industria pesquera y con diferentes condiciones de operación.

ALIMENTACIÓN	COMPOSICIÓN ALIMENTACIÓN	OPERACIÓN	PROD. GAS	% CH <sub>4</sub>
Residuos de matadero, industriales y estiércol de cerdo	9,7-10,3% ST  C/N: 8-11	CSTR  35°C	800-1000m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t SV	68,2-70,5
97% estiércol de cerdo, 2% residuo de aceite de pescado, 1% bentonita		30°C  HRT: 15 d	184 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t SV	65

Tabla 22. Producción de biogás a partir de diferentes residuos pesqueros en procesos de co-digestión con otros sustratos [12] y [54].

En la tabla 23 que se muestra a continuación, se recogen los datos técnicos de plantas ubicadas en Dinamarca que operan a escala industrial y en la que co-digieren residuos ganaderos y residuos procedentes de la industrial del pescado. En todas, además de

purines y residuos de pescado, se co-digieren otros residuos, como residuos lácteos, farmacéuticos y, en muchas de las plantas analizadas, residuos de matadero.

	HEGNDAL-HEMMET (Dinamarca)	VESTER HJERMITSLEV (Dinamarca)	BLABJERG (Dinamarca)
<b>CONSTRUCTOR</b>	<i>Jenny and Kent Skaaning</i>	<i>Vester Hjerimitslev Energiselskab</i>	<i>Blabjerg Biogas A.m.b.a.</i>
<b>CO-SUSTRATOS</b>	<i>Ganaderos; 95% (cerdo) Pesqueros grasos; 5%</i>	<i>Ganaderos; 76% (cerdo y vacuno) Pesqueros (lodos flotantes) y residuos de curtidos; 24%</i>	<i>Ganaderos; 72% (cerdo y vacuno) Pesqueros, orgánicos de alimentos, lodos de depuradora, etc; 28%</i>
<b>PRE- TRATAMIENTO</b>		<i>4,5 horas a 57°C (tras digestión)</i>	<i>MGRT 8 horas a 53,5 °C</i>
<b>CAPACIDAD DE TRATAMIENTO</b>	<i>52,7 t/día</i>	<i>54 t/día</i>	<i>309 t/día</i>
<b>PRODUCCIÓN DE BIOGÁS</b>	<i>3560 m<sup>3</sup>/día (67,6 m<sup>3</sup>/t mezcla)</i>	<i>2740 m<sup>3</sup>/día (50,7 m<sup>3</sup>/t)</i>	<i>8500 m<sup>3</sup>/día (27,5 m<sup>3</sup>/t mezcla)</i>
<b>PRODUCCIÓN ENERGÉTICA</b>	<i>350 kW</i>	<i>1610 kW</i>	<i>7840 kW</i>

Tabla 23. Datos técnicos de plantas industriales de biometanización que co-digieren residuos ganaderos y residuos del proceso de pescado [9].

## **2.6.- Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de la industria láctea.**

No se ha encontrado demasiada información sobre la utilización de este tipo de co-sustrato. En la planta de Vila-sana (España) se añade leche como co-sustrato, junto con otros residuos orgánicos, como restos de fruta [9].

## **2.7.- Co-digestión de residuos ganaderos y residuos de la fabricación de biodiesel.**

La glicerina es un producto de la fabricación del biodiesel. El mercado de la glicerina es limitado, por lo que, cuando la capacidad de producción de biodiesel aumente, la glicerina terminará siendo un subproducto de relativamente bajo valor, aumentando el coste de la producción de biodiesel. La utilización de la glicerina como materia prima en otras industrias puede ayudar a que la producción de biodiesel sea más factible económicamente.

Una de las posibles aplicaciones para este residuo es la co-digestión anaeróbica con otros residuos orgánicos, con el objetivo de aumentar el potencial del biogás. La glicerina presenta un pH adecuado para la digestión anaerobia y además es muy biodegradable.

Se han encontrado datos de plantas que operan a escala industrial en las que la glicerina se añade como tercer co-sustrato al proceso de digestión anaerobia para compensar el efecto inhibitorio que causa el nitrógeno amoniacal producido como consecuencia de un elevado contenido de nitrógeno en los residuos tratados. El elevado contenido en carbono de la glicerina permite aumentar la relación C/N en la mezcla, evitando fenómenos de inhibición debidos al nitrógeno.

Estudios experimentales realizados demuestran que la adición de glicerina en procesos de co-digestión anaerobia aumenta la producción de biogás. Esta es una de las principales conclusiones obtenidas por Amon et al. (2006) [55], que optimizaron la digestión anaerobia de purín de cerdo con silo de maíz, utilizando un suplemento de glicerina. Los ensayos permitieron concluir que la producción de biogás es especialmente alta con adiciones de glicerina de 3-6%, mientras que a concentraciones de glicerina de 8% y 15% se observa una inhibición debida a la presencia de grandes cantidades de ácidos propiónico y butírico. Sin embargo a escala industrial, se tiene constancia de que en la planta de biogás de Hashoej en Dinamarca, alimentan un reactor con un 9% de glicerina produciendo altos caudales de biogás.

En otro reciente estudio llevado a cabo por Astals et al [10] sobre el incremento de la producción de biogás con co-digestión de glicerina, se concluyo que la co-digestión del purín con un 4% de glicerina, aumentaba la producción de biogás en un 400%.

En la tabla 24 se recogen datos técnicos de dos plantas en las que se trabajó con residuos de glicerina en el proceso de co-digestión con residuos ganaderos y otros residuos orgánicos. La planta Skovbaekgaard, en Dinamarca, es la única que, hasta el momento, obtiene biogás a partir de la co-digestión de residuos ganaderos (de vacuno, en concreto) y glicerina procedente de la fabricación de biodiesel. No se conocen datos sobre la proporción en la que se añaden los co-sustratos pero se comprueba como la adición de glicerina al proceso produjo un aumento considerable de la producción de biogás (del 186%).

	SKOVBAEKGAARG BIOGAS PLANT HOLSTED (Dinamarca)	BIOENERGIE AHDEN GmH&Co. KG BIOGAS PLANT BUREN-AHDEN (Alemania)
<b>GESTOR</b>	<i>La propia granja productora de purín</i>	<i>Construcción: Biogas Nord Seguimiento: University Southern of Denmark</i>
<b>CO-SUSTRATOS</b>	<i>Ganaderos; (vacuno: 450 animales) Glicerina (biodiesel): 1000 m<sup>3</sup>/año Ocasionalmente, grasas vegetales (avena): 100 t/año máximo.</i>	<i>Ganaderos; 28,5% (cerdo) Otros; 71,5% (residuos de comida) (Se ha añadido glicerina y mezclas de glicerina/agua)</i>
<b>CAPACIDAD DE TRATAMIENTO</b>	<i>No disponible</i>	<i>38 m<sup>3</sup>/día</i>
<b>PRODUCCIÓN DE BIOGÁS</b>	<i>3000-3500 m<sup>3</sup>/día sin adición de glicerina 10000 m<sup>3</sup>/día con glicerina</i>	<i>Dato no disponible</i>
<b>CONTENIDO EN CH<sub>4</sub> DEL BIOGAS</b>	<i>52-55%</i>	<i>65-70%</i>
<b>PRODUCCIÓN ENERGÉTICA</b>	<i>5000-8000 kWh/día</i>	<i>750 kW</i>

Tabla 24. Datos técnicos de plantas industriales de biometanización que co-digieren residuos ganaderos y residuos de glicerina [9].

## 2.8.- Co-digestión de residuos ganaderos y otros residuos orgánicos.

En la tabla 25 que se muestra a continuación, se muestran los datos técnicos de plantas de biometanización que co-digieren residuos ganaderos con aguas residuales y lodos.

	BIOVAKKA-VEHNNA (Finlandia)	SPILAMBERTO MÓDENA (Italia)	NISTELRODE (Holanda)
<b>CONSTRUCTOR</b>	<i>Biovakka</i>	<i>Huber Technology (Hans Huber A.G.)</i>	<i>Blabjerg Biogas A.m.b.a.</i>
<b>CO-SUSTRATOS</b>	<i>Ganaderos; 71,4% (cerdo y vacuno) Los industriales; 7,1% Lodos EDAR; 21,4%</i>	<i>Ganaderos; 80% (cerdo y vacuno) Otros; 20% (lodos de aguas residuales)</i>	<i>Ganaderos; 81,5% (72,6% avícola y 27,4% cerdo) Otros; 18,5% (lodo floculado procedente del industria cárnica y del pescado)</i>
<b>PRE-TRATAMIENTO</b>	<i>Residuo ganadero: homogeneización a 12 mm e higienización a 70°C durante 1h</i>	<i>Dato no disponible</i>	<i>Dato no disponible</i>
<b>CAPACIDAD DE TRATAMIENTO</b>	<i>329 t/día</i>	<i>600 m<sup>3</sup>/día</i>	<i>9,1 t/día</i>
<b>PRODUCCIÓN DE BIOGÁS</b>	<i>1534 m<sup>3</sup>/día (4,7 m<sup>3</sup>/t)</i>	<i>Dato no disponible</i>	<i>650 m<sup>3</sup>/día (71,4 m<sup>3</sup>/t)</i>
<b>CONTENIDO EN CH<sub>4</sub> DEL BIOGAS</b>	<i>60-65%</i>	<i>Dato no disponible</i>	<i>64%</i>
<b>PRODUCCIÓN ENERGÉTICA</b>	<i>4-5 MkW</i>	<i>Dato no disponible</i>	<i>146 kW (340 MWh/año)</i>

Tabla 25. Datos técnicos de plantas de biometanización que co-digieren residuos ganaderos con aguas residuales y lodos [9].

Por otro lado, en cuando a la co-digestión con FORSU (Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos), según un estudio llevado a cabo por Ruihong Zhang et. Al [56], la co-digestión de estiércol con FORSU (50/50) mejora la producción de metano en un 40% respecto al purín sólo.

En la tabla 26 que se muestra a continuación, se muestran los datos técnicos de plantas de biometanización que co-digieren residuos ganaderos con FORSU.

	IM BRAHM ESSEN (Alemania)	BALLYTOBIM (Irlanda)	STUDSGAAR (Dinamarca)	LEMVING (Dinamarca)
<b>CONSTRUCTOR</b>	<i>Krieg &amp; Fischer Ingenieure GMBH</i>		<i>Heming Municipal Utilities</i>	<i>Lemving A.m.b.a.</i>
<b>CO-SUSTRATOS</b>	<i>Ganaderos: Purín de cerdo. Otros: Residuos de cocina, grasas y grano.</i>	<i>Ganaderos; 64 % (cerdo) Otros; 36% (45% orgánicos de la industria alimentaria y 55% orgánicos de hogares)</i>	<i>Ganaderos; 86,5% (22% vacuno y 78% cerdo). Otros; 13,5% (industria alimentaria y residuos de los hogares).</i>	<i>Ganaderos; 83% (40% vacuno, 59% cerdo y 1% otros). Otros; 17% (residuo alimentario y fangos EDAR)</i>
<b>PRE- TRATAMIENTO</b>	<i>Ganadero: homogeneización. Separación de plásticos, piedras u otros.</i>	<i>Higienización del residuo agroindustrial (70°C, 1h)</i>	<i>Dato no disponible</i>	<i>Dato no disponible</i>
<b>CAPACIDAD DE TRATAMIENTO</b>	<i>Dato no disponible</i>	<i>22 t/día</i>	<i>266 t/día</i>	<i>437 t/día</i>
<b>PRODUCCIÓN DE BIOGÁS</b>	<i>500 m<sup>3</sup> biogás/t residuo</i>	<i>600 m<sup>3</sup>/día (27,3 m<sup>3</sup>/t)</i>	<i>15616 m<sup>3</sup>/día (58,7 m<sup>3</sup>/t)</i>	<i>14795 m<sup>3</sup>/día (33,9 m<sup>3</sup>/t)</i>
<b>CONTENIDO EN CH<sub>4</sub> DEL BIOGAS</b>	<i>Dato no disponible</i>	<i>Dato no disponible</i>	<i>Dato no disponible</i>	<i>&gt;65%</i>
<b>PRODUCCIÓN ENERGÉTICA</b>	<i>380 kW</i>	<i>Dato no disponible</i>	<i>Dato no disponible</i>	

Tabla 26. Datos técnicos de plantas de biometanización que co-digieren residuos ganaderos con FORSU [9].

## 2.9.- Conclusiones.

Tal y como se ha podido comprobar en el presente anexo, la co-digestión anaerobia puede incrementar la producción de metano en los digestores anaerobios entre un 50 y un 200% en función de las condiciones de operación y de los co-sustratos empleados, motivo por el cual el número de plantas industriales de co-digestión está aumentando. No obstante, como se ha visto, la co-digestión depende de varios parámetros dentro de la propia mezcla a tratar, como son la cantidad de nutrientes, la relación C/N, pH, compuestos tóxicos e inhibidores, % materia orgánica biodegradable y %materia de materia seca.

Por otro lado, otro de los aspectos que influyen en la producción final de metano tras la co-digestión, es el pre-tratamiento al cual es sometido el sustrato (reducción del tamaño de la partícula, espesamiento, calentamiento, control de pH, eliminación de

metales, eliminación de gérmenes patógenos...). La finalidad de esta operación es introducir el residuo lo más homogéneo posible y sin elementos que puedan dañar al digestor.

En definitiva, a la vista de la información recopilada en el presente anexo, se puede comprobar que la producción de metano en la co-digestión puede presentar diferencias significativas en función no solo del co-sustrato utilizado y de la cantidad de éstos, sino también del pre-tratamiento, de las sinergias entre los residuos y del tipo de digestor.

### **2.10.- Casos de estudio.**

Para llevar a cabo el análisis termoeconómico pretendido en el presente trabajo, se han seleccionado los siguientes casos de co-digestión teniendo:

- *Co-digestión con paja.* La co-digestión de purín de cerdo con un 1% de paja, suponiéndose paja de trigo, permite incrementar la producción de metano en un 10% [8].
- *Co-digestión con glicerina.* La co-digestión de purín de cerdo con un 4% de glicerina permite incrementar la producción de metano en un 150% (valor estimado en base a distintos estudios [9] y [10]).
- *Co-digestión con mezcla de residuos industriales, de matadero y vegetales.* La mezcla con un 66% de purín de cerdo, un 17% de residuos industriales (87% grasas y 13% residuos de la industria alimenticia), un 12% de residuos de matadero (50% fangos, 25% rumen y 25% estiércol) y un 5% de restos de restaurantes, de frutas y de derechos vegetales llegaba a producir un  $84,46\text{m}^3\text{CH}_4/\text{tn}$  de mezcla [11]. No obstante, en cuanto a la composición de esta mezcla considerada para los cálculos, comentar lo siguiente:
  - Se ha considerado que todos los residuos industriales eran grasas, al desconocerse el tipo de residuo de la industria alimenticia empleado para la co-digestión en este ensayo.
  - Del mismo modo, al desconocerse el porcentaje exacto de restos de restaurante, de fruta y de desechos vegetales empleados para el ensayo, se ha considerado que el 5% era paja de trigo.

### ANEXO III. CARACTERIZACIÓN DE LOS FLUJOS DE LOS DISTINTOS PROCESOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE PURINES OBJETO DE ESTUDIO.

En el presente anexo se van a tratar de caracterizar cada uno de los flujos de los cuatro casos de estudio, con el objeto en primer lugar, de calcular la exergía de los mismos para, posteriormente, llevar a cabo el análisis termoeconómico objeto de este trabajo, si bien en primer lugar se detallará el ambiente de referencia elegido para llevar a cabo el análisis exergético pretendido.

#### Ambiente de referencia

El ambiente de referencia elegido para el agua para el análisis realizado en el presente trabajo será el agua del mar Mediterráneo, cuya salinidad es de 36.700 ppm, considerándose exclusivamente por agua pura e iones de cloro y sodio, al ser estos los elementos mayoritarios.

Elemento	Peso	Ppm
<b>Hidrógeno (<math>H_2O</math>)</b>	1,00797	110.000
<b>Oxígeno (<math>H_2O</math>)</b>	15,9994	883.000
<b>Sodio (<math>NaCl</math>)</b>	22,9898	10.800
<b>Cloro (<math>NaCl</math>)</b>	35,453	19.400
<b>Magnesio (<math>Mg</math>)</b>	24,312	1.290
<b>Azufre (<math>S</math>)</b>	32,064	904
<b>Potasio (<math>K</math>)</b>	39,102	392
<b>Calcio (<math>Ca</math>)</b>	40,08	411
<b>Bromo (<math>Br</math>)</b>	79,909	67,3

Tabla 27. Composición del agua de mar [57].

Por otro lado, el ambiente estable de referencia para otro tipo de sustancias distintas del agua, como compuestos gaseosos y fluidos térmicos estudiados en el presente trabajo, queda definido según el ambiente de referencia de szargut [17] para las siguientes condiciones:

- $T_o$ , temperatura del ambiente de referencia, 298,15K.
- $P_o$ , presión del ambiente de referencia, 1,01325 bar.

Una vez establecido el ambiente de referencia en base al cual se realizará el análisis exergético del presente trabajo, a continuación se van a ir analizando cada uno de los distintos flujos de la planta objeto de estudio, los cuales se indican a continuación:

- **Flujos de purín.** Para caracterizar los flujos de purín se debe analizar la composición de éstos, es decir, calcular la cantidad de DQO, de nitrógeno y de fósforo total presente en cada uno de ellos.
  - La demanda química de oxígeno (DQO). La DQO es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida, es decir, en el ensayo de este parámetro se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente en oxígeno de la materia orgánica al oxidarse.
  - El nitrógeno total. El contenido total de nitrógeno está compuesto por nitrógeno orgánico y amoniacal. El contenido del nitrógeno orgánico se determina mediante con el método Kjeldahl. En este método de análisis la muestra acuosa se hierve con el objeto de eliminar el amoníaco, para dar paso al proceso de digestión en el que el nitrógeno orgánico se transforma en amoníaco. El nitrógeno Kjeldahl total se determina del mismo modo que el nitrógeno orgánico, con la diferencia de que no se elimina el amoníaco presente antes del proceso de digestión. Por lo tanto, el nitrógeno Kjeldahl total incluye ambas formas del nitrógeno, el amoniacal y el orgánico [58].
  - El fósforo total. La forma de encontrar el fósforo en el purín de cerdos es  $P_2O_5$  [5] Y [59].

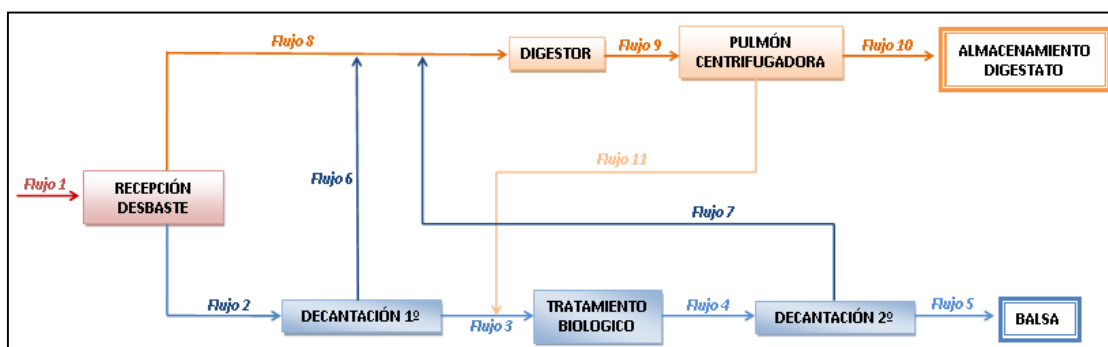


Figura 4. Esquema de los flujos de purín que forman parte de la planta de tratamiento de purines de Capella.



- **Flujos asociados con los procesos de valorización de los fangos.** Para caracterizar este tipo de flujos se analizará la cantidad de biogás producido en cada uno de los casos a analizar.



Figura 5. Flujo asociado con el proceso de valorización de fangos.

- **Flujos energéticos.** Para caracterizar los flujos energéticos (eléctricos y térmicos) se debe analizar la energía consumida por la planta para su correcto funcionamiento, así como, si una vez suplicadas las propias necesidades, analizar si se genera energía sobrante para destinarla a la venta.

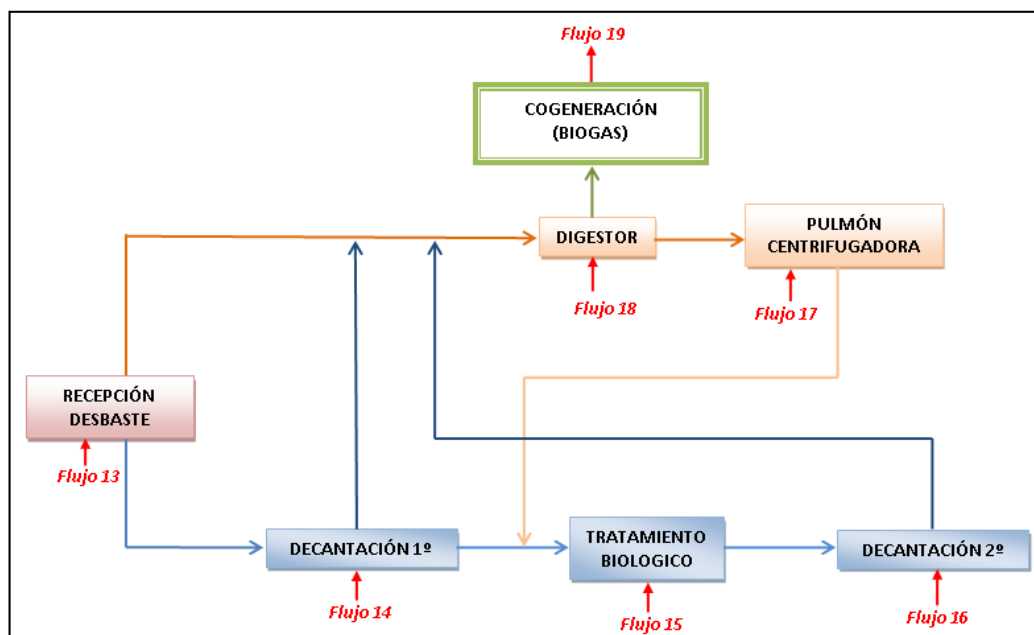


Figura 6. Esquema de los flujos energéticos que forman parte de la planta de tratamiento de purines de Capella.

- **Flujos de residuos añadidos en el proceso de tratamiento.** Para caracterizar este tipo de flujos se analizará la composición de cada uno de los sustratos a añadir en cada caso para llevar a cabo la co-digestión.



Figura 7. Flujos de residuos para co-digestión.

### **3.1.- Análisis de los flujos de la planta de Capella sin co-digestión.**

A continuación se van a ir analizando los distintos flujos de los distintos procesos para el funcionamiento de la planta de Capella sin co-digestión, es decir, sin añadir ningún sustrato que mejore la producción de biogás respecto a los datos de diseño.

#### **3.1.1.- Flujos de purín.**

En la memoria del proyecto de la planta de Capella elaborada por Sodemasa [5], se recoge la siguiente información respecto a cada uno de los distintos flujos de purín que componen la planta de tratamiento:

FLUJOS DE PURÍN	m <sup>3</sup> /año	Tn/año	Sólidos en Suspensión (tn/año)
1	60.000	61.095	1.680
2	55.909	55.531	1302
3	40.037	40.309	456
4	70.564	70.564	856
5	55.564	55.564	226
6	15.495	15.600	846
7	15.057	15.000	360
8	4.468,91	4.090,91	378
9	34.300	34.691	1109
10	3.105	4.436	979
11	30.255	30.255	130

Tabla 28. Datos relativos a los caudales de los flujos de purín reflejados en la memoria de la planta [5].

#### ▪ **Análisis de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).**

Para calcular la DQO de cada uno de los flujos, en la memoria del proyecto de la planta figura la siguiente información [5]:

Flujo	DQO (kg/año)	DQO (mg/l)
1 (Purín virgen)	3.000.000	50.000
5 (Clarificado a balsa)	222.256	4.000

Tabla 29. Datos relativos a la DQO.

Para poder calcular la cantidad de la DQO presente en el resto de flujos de purín, en primer lugar se determinará la cantidad de DQO que es eliminada con el biogás, es

decir, por el flujo 12, teniendo en cuenta que la DQO eliminada en el biogás se correspondería con la DQO obtenida en forma de metano (DQO del  $\text{CO}_2$  es nula), lo cual significa  $2,857\text{kg DQO/m}^3 \text{CH}_4$ , ó  $0,35\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg DQO}$  eliminada [60].

Flujo	Metano ( $\text{m}^3$ )	DQO ( $\text{kg/año}$ )
12	400.000	1.142.800

Tabla 30. Demanda Química de Oxígeno eliminada con el biogás.

Por lo tanto, al ser la DQO un parámetro conservativo, es decir, la suma de las DQO de entrada debe ser igual a la suma de las DQO de salida [60], se determinará la cantidad de ésta en cada uno de los flujos de purín restantes en función de los sólidos en suspensión presentes en cada uno de los flujos, al ser estos valores conocidos y al encontrarse la mayor parte de la materia orgánica en dichos sólidos. Por otro lado, se debe tener en cuenta que tanto en el digestor como el tratamiento biológico se elimina entre un 40 y 60% de la DQO [5] (según información facilitada por Sodemasa, en el digestor de la planta de Capella se elimina un 50% de la DQO).

Flujo	DQO ( $\text{kg/año}$ )	DQO ( $\text{mg/l}$ )
1 (Purín virgen)	3.000.000	50.000
2	2.454.573	43.903
3	1.233.855	30.611
4	741.710	10.511
5 (Líquido a balsa)	222.256	4.000
6	1.220.718	78.251
7	519.454	34.630
8	545.427	133.326
9	1.142.800	32.942
10	742.820	167.452
11	399.980	13.220

Tabla 31. Demanda Química de Oxígeno calculada en cada uno de los flujos de purín (se obtiene una reducción de la DQO en el tratamiento biológico del 40% aproximadamente).

#### ▪ Análisis del nitrógeno total (NKT)

Para calcular el nitrógeno total de cada uno de los flujos, en la memoria del proyecto de la planta figura la siguiente información [5]:

Flujo	NKT (kg/año)	NKT (mg/l)
<b>1</b> <i>(Purín virgen)</i>	420.000	7.000
<b>3</b> <i>(Efluente Dec.1ª)</i>	197.514	4.900
<b>5</b> <i>(Líquido a balsa)</i>	77.790	1.400

Tabla 32. Datos relativos al nitrógeno total.

Para poder calcular la cantidad de nitrógeno total presente en el resto de flujos de purín, se considerará, por un lado, que el digerido (flujo tras la digestión, Flujo 9) contiene 4kg de nitrógeno total por cada kg de materia fresca [61] y [62].

Flujo	NKT (kg/año)	NKT (mg/l)
<b>9</b> <i>(Digerido)</i>	138.764	4000

Tabla 33. Datos relativos al cálculo del nitrógeno total en el flujo 9.

Por otro lado, según Siebert [63], en un estudio llevado a cabo a varios sustratos orgánicos se pudo concluir que en los digeridos sólidos (Flujo 10), el nitrógeno total representa el 2,9% de la materia seca.

Flujo	(Tn)	Materia Seca (tn)	NKT (kg/año) en la MS
<b>10</b> <i>(Sólido a almacenaje)</i>	3.105	<b>776,25*</b> (25%)	<b>22.511</b>

Tabla 34. Datos relativos al cálculo del nitrógeno total en la Materia Seca del flujo 10. (\*El 25% del sólido a almacenaje es Materia Seca [4]).

Por lo tanto, el nitrógeno total restante procedente del flujo 9, es decir, el nitrógeno total del flujo 9 menos el contenido en la materia seca, se distribuirá proporcionalmente al caudal entre el flujo 11 y de la parte acuosa del flujo 10.

Flujo	(Tn)	NKT (kg/año)
<b>11</b>	30.255	<b>107.945</b>
<b>10</b> <i>(agua)</i>	2.328,75	<b>8.306</b>

Tabla 35. Datos relativos al cálculo del nitrógeno total en el flujo 11 y en el agua del flujo 10.

Finalmente, teniendo en cuenta el caudal volumétrico de los flujos 10 y 11, se determinará el nitrógeno total el mg/l en cada uno de estos flujos:

Flujo	(m <sup>3</sup> )	NKT (kg/año)	NKT (mg/l)
10	4.435	<b>30.817</b> (22.511+8.306)	<b>6.947</b>
11	30.255	<b>107.945</b>	<b>3.567</b>

Tabla 36. Datos relativos al cálculo del nitrógeno total en el flujo 11 y en flujo 10.

En la figura 7 se puede observar, a modo de resumen, la distribución del Nitrógeno del flujo procedente de la digestión anaerobia (flujo 9) una producida la decantación centrífuga y, por lo tanto, separada la parte solida (flujo 10) de la líquida (flujo 11) del digerido.

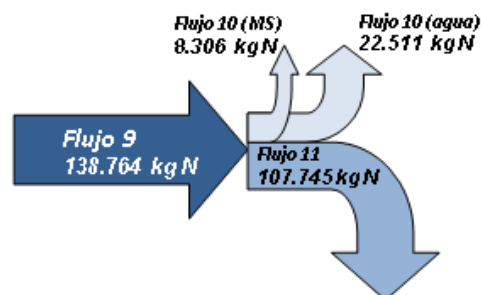


Figura 7. Distribución del Nitrógeno tras la decantación centrífuga.

Por lo tanto, al ser el nitrógeno total un parámetro conservativo, se determinará la cantidad de este parámetro en cada uno de los flujos de purín restantes, teniéndose en cuenta su reducción tanto en el digestor como el tratamiento biológico [4].

Flujo	NKT (kg/año)	NKT (mg/l)
<b>1</b> (Purín virgen)	420.000	7.000
<b>2</b>	291.114	5.207
<b>3</b> (Efluente Dec.1ª)	197.514	4.900
<b>4</b>	100.290	1.421
<b>5</b> (Líquido a balsa)	77.790	1.400
<b>6</b>	93.600	6.000
<b>7</b>	22.500	1.500
<b>8</b>	128.886	31.505
<b>9</b> (Digerido)	138.764	4000
<b>10</b>	30.817	6.947
<b>11</b>	107.945	3.567

Tabla 37. Nitrógeno total en cada uno de los flujos de purín. (Según los cálculos anteriores, en el digestor se produce un reducción de 56%, mientras que en el tratamiento biológico la reducción es del 66%, reducciones dentro de los rangos establecidos en [4]).

▪ Análisis del fósforo total.

Para calcular el fósforo total de cada uno de los flujos, en la memoria del proyecto de la planta figura la siguiente información:

Flujo	Fósforo (kg/año)	Fósforo (mg/l)
<b>1</b> <i>(Purín virgen)</i>	90.000	1.500
<b>5</b> <i>(Líquido a balsa)</i>	25.000	450

Tabla 38. Datos relativos al fósforo total. Datos obtenidos en la memoria de la planta.

Para poder calcular la cantidad de fósforo presente en el resto de flujos de purín procederemos de forma similar al cálculo del nitrógeno total, considerándose por un lado, que el digerido (flujo tras la digestión, Flujo 9) contendrá 2kg de fósforo total por cada kg de materia fresca [61] y [62], por lo tanto obtenemos:

Flujo	Fósforo (kg/año)	Fósforo (mg/l)
<b>9</b> <i>(Digerido)</i>	68.600	1.977

Tabla 39. Datos relativos al cálculo del fósforo en el flujo 9.

Del mismo modo, según Siebert [63], en un estudio llevado a cabo a varios sustratos orgánicos se pudo concluir que de los digeridos sólidos (Flujo 10), el fósforo estaba presente en el 1,3% de la materia seca, por lo tanto, aplicado este dato a la planta objeto de este trabajo, obtenemos lo siguiente:

Flujo	(Tn)	Materia Seca (tn)	Fósforo (kg/año) en la MS
<b>10</b> <i>(Sólido a almacenaje)</i>	3.105	776,25 (25%)	10.091

Tabla 40. Datos relativos al cálculo del fósforo en la Materia Seca del flujo 10.

Por lo tanto, el fósforo restante procedente del flujo 9, es decir, el fósforo del flujo 9 menos el contenido en la materia seca, se distribuirá proporcionalmente al caudal del flujo 11 y de la parte acuosa del flujo 10.

Flujo	(Tn)	Fósforo (kg/año)
<b>11</b>	30.255	54.328
<b>10</b> <i>(agua)</i>	2.328,75	4.181

Tabla 41. Datos relativos al cálculo del fósforo en el flujo 11 y en el agua del flujo 10.

Finalmente, teniendo en cuenta el caudal volumétrico de los flujos 10 y 11, se determinará el fósforo en mg/l en cada uno de estos flujos:

Flujo	(m <sup>3</sup> )	Fósforo (kg/año)	Fósforo (mg/l)
<b>10</b> <i>(Sólido a almacenaje)</i>	4.435	<b>14.272</b> (10.091+4.181)	<b>3.217</b>
<b>11</b>	30.255	<b>54.328</b>	<b>1.795</b>

Tabla 42. Datos relativos al cálculo del fósforo total en el flujo 11 y en flujo 10.

En figura 8 se puede observar, a modo de resumen, la distribución del Fósforo del flujo procedente de la digestión anaerobia (flujo 9) una producida la decantación centrífuga y, por lo tanto, separada la parte sólida (flujo 10) de la líquida (flujo 11) del digerido.

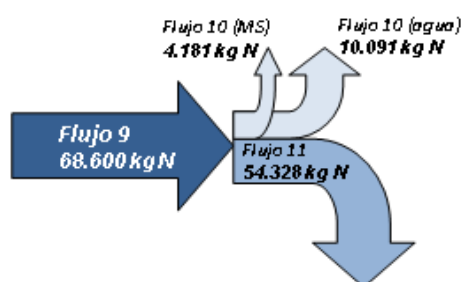


Figura 8. Distribución del Fósforo tras la decantación centrífuga.

Por lo tanto, al ser el fósforo un parámetro conservativo, se determinará la cantidad de este parámetro en cada uno de los flujos de purín restantes, teniendo en cuenta su reducción en el tratamiento biológico y que no se reduce nada en el digestor [4]

Flujo	Fósforo (kg/año)	Fósforo (mg/l)
<b>1</b> <i>(Purín virgen)</i>	90.000	1.500
<b>2</b>	45.250	809
<b>3</b> <i>(Efluente Dec.1ª)</i>	29.650	735
<b>4</b>	33.250	471
<b>5</b> <i>(Líquido a balsa)</i>	25.000	450
<b>6</b>	15.600	1000
<b>7</b>	8.250	550
<b>8</b>	44.750	10.938
<b>9</b> <i>(Digerido)</i>	68.600	1.977
<b>10</b>	14.272	3.217
<b>11</b>	54.328	1.795

Tabla 43. Fósforo total en cada uno de los flujos de purín. (Según los cálculos anteriores, en el tratamiento biológico la reducción es del 60%, reducción dentro de los rangos establecidos en [4]).

3.1.2.- Flujos asociados con los procesos de valorización de los fangos. Biogás.

Se ha estimado la composición del biogás a partir de los datos aportados en la memoria de la planta (60% CH<sub>4</sub> y 35%CO<sub>2</sub>) [5].

Datos Biogás	
Composición volumétrica	%
CH <sub>4</sub>	60
CO <sub>2</sub>	35
H <sub>2</sub> S	2
N <sub>2</sub>	1
H <sub>2</sub>	0,5
O <sub>2</sub>	0,5

Tabla 44. Datos de la composición del biogás estimados a partir de los datos de la memoria de la planta.

Para llevar los cálculos exergeticos, se considerara que el gas entra al motor a una temperatura de 300K y que éste es comprimido hasta 1,5bar.

Por otro lado, en la memoria del proyecto de la planta figura la siguiente información relativa al biogás producido:

Biogás producido (m <sup>3</sup> /año)	Metano producido (m <sup>3</sup> /año) (60% del biogás)	Poder calorífico	Energía anual producida
666.667	400.000	3.988.000 kWh/año (9,97 kWh/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> )	<b>189 KWe/año</b> (Rto eléctrico:38%)  <b>200 KWc/año</b> (Rto térmico:40%)

Tabla 45. Datos relativos a la energía generada por la planta de Capella [4].

3.1.3.- Flujos energéticos.

Los flujos energéticos pueden ser de dos tipos; flujos eléctricos y flujos térmicos.

- Flujos eléctricos.

Los flujos eléctricos pueden ser debidos, por un lado, a los consumos eléctricos necesarios para el funcionamiento de la planta (flujos del 13 al 17), y, por otro lado, al flujo de la energía eléctrica sobrante de la planta y destinada a la venta de la misma (flujo 19).



✓ *Consumos de la planta.*

Los flujos debidos a los consumos eléctricos de la planta para su correcto funcionamiento son los siguientes:

Flujo	KW	PROCESO	Equipo
13	0,18	DESBASTE	1 Reja automatic circular
14	0,25	DEC. 1ª	1 Bomba
15	110,75	TRATAMIENTO BIOLÓGICO	1 Biorreactor (110 kW) 3 Bombas (3x0,25kW)
16	0,25	DEC. 2ª	1 Bomba
17	19,5	PULMÓN/CENTRIFUGA	1 Motor principal (15kW) 1 Retrovariador (4kW) 1 Rasca-sólidos (0,25kW) 1 Motor ventilador (0,25kW)
18e	57	DIGESTOR	2 Cargadores de sólidos (2x2,5kW) 2 Mezcladores (15kW) 2 Agitadores (11kW)

Tabla 46. Datos relativos a los consumos eléctricos de la planta de Capella [5].

✓ *Energía eléctrica exportable de la planta.*

Tal y como puede verse en la tabla 45, la planta de Capella está diseñada para que genere 189kW eléctricos sin practicarse ningún tipo de co-digestión. Por lo tanto, teniendo en cuenta que los auto-consumos eléctricos para el correcto funcionamiento de la planta sin co-digestión son de 188kW, se puede comprobar que este caso tan sólo sobraría 1kW para la venta.

Flujo	kW
19e (Electricidad exportable)	1

Tabla 47. Electricidad destinada a venta.

▪ Flujos térmicos.

Los flujos térmicos, al igual que los eléctricos, pueden ser debidos, por un lado, a los auto-consumos térmicos necesarios para el funcionamiento de la planta, calentamiento de los digestores (flujo 18), y, por otro lado, al flujo de la energía térmica sobrante de la planta y destinada o bien a ser exportada o bien al almacenaje de la misma (flujo 19).

En cuanto a las temperaturas de operación de la planta, temperatura de la salida del agua y temperatura a la cual deben mantenerse los digestores para llevar a cabo la digestión anaerobia, son las siguientes [5]:

Temperatura	°C
Temperatura de salida del agua	90
Temperatura de los digestores	80

Tabla 48. Datos relativos a las temperaturas de operación de la planta.

Finalmente, teniendo en cuenta que según estimaciones realizadas por Sodemasa en la memoria del proyecto (autoconsumo térmico:40%), los flujos térmicos serían los siguientes:

Flujo	kW
18c (Autoconsumo térmico)	80
19c (Calor exportable)	120

Tabla 49. Datos relativos a los flujos térmicos de la planta de Capella.

### **3.2.- Análisis de los flujos de la planta de Capella con co-digestión.**

Para caracterizar los flujos en los casos de co-digestión, procederemos de la misma manera que en el caso sin co-digestión, viéndose algunos de ellos inalterados, ya que la co-digestión afecta solamente a la digestión anaerobia. Los flujos que se verán afectados por la adición de sustratos a la digestión anaerobia respecto al caso sin co-digestión, son los siguientes:

#### **- Flujos de purín: Flujo 9 y Flujo 10.**

La variación en estos flujos se deberá, por un lado, a la variación de la Demanda Química de Oxígeno tanto introducida al digestor como eliminada con el biogás. Por otro lado, los caudales de estos flujos también se verán modificados, debido, igualmente, a la adición de los sustratos y a la mayor producción de biogás, por lo que tanto, los valores específicos (mg/l) de nitrógeno y de fósforo de estos flujos también se verán alterados.

- **Flujos asociados con los procesos de valorización de los fangos: Flujo 12.**

La co-digestión conlleva un aumento en la producción de biogás.

- **Flujos energéticos: Flujo 18 y 19.**

Por un lado, el incremento de la parte eléctrica del flujo 18 (autoconsumo) será debido a que ciertos sustratos, para ser añadidos a la digestión, deben de ser previamente pre-tratados, requiriendo la instalación de maquinaria específica, la cual necesita un cierto consumo eléctrico. Por otro lado, el incremento térmico de dicho flujo se deberá a una mayor demanda de calor al incrementarse los compuestos a calentar.

Al incrementarse la producción de metano, lógicamente aumentará la producción de energía eléctrica y térmica, por lo que se verá incrementado el flujo 19 en cada uno de los casos analizados.

- **Flujos de residuos añadidos en el proceso de tratamiento: Flujo 20**

Se añadirá un nuevo flujo respecto al caso sin co-digestión correspondiente a los sustratos añadidos en cada uno de los casos.

A continuación se indica el esquema de los flujos que se van a ver afectados en la co-digestión:

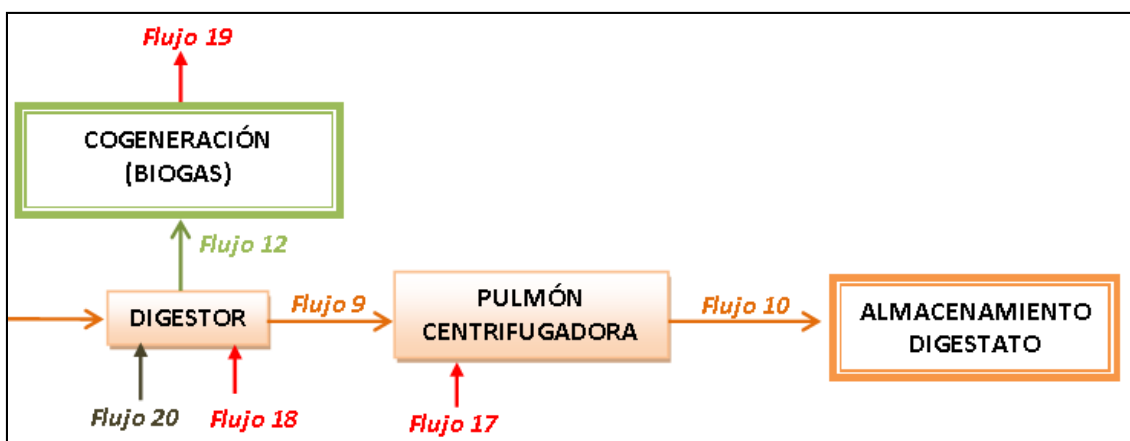


Figura 9. Esquema de los flujos que se ven afectados en caso co-digestión.

3.2.1.- Co-digestión con paja de trigo.

Tal y como se ha indicado en el Anexo II, la co-digestión de 1kg de paja por cada 100kg de purín incrementa la producción de metano en un 10% [8]. Por lo tanto, teniendo en cuenta que en la planta de Capella entran al digestor 35.020 tn de purín, en este caso se considerará una adición de 350,2tn de paja de trigo, obteniéndose, por lo tanto, 440.000m<sup>3</sup> de metano.

<b>DATOS DE PARTIDA DE LA CO-DIGESTIÓN CON PAJA DE TRIGO (1kg paja/100 kg purín - .incremento de un 10% en la producción de CH<sub>4</sub>)</b>
<b>Entrada al digestor:</b> 35.020 tn de purín 350,2 tn de paja de trigo (Flujo 22)
<b>Producción de CH<sub>4</sub>: 440.000 m<sup>3</sup> (733.333 m<sup>3</sup> de biogás)</b>
<b>Poder calorífico: 4.386.800 kWh</b>
<b>Energía eléctrica producida: 208 kW</b>
<b>Energía térmica producida: 220 kW</b>

Tabla 50. Datos relativos a la co-digestión de paja de trigo.

Teniendo en cuenta la composición elemental de la paja de trigo (45,6% de Carbono, 5,7% de hidrogeno, 40% de oxígeno, 0,7% de nitrógeno, 0,09 de azufre y 7,9% de cenizas) [27], podemos determinar la DQO de la paja sabiendo que 1kg de paja contiene 1,105kg de DQO (DQO determinada mediante la composición elemental de la paja)

<b>Flujo</b>	<b>(Tn)</b>	<b>DQO (kg/año)</b>
<b>20</b>	350,2	<b>386.971</b>

Tabla 51. Cálculo de DQO correspondiente al flujo de paja de trigo que se introduce al digestor.

De forma similar al cálculo de la DQO eliminada con el biogás realizado en el caso sin co-digestión, calcularemos la DQO del flujo 12 para este caso (2,857kg DQO/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>, ó 0,35m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminada [60]).

<b>Flujo</b>	<b>Metano (m<sup>3</sup>)</b>	<b>DQO (kg/año)</b>
<b>12</b>	440.000	<b>1.257.080</b>

Tabla 52. Demanda Química de Oxígeno eliminada en el biogás en la co-digestión con paja de trigo.

Conociendo la DQO eliminada con el biogás y la DQO que entra al digestor, por diferencia entre ellas, se podrá calcular la del flujo 9 y, por lo tanto, la del flujo 10.

DQO que entra al digestor:
<b>Flujo 6: 1.220.718 kg</b>
<b>Flujo 7: 519.454 kg</b>
<b>Flujo 8: 545.427 kg</b>
<b>Flujo 20: 386.971 kg</b>

Tabla 53. Demanda Química de Oxígeno que entra al digestor en la co-digestión con paja de trigo.

Por otro lado, teniendo en cuenta la mayor producción de biogás ( $733.333\text{m}^3$ ), el cual pesa 792tn, el peso de la paja añadida (350,2tn) y estimando que se mantiene constante la densidad de los flujos 9 y 10, los caudales de dichos flujos en este caso, serán los siguientes:

Flujo	Tn	m <sup>3</sup>
<b>9</b> <b>(Digerido)</b>	34.578 (35.020 tn purín+350,2tn paja – 792tn biogás)	35.283
<b>10</b>	3.519	5.028 (35.283m <sup>3</sup> flujo 9-30.255m <sup>3</sup> flujo 11)

Tabla 54. Caudales de los flujos 9 y 10 en la co-digestión con paja de trigo.

En definitiva, la DQO de los flujos 9 y 10 en el caso de co-digestión con paja de trigo será la mostrada a continuación:

Flujo	DQO (kg/año)	DQO (mg/l)
<b>9</b> <b>(Digerido)</b>	1.415.491	40.118
<b>10</b>	1.015.511	201.971

Tabla 55. Demanda Química de Oxígeno de los flujos 9 y 10 en la co-digestión con paja de trigo. En este caso, la reducción de la DQO en el digestor sería del 47%.

Por otro lado, teniendo en cuenta la variación en los caudales de los flujos 9 y 10, se obtendrán los siguientes valores específicos de Nitrógeno y Fósforo total:

Flujo	NKT (kg/año)	NKT (mg/l)	P (kg/año)	P (mg/l)
<b>9</b> <b>(Digerido)</b>	138.764	3.932	68.600	1.944
<b>10</b>	30.817	6.129	14.272	2.838

Tabla 56. Nitrógeno y fósforo total de los flujos 9 y 10 en la co-digestión con paja de trigo.

En cuanto a la energía eléctrica consumida por la planta para el funcionamiento de la misma, ésta se verá incrementada respecto al caso sin co-digestión, en 5kW, ya que

antes de introducir la paja al digestor se debe realizar un pre-tratamiento consistente en la trituración de la misma, por lo que se instalará en la propia planta una máquina trituradora. A continuación se indican los flujos eléctricos para este caso de co-digestión con paja de trigo, teniendo en cuenta la incorporación de la máquina trituradora y el aumento de electricidad generada respecto al caso sin co-digestión.

Flujo	kW
<b>18e</b> <b>(Autoconsumo eléctrico)</b>	62
<b>19e</b> <b>(Electricidad exportable)</b>	15 (208 -188-5)

Tabla 57. Flujos eléctricos en la co-digestión con paja de trigo.

Del mismo modo, los flujos térmicos serán los siguientes:

Flujo	kW
<b>18c</b> <b>(Autoconsumo térmico)</b>	88
<b>19c</b> <b>(Calor exportable)</b>	132

Tabla 58. Flujos térmicos en la co-digestión con paja de trigo (40% autoconsumo [5]).

### 3.2.2.- Co-digestión con glicerina.

Tal y como se ha indicado en el Anexo II, la co-digestión con un 4% de glicerina incrementa la producción de biogás en un 150% aproximadamente, [9] y [10]. Por lo tanto, teniendo en cuenta que en la planta de Capella entran al digestor 35.020tn de purín, en este caso se considerará una adición de 1.400tn de glicerina, obteniéndose, por lo tanto, 3.333.335m<sup>3</sup> de biogás.

<b>DATOS DE PARTIDA DE LA CO-DIGESTIÓN CON GLICERINA</b> <b>(4% GLICERINA - .incremento de un 150% en la producción de biogás)</b>
<b>Entrada al digestor:</b> 35.020 tn de purín 1.400 tn de glicerina (Flujo 22)
<b>Producción de CH<sub>4</sub>: 1.000.000 m<sup>3</sup> (1.666.667 m<sup>3</sup> de biogás)</b>
<b>Poder calorífico: 19.940.000 kWh</b>
<b>Energía eléctrica producida: 473 kW</b>
<b>Energía térmica producida: 500 kW</b>

Tabla 59. Datos relativos a la co-digestión de glicerina

Teniendo en cuenta que la DQO de la glicerina es de 1.360g/kg [64], la DQO del flujo 20 sería el siguiente:

Flujo	(Tn)	DQO (kg/año)
20	1.400	1.946.000

Tabla 60. DQO correspondiente al flujo de glicerina que se introduce al digestor.

De forma similar al cálculo de la DQO eliminada con el biogás realizado en el caso sin co-digestión, calcularemos la DQO del flujo 12 para este caso (2,857kg DQO/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>, ó 0,35m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminada [61]).

Flujo	Metano (m <sup>3</sup> )	DQO (kg/año)
12	1.000.000	2.857.000

Tabla 61. Demanda Química de Oxígeno eliminada en el biogás en la co-digestión con glicerina.

Por lo tanto, conociendo la DQO eliminada con el biogás y la DQO que entra al digestor, por diferencia entre ellas, se podrá calcular la del flujo 9 y, por lo tanto, la del flujo 10.

DQO que entra al digestor:
Flujo 6: 1.220.718 kg
Flujo 7: 519.454 kg
Flujo 8: 545.427 kg
Flujo 20: 1.946.000 kg

Tabla 62. Demanda Química de Oxígeno que entra al digestor en la co-digestión con glicerina.

Por otro lado, teniendo en cuenta la mayor producción de biogás (1.666.667m<sup>3</sup>), el cual pesa 1.800Tn, el peso de la glicerina añadida (1.400tn) y estimando que se mantiene constante la densidad de los flujos 9 y 10, los caudales de dichos flujos en este caso, serán los siguientes:

Flujo	Tn	m <sup>3</sup>
9 (Digerido)	34.620 (35.020 tn purín+1.400tn glic – 1.800tn biogás)	35.326
10	3.550	5.071 (35.326m <sup>3</sup> flujo 9-30.255m <sup>3</sup> flujo 11)

Tabla 63. Caudales de los flujos 9 y 10 en la co-digestión con glicerina.

En definitiva, la DQO de los flujos 9 y 10 en el caso de co-digestión con paja de trigo será la mostrada a continuación:

Flujo	DQO (mg/l)	DQO (kg/año)
<b>9</b>	40.552	<b>1.374.600</b>
<b>10</b>	192.194	<b>974.620</b>

*Tabla 64. Demanda Química de Oxígeno de los flujos 9 y 10 en la co-digestión con glicerina. En este caso, la reducción de la DQO en el digester sería del 67%.*

Por otro lado, teniendo en cuenta la variación en los caudales de los flujos 9 y 10, se obtendrán los siguientes valores específicos de nitrógeno y fósforo total:

Flujo	NKT (kg/año)	NKT (mg/l)	P (kg/año)	P (mg/l)
<b>9</b> <i>(Digerido)</i>	138.764	3.928	68.600	1.491
<b>10</b>	30.817	6.077	14.272	2.814

*Tabla 65. Nitrógeno y fósforo total de los flujos 9 y 10 en la co-digestión con glicerina.*

Teniendo en cuenta que la glicerina no necesita un pre-tratamiento específico, a continuación se indican los flujos eléctricos para este caso de co-digestión con glicerina, teniéndose en cuenta la incorporación de la máquina trituradora y el aumento de electricidad generada respecto al caso sin co-digestión.

Flujo	kW
<b>19e</b> <i>(Electricidad exportable)</i>	285 (473 -188)

*Tabla 66. Flujo eléctrico exportable en la co-digestión con glicerina.*

Del mismo modo, los flujos térmicos serán los siguientes:

Flujo	kW
<b>17c</b> <i>(Autoconsumo)</i>	200
<b>19c</b> <i>(Calor exportable)</i>	300

*Tabla 67. Flujos térmicos en la co-digestión con glicerina (40% autoconsumo [5]).*



### 3.2.3.- Co-digestión con mezcla de residuos.

Tal y como se ha indicado en el Anexo II, la co-digestión de un 66% de purín de cerdo, un 17% de residuos industriales (grasa), un 12% de residuos de matadero y 5% de residuos vegetales (paja de trigo), puede producir  $84\text{m}^3\text{CH}_4/\text{tn}$  de mezcla aproximadamente [11]. Por lo tanto, teniendo en cuenta que en la planta de Capella entran al digestor 35.020tn de purín, en este caso se considerará una adición de 9.020tn de residuos industriales, de 6.367tn de residuos de matadero y de 2.653tn de residuos vegetales, obteniéndose, por lo tanto,  $4.457.040\text{m}^3$  de  $\text{CH}_4$ .

<b>DATOS DE PARTIDA DE LA CO-DIGESTIÓN CON GLICERINA (66% purín; 17% Res. Ind.; 12% Res. Matadero; 5% Res. Veg)</b>	
<b>Entrada al digestor:</b>	
	<b>35.020 tn de purín</b>
	<b>9.020 tn de Res. Industrial</b>
	<b>6.367 tn de Res. Matadero</b>
	<b>2.653 tn de Res. Vegetales</b>
<b>Producción de <math>\text{CH}_4</math>: <math>4.457.040\text{ m}^3</math> (<math>7.428.400\text{ m}^3</math> de biogás)</b>	
<b>Poder calorífico: <math>44.436.689\text{ kWh}</math></b>	
<b>Energía eléctrica producida: <math>2.110\text{ kW}</math></b>	
<b>Energía térmica producida: <math>2.221\text{ kW}</math></b>	

Tabla 68. Datos relativos a la co-digestión de mezcla de residuos industriales, de matadero y de vegetales.

En cuanto a los parámetros relevantes de cada uno de los sustratos añadidos para poder determinar posteriormente su exergía, a continuación se indican las consideraciones oportunas:

- En cuanto a los *residuos industriales*, se consideran que todos ellos son grasas. Por lo tanto, teniendo en cuenta la composición de las grasas, podemos determinar la DQO de las mismas ( $3\text{kg DQO/kg}$  grasa), no obstante dicho valor corresponde con grasas sólida por lo que se estimará un 80% de dicho valor al desconocerse el tipo y estado de las grasas utilizadas.

<b>Flujo</b>	<b>(Tn)</b>	<b>DQO (kg/año)</b>
<b>20_grasas</b>	<b>9.020</b>	<b>21.648.000</b>

Tabla 69. DQO correspondiente al flujo de grasa que se introduce al digestor.

- En cuanto a los *residuos matadero*, la composición de los efluentes de matadero porcino es la siguientes [31]:

FLUJO 20_matadero	Ud.	VALORES
DQO	mg/l	2.500
DBO	mg/l	1.250
Materia en Suspensión	mg/l	700
Nitrógeno Total	mg/l	150
Fósforo Total	mg/l	25

Tabla 70. Caracterización de los efluentes porcinos de matadero.

Flujo	(Tn)	DQO (kg/año)
20_matadero	6.367	15.917

Tabla 71. DQO correspondiente al flujo de residuos de matadero que se introduce al digestor.

- Finalmente, en cuanto a los *residuos vegetales*, se consideran que todos ellos son paja de trigo. Por lo tanto, teniendo en cuenta la composición de la paja, podemos determinar la DQO de las misma igual que en el caso de la co-digestión con paja de trigo (1,105kg DQO/kg paja).

Flujo	(Tn)	DQO (kg/año)
20_paja	2.653	2.931.565

Tabla 72. DQO correspondiente al flujo de paja de trigo que se introduce al digestor.

De forma similar al cálculo de la DQO eliminada con el biogás realizado en el caso sin co-digestión, calcularemos la DQO del flujo 12 para este caso (2,857kg DQO/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>, ó 0,35m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg DQO eliminada [60]).

Flujo	Metano (m <sup>3</sup> )	DQO (kg/año)
12	4.457.040	12.733.763

Tabla 73. Demanda Química de Oxígeno eliminada en el biogás en la co-digestión con mezcla de residuos.

Por lo tanto, conociendo la DQO eliminada con el biogás y la DQO que entra al digestor, por diferencia entre ellas, se podrá calcular la del flujo 9 y, por lo tanto, la del flujo 10.

DQO que entra al digestor:
Flujo 6: 1.220.718 kg
Flujo 7: 519.454 kg
Flujo 8: 545.427 kg
Flujo 20_grasas: 21.648.000 kg
Flujo 20_matadero: 15.917 kg
Flujo 20_paja: 2.931.565 kg

Tabla 74. Demanda Química de Oxígeno que entra al digestor en la co-digestión con mezcla de residuos.

Teniendo en cuenta la mayor producción de biogás ( $7.428.400\text{m}^3$ ), el cual pesa  $8.022\text{tn}$ , el peso de la mezcla añadida ( $18.040\text{tn}$ ) y estimando que se mantiene constante la densidad de los flujos 9 y 10, los caudales de dichos flujos en este caso, serán los siguientes:

Flujo	Tn	$\text{m}^3$
<b>9</b> (Digerido)	45.038 (35.020 tn purín+18.040 tn mezcla – 8.022tn biogás)	45.957
<b>10</b>	10.991	15.702 (45.957 $\text{m}^3$ flujo 9-30.255 $\text{m}^3$ flujo 11)

Tabla 75. Caudales de los flujos 9 y 10 en la co-digestión con mezcla de residuos.

En definitiva, la DQO de los flujos 9 y 10 en el caso de co-digestión con paja de trigo será la mostrada a continuación:

Flujo	DQO (mg/l)	DQO (kg/año)
<b>9</b>	307.838	<b>14.147.319</b>
<b>10</b>	875.515	<b>13.747.339</b>

Tabla 76. Química de Oxígeno de los flujos 9 y 10 en la co-digestión con mezcla de residuos. En este caso, la reducción de la DQO en el digestor sería del 47%.

Por otro lado, teniendo en cuenta la variación en los caudales de los flujos 9 y 10, se obtendrán los siguientes valores específicos de nitrógeno y fósforo total:

Flujo	NKT (kg/año)	NKT (mg/l)	P (kg/año)	P (mg/l)
<b>9</b> (Digerido)	138.764	3.019	68.600	1.492
<b>10</b>	30.817	1.962	14.272	909

Tabla 77. Nitrógeno y fósforo total de los flujos 9 y 10 en la co-digestión con mezcla de residuos.

A continuación se indican los flujos eléctricos para este caso de co-digestión con la mezcla de residuos industriales, de matadero y de vegetales, teniendo en cuenta tanto la incorporación de una máquina trituradora de paja (45kW) como de un higienizador (0,25kW), así como el aumento de la electricidad generada respecto al caso sin co-digestión.

Flujo	kW
<b>18e</b> <b>(Autoconsumo eléctrico)</b>	102,25
<b>19e</b> <b>(Electricidad exportable)</b>	1876,75 (2110 - 188 - 45 - 0,25)

Tabla 78. Flujos eléctricos en la co-digestión con mezcla de residuos.

Del mismo modo, los flujos térmicos serán los siguientes:

Flujo	kW
<b>18c</b> <b>(Autoconsumo térmico)</b>	1110,5
<b>19c</b> <b>(Calor exportable)</b>	1110,5

Tabla 79. Flujos térmicos en la co-digestión con mezcla de residuos. Al incorporar el higienizador, el autoconsumo térmico de la planta aumentará al 50% (dato facilitado por Sodemasa).

### **3.3.- Resumen de resultados.**

A continuación se muestran, a modo de resumen, los parámetros más importantes de cada uno de los flujos que forman parte de la planta de Capella (Huesca) para los cuatro casos analizados, es decir, Caso base (sin co-digestión), con co-digestión de paja de trigo, de glicerina y de mezcla de diversos residuos.

- **CASO I. Tratamiento de purines sin Co-Digestión.**

FLUJOS DE PURÍN										
Flujo	$m$ (kg/s)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	DQO (mg/l)	NKT (mg/l)	P (mg/l)	$b_{MI}$ (kJ/kg)	$b_{MO}$ (kJ/kg)	$b_{NKT}$ (kJ/kg)	$b_P$ (kJ/kg)	B (KW)
1	2,121	1018	50000	7000	1500	2,5	667,8	123	1,814	1687
2	1,928	993,2	43903	5207	809	2,5	601,1	93,81	1,003	1347
3	1,39	993,3	30611	4900	735	2,5	419,1	88,28	0,9112	710,1
4	2,45	1000	10511	1421	471	2,5	142,9	25,43	0,58	420,1
5	1,929	1000	4000	1400	450	2,5	54,4	25,05	0,5541	159,2
6	0,538	993,3	78251	6000	1000	2,5	1071	108,1	1,24	636,6
7	0,5228	1004	34630	1500	550	2,5	469,2	26,74	0,6747	260,9
8	0,1552	1092	133326	31505	10938	2,5	1660	516,1	12,33	339,9
9	1,191	988,7	32942	4000	1978	2,5	453,1	72,39	2,463	631,8
10	0,1078	700	167452	6947	3217	2,5	3254	177,6	5,659	370,8
11	1,051	1000	13220	3567	1795	2,5	179,8	63,83	2,21	260,9

Tabla 80. Propiedades de los distintos flujos de purín para el caso sin co-digestión.

FLUJO DE BIOGÁS				
Flujo	$m$ (m <sup>3</sup> /s)	$B_{Física}$ (kW)	$B_{Química}$ (kW)	B (KW)
12	0,02315	1,34	583,3	584,6

Tabla 81. Propiedades del flujo de valorización de fangos para el caso sin co-digestión.

FLUJOS ENERGÉTICOS					
Flujo	E (kWe)	E (kWc)	B (kWe)	B (kWc)	B (KW)
13	0,18	-	0,18	-	0,18
14	0,25	-	0,25	-	0,25
15	110,8	-	110,8	-	110,8
16	0,25	-	0,25	-	0,25
17	19,5	-	19,5	-	19,5
18	57	80	57	13,37	70,37
19	1	120	1	20,06	21,06

Tabla 82. Propiedades de los flujos energéticos para el caso sin co-digestión.

- **CASO II. Tratamiento de purines con Co-Digestión con paja de trigo.**

FLUJOS DE PURÍN										
Flujo	$m$ (kg/s)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	DQO (mg/l)	NKT (mg/l)	P (mg/l)	$b_{MI}$ (kJ/kg)	$b_{MO}$ (kJ/kg)	$b_{NKT}$ (kJ/kg)	$b_P$ (kJ/kg)	B (KW)
1	2,121	1018	50000	7000	1500	2,5	667,8	123	1,814	1687
2	1,928	993,2	43903	5207	809	2,5	601,1	93,81	1,003	1347
3	1,39	993,3	30611	4900	735	2,5	419,1	88,28	0,9112	710,1
4	2,45	1000	10511	1421	471	2,5	142,9	25,43	0,58	420,1
5	1,929	1000	4000	1400	450	2,5	54,4	25,05	0,5541	159,2
6	0,538	993,3	78251	6000	1000	2,5	1071	108,1	1,24	636,6
7	0,5228	1004	34630	1500	550	2,5	469,2	26,74	0,6747	260,9
8	0,1552	1092	133326	31505	10938	2,5	1660	516,1	12,33	339,9
9	1,201	980	40118	3932	1944	2,5	556,7	71,8	2,443	760,6
10	0,1222	699,9	201971	6129	2838	2,5	3925	156,7	4,993	499,6
11	1,051	1000	13220	3567	1795	2,5	179,8	63,83	2,21	260,9

Tabla 83. Propiedades de los distintos flujos de purín para el caso de co-digestión con paja de trigo.

FLUJO DE BIOGÁS				
Flujo	$m$ (m <sup>3</sup> /s)	$B_{Física}$ (kW)	$B_{Química}$ (kW)	B (KW)
12	0,02546	1,474	641,6	643,1

Tabla 84. Propiedades del flujo de valorización de fangos para el caso de co-digestión con paja de trigo.

FLUJOS ENERGÉTICOS					
Flujo	E (kWe)	E (kWc)	B (kWe)	B (kWc)	B (KW)
13	0,18	-	0,18	-	0,18
14	0,25	-	0,25	-	0,25
15	110,8	-	110,8	-	110,8
16	0,25	-	0,25	-	0,25
17	19,5	-	19,5	-	19,5
18	62	88	62	14,71	76,71
19	15	132	15	22,06	37,06

Tabla 85. Propiedades de los flujos energéticos para el caso de co-digestión con paja de trigo.

FLUJO DE SUSTRATO				
Flujo	$m$ (kg/s)	$\varphi$	$b_{ch}^0$ (kJ/kg)	B (KW)
20	0,01216	1,128	16.325	198,5

Tabla 86. Propiedades del flujo de sustrato para el caso de co-digestión con paja de trigo.

- **CASO III. Tratamiento de purines con Co-Digestión con glicerina.**

FLUJOS DE PURÍN										
Flujo	$m$ (kg/s)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	DQO (mg/l)	NKT (mg/l)	P (mg/l)	$b_{MI}$ (kJ/kg)	$b_{MO}$ (kJ/kg)	$b_{NKT}$ (kJ/kg)	$b_P$ (kJ/kg)	B (KW)
1	2,121	1018	50000	7000	1500	2,5	667,8	123	1,814	1687
2	1,928	993,2	43903	5207	809	2,5	601,1	93,81	1,003	1347
3	1,39	993,3	30611	4900	735	2,5	419,1	88,28	0,9112	710,1
4	2,45	1000	10511	1421	471	2,5	142,9	25,43	0,58	420,1
5	1,929	1000	4000	1400	450	2,5	54,4	25,05	0,5541	159,2
6	0,538	993,3	78251	6000	1000	2,5	1071	108,1	1,24	636,6
7	0,5228	1004	34630	1500	550	2,5	469,2	26,74	0,6747	260,9
8	0,1552	1092	133326	31505	10938	2,5	1660	516,1	12,33	339,9
9	1,193	972,7	38911	3928	1941	2,5	544	72,26	2,457	741,2
10	0,1233	700,1	192194	6077	2814	2,5	3734	155,3	4,95	480,3
11	1,051	1000	13220	3567	1795	2,5	179,8	63,83	2,21	260,9

Tabla 87. Propiedades de los distintos flujos de purín para el caso de co-digestión con glicerina.

FLUJO DE BIOGÁS				
Flujo	$m$ (m <sup>3</sup> /s)	$B_{Física}$ (kW)	$B_{Química}$ (kW)	B (KW)
12	0,05787	3,351	1458	1462

Tabla 88. Propiedades del flujo de valorización de fangos para el caso de co-digestión con glicerina.

FLUJOS ENERGÉTICOS					
Flujo	E (kWe)	E (kWc)	B (kWe)	B (kWc)	B (KW)
13	0,18	-	0,18	-	0,18
14	0,25	-	0,25	-	0,25
15	110,8	-	110,8	-	110,8
16	0,25	-	0,25	-	0,25
17	19,5	-	19,5	-	19,5
18	57	200	57	33,43	90,43
19	285	300	285	50,14	335,1

Tabla 89. Propiedades de los flujos energéticos para el caso de co-digestión con glicerina.

FLUJO DE SUSTRATO			
Flujo	$m$ (kg/s)	$b_{ch}^0$ (kJ/kg)	B (KW)
20	0,04861	22300	1084

Tabla 90. Propiedades del flujo de sustrato para el caso de co-digestión con glicerina.

- **CASO IV. Tratamiento de purines con Co-Digestión con mezcla de residuos industriales, de matadero y de vegetales.**

FLUJOS DE PURÍN										
Flujo	$m$ (kg/s)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	DQO (mg/l)	NKT (mg/l)	P (mg/l)	$b_{MI}$ (kJ/kg)	$b_{MO}$ (kJ/kg)	$b_{NKT}$ (kJ/kg)	$b_P$ (kJ/kg)	B (KW)
1	2,121	1018	50000	7000	1500	2,5	667,8	123	1,814	1687
2	1,928	993,2	43903	5207	809	2,5	601,1	93,81	1,003	1347
3	1,39	993,3	30611	4900	735	2,5	419,1	88,28	0,9112	710,1
4	2,45	1000	10511	1421	471	2,5	142,9	25,43	0,58	420,1
5	1,929	1000	4000	1400	450	2,5	54,4	25,05	0,5541	159,2
6	0,538	993,3	78251	6000	1000	2,5	1071	108,1	1,24	636,6
7	0,5228	1004	34630	1500	550	2,5	469,2	26,74	0,6747	260,9
8	0,1552	1092	133326	31505	10938	2,5	1660	516,1	12,33	339,9
9	1,564	980	307838	3019	1492	2,5	4272	55,13	1,875	6774
10	0,3816	700	875515	1962	909	2,5	17011	50,16	1,599	6513
11	1,051	1000	13220	3567	1795	2,5	179,8	63,83	2,21	260,9

Tabla 91. Propiedades de los distintos flujos de purín para el caso de co-digestión con mezcla de residuos.

FLUJO DE BIOGÁS				
Flujo	$m$ (m <sup>3</sup> /s)	$B_{Física}$ (kW)	$B_{Química}$ (kW)	B (KW)
12	0,2579	14,93	6499	6514

Tabla 92. Propiedades del flujo de valorización de fangos para el caso de co-digestión con mezcla de residuos.

FLUJOS ENERGÉTICOS					
Flujo	E (kW <sub>ve</sub> )	E (kW <sub>c</sub> )	B (kW <sub>ve</sub> )	B (kW <sub>c</sub> )	B (KW)
13	0,18	-	0,18	-	0,18
14	0,25	-	0,25	-	0,25
15	110,8	-	110,8	-	110,8
16	0,25	-	0,25	-	0,25
17	19,5	-	19,5	-	19,5
18	102,25	1110,5	102,25	185,6	287,8
19	1877	1110,5	1877	185,6	2063

Tabla 93. Propiedades de los flujos energéticos para el caso de co-digestión con mezcla de residuos.

FLUJO DE SUSTRATO				
Flujo	$m$ (kg/s)	$\varphi$	$b_{ch}^0$ (kJ/kg)	B (KW)
20_grasas	0,3132	1,216	47278	14807
20_paja de trigo	0,09212	1,128	16325	1504

Tabla 94. Propiedades del flujo de sustrato.

FLUJO DE SUSTRATO									
Flujo	$m$ (kg/s)	DQO (mg/l)	NKT (mg/l)	P (mg/l)	$b_{MI}$ (kJ/kg)	$b_{MO}$ (kJ/kg)	$b_{NKT}$ (kJ/kg)	$b_P$ (kJ/kg)	B (KW)
20_matadero	0,2211	2500	150	25	2,5	34,1	2,692	0,03087	37,38

Tabla 95. Propiedades del flujo de sustrato para co-digestión para el caso de co-digestión con mezcla de residuos.



## ANEXO IV. ANÁLISIS TERMOECONOMICO.

### **4.1.- Introducción.**

En primer lugar, antes de profundizar en el análisis termoeconómico se van a definir los siguientes conceptos básicos [36]:

- *Producto (P)*. El producto de un proceso es el flujo o flujos de interés para el cual tiene lugar dicho proceso, es decir, es el objetivo para el cual se diseña y opera el equipo o sistema.
- *Fuel (F)*. Se denomina Fuel a todo recurso empleado en generar la utilidad deseada.
- *Residuo (R)*. Se denominan residuos aquellos flujos que no tienen ninguna utilidad, pero que su existencia produciría perjuicios en la instalación o en el entorno, y por lo tanto es necesario un consumo adicional de recursos energéticos y económicos, para que dichos flujos sean eliminados y/o convertidos en flujos de pérdidas. Este coste puede formarse en el propio equipo en el que se produce el flujo, pero también a lo largo de una cadena de flujos y equipos del proceso de producción que generan el residuo.

### **4.2.- Análisis de la formación de costes.**

En el presente apartado se va a tratar de detallar el análisis de la formación de los costes, revisándose tanto los principales aspectos termoeconómicos como los métodos para estudiar la descomposición de los mismos [38].

#### **4.2.1.- Revisión de los principales aspectos termoeconómicos.**

La Termoeconomía es una metodología para el análisis de los sistemas energéticos basada en la Teoría del Coste Exergético y en una formulación mediante operadores matriciales [65]. El método propone dos posibles representaciones del sistema de estudio: del Fuel o recurso al Producto (FP) o del Producto al Fuel o recurso (PF), si bien en el presente apartado solo se explicará la primera representación.

El sistema se describe mediante una estructura productiva, la cual está construida de acuerdo al objetivo o propósito de cada uno de los procesos. Esta estructura tiene que estar compuesta por  $n$  procesos (mas el proceso 0, el cual es el ambiente), conectados por flujos caracterizados por su exergía. Un flujo que va desde el proceso  $i$  al proceso  $j$  es representado por  $B_{ij}$ . Cada proceso consume recursos de otros

procesos o del ambiente (fuel, F), para producir productos útiles para otros componentes o para el ambiente (producto, P). Por lo tanto:

$$F_i = \sum_{j=0}^n B_{ji} \quad (Ec. 27)$$

$$P_i = \sum_{j=0}^n B_{ji} \quad (Ec. 28)$$

El coste exergético de un flujo  $B_{ij}$  (indicado por  $B_{ij}^*$ ) es la cantidad de recursos de exergía necesaria para producirlo. El coste exergético unitario es un flujo es el cociente entre su coste exergético y su exergía.

$$k_{ij}^* = \frac{B_{ij}^*}{B_{ij}} \quad (Ec. 29)$$

Además, el coste del fuel y del producto de cada proceso es representado como  $F^*$  y  $P^*$ , respectivamente. La representación FP está basada en la distribución de los coeficientes  $y_{ij}$ , los cuales indican la proporción de la producción del componente  $j$  usado como recurso para el componente  $i$ .

$$y_{ij} = \frac{B_{ji}}{P_j} \quad (Ec. 30)$$

El fuel de un proceso o bien del ambiente (componente 0) o de otro proceso. Además, si se considera la ecuación 27, se obtiene:

$$F_i = B_{0i} + \sum_{j=1}^n B_{ji} = B_{0i} + \sum_{j=1}^n y_{ij} P_j \quad (Ec. 31)$$

En notación matricial, la ecuación 31 se convierte en:

$$F = F_e + \langle FP \rangle P \quad (Ec. 32)$$

Donde la matriz FP contiene a los elementos  $y_{ij}$ . El coste de un fuel es la suma de los costes de sus procesos procedentes tanto del ambiente como de otros procesos. Además, todos los flujos que forman parte del producto de un proceso tienen el mismo coste unitario. Cabe señalar que el coste de los flujos que provienen del ambiente es igual a su exergía.

$$F_i^* = B + \sum_{j=1}^n B_{ji}^* B_{ji} = B_{0i}^* + \sum_{j=1}^n y_{ij} P_j^* \quad (Ec. 33)$$

$$F^* = F_e + \langle FP \rangle P^* \quad (Ec. 34)$$

Además de los procesos que tienen un propósito productivo, hay otros componentes cuyo objetivo es disponer adecuadamente los residuos (componentes disipativos) [37]. Por lo tanto, dado que su producto no es un flujo útil, su coste tiene que ser cargado a los componentes responsables de dicho residuo. Esta distribución de los residuos se hace mediante los coeficientes  $\Psi$ :

$$\Psi_{jr} = \frac{R_{rj}^*}{R_{r0}^*} \quad (Ec. 35)$$

Donde  $R_{r0}^*$  es el coste correspondiente al componente disipativo r, y  $R_{rj}^*$  es la parte del coste cargado al componente j. Por consiguiente, un vector  $R^*$  puede ser calculado en aquellos componentes en los que haya carga del coste de los residuos.

$$R^* = \langle RP \rangle P^* \quad (Ec. 36)$$

Donde la matriz RP contiene a los elementos  $\Psi$ .

Finalmente, el coste de los productos de cada componente debe de incluir el coste de su fuel y el coste de los residuos cargado al mismo.

$$P^* = F^* + R^* \quad (Ec. 37)$$

#### 4.2.2.- Descomposición de costes en base a la irreversibilidad y al efecto de los residuos.

En [39], se desarrollo una descomposición de los costes considerando la irreversibilidad de los diferentes componentes y el efecto de los residuos.

Si la ecuación 32 es sustituida en la ecuación 37, se puede ver como el coste de los productos está formado por dos efectos: el proceso productivo y el efecto de los residuos.

$$P^* = (U_D - \langle FP \rangle)^{-1} F_e + (U_D - \langle FP \rangle)^{-1} R^* \quad (Ec. 38)$$

Además, en cada componente productivo, el fuel es igual al producto más la irreversibilidad:

$$F = P + I \quad (Ec. 39)$$

La ecuación 39 es sustituida en la ecuación 32 obteniendo:

$$P + I = F_e + \langle FP \rangle P \quad (Ec. 40)$$

Después de alguna transformación, la ecuación 40 se convierte en:

$$P + (U_D - \langle FP \rangle)^{-1} I = (U_D - \langle FP \rangle)^{-1} F_e \quad (Ec. 41)$$

Finalmente, la descomposición es obtenida sustituyendo la ecuación 41 en la ecuación 38.

$$P^* = P + (U_D - \langle FP \rangle)^{-1} I + (U_D - \langle FP \rangle)^{-1} R^* \quad (Ec. 42)$$

La ecuación 42 indica que el coste de los productos es igual a su exergía más la irreversibilidad que aparece en los diferentes componentes y el efecto de los residuos. En un proceso ideal, sin irreversibilidad y sin residuos, el coste de todos los productos debería ser igual a su exergía. Sin embargo, dado que los procesos son reales, el coste de los productos se incrementa.

#### 4.2.3.- Descomposición de costes en base al origen de los recursos.

En un estudio llevado a cabo por Usón, S. y col [38], se propuso un nuevo enfoque a cerca de la descomposición de los costes. Este nuevo enfoque es muy interesante en la Simbiosis Industrial, debido a las diferentes fuentes de energía y materiales que son procesadas.

Si sustituimos en la ecuación 37 las ecuaciones 34 y 36, obtenemos:

$$\mathbf{P}^* = \mathbf{F}_e + \langle \mathbf{FP} \rangle \mathbf{P}^* + \langle \mathbf{RP} \rangle \mathbf{P}^* \quad (\text{Ec. 43})$$

Lo cual es equivalente a:

$$\mathbf{P}^* = (\mathbf{U}_D - \langle \mathbf{FP} \rangle - \langle \mathbf{RP} \rangle)^{-1} \mathbf{F}_e \quad (\text{Ec. 44})$$

Las ecuaciones previas muestran el coste de todos los productos de la planta en relación al fuel que entra en la misma.

El fuel que entra a la planta puede ser descompuesto en la suma de diferentes términos,  $n_f$ , cada uno correspondiente a diferentes clases de energía (por ejemplo, carbón, biomasa, gas natural,...) o recursos materiales (por ejemplo, piedra caliza).

$$\mathbf{F}_e = \sum_{k=1}^{n_f} {}^k \mathbf{F}_e \quad (\text{Ec. 45})$$

Finalmente, la descomposición de los costes de todos los productos de una planta en una suma de los términos correspondientes a los diferentes fueles se puede obtener mediante la combinación de las ecuaciones 44 y 45.

$$\mathbf{P}^* = \sum_{k=1}^{n_f} \mathbf{P}^* \quad (\text{Ec. 46})$$

Dónde:

$${}^k \mathbf{P}^* = (\mathbf{U}_D - \langle \mathbf{FP} \rangle - \langle \mathbf{RP} \rangle)^{-1} {}^k \mathbf{F}_e \quad (\text{Ec. 47})$$

#### **4.3.- Resultados relativos a los costes exergéticos unitarios de los productos.**

A continuación se van a mostrar las tablas F-P, así como el cálculo de las matrices necesarias para obtener los resultados de la descomposición de los costes exergéticos unitarios para cada uno de los cuatro casos analizados.

## - CASO I. Tratamiento de purines sin Co-Digestión.

TABLA F-P: CASO BASE												
PROCESOS (kw)		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F0	PRODUCTO
Ambiente	P0	340	636,9	710,1	0	0	0	0	0	0	0	1687
Desbaste	P1	0	0	71,666	0	166,35	101,88	0	0	0	0	339,9
Dec. 1ª	P2	0	0	134,22	0	311,56	190,81	0	0	0	0	636,6
Trat. Biol.	P3	0	0	0	265,71	0	0	0	0	105	49,39	420,1
Dec. 2ª	P4	0	0	55,009	0	127,68	78,202	0	0	0	0	260,9
Digestión	P5	0	0	0	0	0	0	584,6	0	0	0	584,6
Pulmón/ Centrifuga	P6	0	0	0	0	0	0	0	350,8	0	19,76	370,56
Cogen.	P7	0,18	0,25	110,8	0,25	70,37	19,5	0	0	0	21,06	222,41
D. Digerido	P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	350,8	350,8
D. Balsa	P9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	105	105
FUEL	F	340,18	637,15	1081,8	265,96	675,97	390,4	584,6	350,8	105	546,01	

Tabla 96. Tabla F-P para el caso base, es decir, sin ningún tipo de co-digestión (kW).

⟨FP⟩	P1	P2	P3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
F1	0	0	0	0	0	0	0,00080	0	0
F2	0	0	0	0	0	0	0,00112	0	0
F3	0,21084	0,21084	0	0,21084	0	0	0,49817	0	0
F4	0	0	0,63249	0	0	0	0,00112	0	0
F5	0,48941	0,48941	0	0,48941	0	0	0,31639	0	0
F6	0,29974	0,29974	0	0,29974	0	0	0,08767	0	0
F7	0	0	0	0	1	0	0	0	0
F8	0	0	0	0	0	0,94667	0	0	0
F9	0	0	0,24994	0	0	0	0	0	0

Tabla 97. Matriz FP para el caso base, es decir, sin ningún tipo de co-digestión (kW).

⟨RP⟩	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,18957
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,35511
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0,30716
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14815
5	0	0	0	0	0	0	0	0,6986	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0,3013	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 98. Matriz RP para el caso base, es decir, sin ningún tipo de co-digestión.

$\langle P^* \rangle$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	650,305	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1215,09	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	6414,91	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	4303,74	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	7851,78	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	3550,52	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	7851,78	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	3361,1	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1603,34

Tabla 99. Matriz  $P^*$  para el caso base, es decir, sin ningún tipo de co-digestión (kW).

FE	P0
F1	340
F2	636,9
P3	710,1
F4	0
F5	0
F6	0
F7	0
F8	0
F9	0

Tabla 100. Vector FE para el caso base (kW).

$\langle I \rangle$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I1	0,28	0	0	0	0	0	0	0	0
I2	0	0,55	0	0	0	0	0	0	0
I3	0	0	661,7	0	0	0	0	0	0
I4	0	0	0	5,06	0	0	0	0	0
I5	0	0	0	0	91,37	0	0	0	0
I6	0	0	0	0	0	19,84	0	0	0
I7	0	0	0	0	0	0	362,19	0	0
I8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 101. Matriz I para el caso base, es decir, sin ningún tipo de co-digestión (kW).

$\langle R^* \rangle$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	303,950
2	0	0	0	0	0	0	0	0	569,370
3	0	0	0	0	0	0	0	0	492,489
4	0	0	0	0	0	0	0	0	237,537
5	0	0	0	0	0	0	0	2348,2	0
6	0	0	0	0	0	0	0	1012,9	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 102. Matriz  $R^*$  para el caso base, es decir, sin ningún tipo de co-digestión (kW).

	Desbaste	Dec. 1ª	Trat. Biol.	Dec. 2ª	Digestión	Pulmón/ Centrif.	Cogen.	8	9	R8	R9	TOTAL
<b>1.Desb.</b>	0,00082	1,4E-06	0,00111	1,3E-05	0,00043	0	0,00171	0	0	0,01109	0,89803	<b>1,91322</b>
<b>2. Dec. 1ª</b>	5,5E-07	0,00086	0,00082	1,0E-05	0,00032	0	0,00126	0	0	0,00822	0,89720	<b>1,90872</b>
<b>3.Trat. Biol.</b>	0,00059	0,00116	2,46006	0,01069	0,24841	0	0,98472	0	0	6,38441	4,17989	<b>15,2699</b>
<b>4.Dec. 2ª</b>	0,00060	0,00118	2,50743	0,03031	0,25377	0	1,00598	0	0	6,52219	5,17427	<b>16,4957</b>
<b>5.Digestor</b>	0,00053	0,00105	0,80226	0,00969	0,31014	0	0,60987	0	0	7,97091	2,72653	<b>13,4310</b>
<b>6.Pulmón/ Cent.</b>	0,00042	0,00084	0,64086	0,00774	0,09674	0,05354	0,38347	0	0	5,21985	2,17801	<b>9,58151</b>
<b>7.Cogen.</b>	0,00141	0,00277	2,10874	0,02549	0,81522	0	3,23152	0	0	20,9513	7,16663	<b>35,3031</b>
<b>8.Dig.</b>	0,00042	0,00084	0,64086	0,00774	0,09674	0,05354	0,38347	0	0	5,21985	2,17801	<b>9,58151</b>
<b>9.Balsa</b>	0,00059	0,00116	2,46006	0,01069	0,24841	0	0,98472	0	0	6,38441	4,17989	<b>15,2699</b>

Tabla 103. Descomposición de los costes exergéticos unitarios de los productos para cada uno de los procesos de la planta de tratamiento de purines de Capella, en el caso en el que no se produzca co-digestión alguna.



## - CASO II. Tratamiento de purines con Co-Digestión de paja de trigo.

TABLA F-P: CO-DIGESTIÓN CON PAJA DE TRIGO												
PROCESOS (kw)		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F0	PRODUCTO
Ambiente	P0	340	636,9	746,16	0	93,3540	69,078	0	0	0	0	1885,5
Desbaste	P1	0	0	61,759	0	159,854	118,28	0	0	0	0	339,9
Dec. 1ª	P2	0	0	115,66	0	299,391	221,53	0	0	0	0	636,6
Trat. Biol.	P3	0	0	0	265,71	0	0	0	0	105	49,39	420,1
Dec. 2ª	P4	0	0	47,404	0	122,700	90,794	0	0	0	0	260,9
Digestión	P5	0	0	0	0	0	0	643,1	0	0	0	643,1
Pulmón/ Centrifuga	P6	0	0	0	0	0	0	0	479,5	0	19,76	499,26
Cogen.	P7	0,18	0,25	110,8	0,25	76,71	19,5	0	0	0	37,06	244,75
D. Digerido	P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	479,5	479,5
D. Balsa	P9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	105	105
FUEL	F	340,18	637,15	1081,8	265,96	752,01	519,2	643,1	479,5	105	690,71	

Tabla 104. Tabla F-P para el caso de co-digestión con paja de trigo.

⟨FP⟩	P1	P2	P3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
F1	0	0	0	0	0	0	0,00073	0	0
F2	0	0	0	0	0	0	0,00102	0	0
F3	0,18169	0,18169	0	0,18169	0	0	0,45270	0	0
F4	0	0	0,63249	0	0	0	0,00102	0	0
F5	0,47029	0,47029	0	0,47029	0	0	0,31342	0	0
F6	0,34800	0,34800	0	0,34800	0	0	0,07967	0	0
F7	0	0	0	0	1	0	0	0	0
F8	0	0	0	0	0	0,96042	0	0	0
F9	0	0	0,24994	0	0	0	0	0	0

Tabla 105. Matriz FP para el caso de co-digestión con paja de trigo (kW).

⟨RP⟩	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,18957
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,35511
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0,30716
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14815
5	0	0	0	0	0	0	0	0,7209	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0,2790	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 106. Matriz RP para el caso de co-digestión con paja de trigo.

$\langle P^* \rangle$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	603,87	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1128,59	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	5455,65	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	3660,14	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	7313,37	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	3454,00	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	7313,37	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	3317,2	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1363,58

Tabla 107. Matriz  $P^*$  para el caso de co-digestión con paja de trigo (kW).

FE	P0
F1	340
F2	636,9
P3	746,1
F4	0
F5	93,3
F6	69,0
F7	0
F8	0
F9	0

Tabla 108. Vector FE para el caso de co-digestión con paja de trigo (kW).

$\langle I \rangle$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I1	0,28	0	0	0	0	0	0	0	0
I2	0	0,55	0	0	0	0	0	0	0
I3	0	0	661,7	0	0	0	0	0	0
I4	0	0	0	5,06	0	0	0	0	0
I5	0	0	0	0	108,91	0	0	0	0
I6	0	0	0	0	0	19,94	0	0	0
I7	0	0	0	0	0	0	398,35	0	0
I8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 109. Matriz I para el caso de co-digestión con paja de trigo (kW).

$\langle R^* \rangle$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	258,498
2	0	0	0	0	0	0	0	0	484,228
3	0	0	0	0	0	0	0	0	418,843
4	0	0	0	0	0	0	0	0	202,016
5	0	0	0	0	0	0	0	2391,7	0
6	0	0	0	0	0	0	0	925,58	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 110. Matriz  $R^*$  para el caso de co-digestión con paja de trigo (kW).

	Desbaste	Dec. 1ª	Trat. Biol.	Dec. 2ª	Digestión	Pulmón/ Centrif.	Cogen.	8	9	R8	R9	TOTAL
<b>1.Desb.</b>	0,00082	1,1E-06	0,00090	1,0E-05	0,000442	0	0,00161	0	0	0,00970	0,76312	<b>1,77663</b>
<b>2. Dec. 1ª</b>	4,4E-07	0,00086	0,00066	8,0E-06	0,000327	0	0,00119	0	0	0,00720	0,76258	<b>1,77285</b>
<b>3.Trat. Biol.</b>	0,00047	0,00093	2,28822	0,0086	0,249083	0	0,91104	0	0	5,46997	3,05818	<b>12,9865</b>
<b>4.Dec. 2ª</b>	0,00048	0,00095	2,33204	0,0281	0,254475	0	0,93077	0	0	5,58839	3,89359	<b>14,0289</b>
<b>5.Digestor</b>	0,00043	0,00085	0,64884	0,00784	0,317759	0	0,54281	0	0	6,97814	1,87536	<b>11,3720</b>
<b>6.Pulmón/ Cent.</b>	0,00032	0,00064	0,49120	0,00593	0,079139	0,03993	0,28946	0	0	3,59185	1,41973	<b>6,91824</b>
<b>7.Cogen.</b>	0,00114	0,00224	1,70488	0,02061	0,8349389	0	3,05387	0	0	18,3356	4,92766	<b>29,8809</b>
<b>8.Dig.</b>	0,00032	0,00064	0,49120	0,00593	0,0791395	0,03993	0,28946	0	0	3,59185	1,41973	<b>6,91824</b>
<b>9.Balsa</b>	0,00047	0,00093	2,28822	0,00862	0,2490832	0	0,91104	0	0	5,46997	3,05818	<b>12,9865</b>

Tabla 111. Descomposición de los costes exergéticos unitarios de los productos para cada uno de los procesos de la planta de tratamiento de purines de Capella, en el caso de co-digestión con paja de trigo.

## - CASO III. Tratamiento de purines con Co-Digestión de glicerina.

TABLA F-P: CO-DIGESTIÓN CON GLICERINA												
PROCESOS (kw)		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F0	PRODUCTO
Ambiente	P0	340	636,9	831,92	0	737,889	224,28	0	0	0	0	2771
Desbaste	P1	0	0	38,201	0	231,373	70,325	0	0	0	0	339,9
Dec. 1ª	P2	0	0	71,546	0	433,339	131,71	0	0	0	0	636,6
Trat. Biol.	P3	0	0	0	265,71	0	0	0	0	105	49,39	420,1
Dec. 2ª	P4	0	0	29,322	0	177,597	53,980	0	0	0	0	260,9
Digestión	P5	0	0	0	0	0	0	1462	0	0	0	1462
Pulmón/ Centrifuga	P6	0	0	0	0	0	0	0	460,2	0	19,76	479,96
Cogen.	P7	0,18	0,25	110,8	0,25	90,43	19,5	0	0	0	335,1	556,51
D. Digerido	P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	460,2	460,2
D. Balsa	P9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	105	105
FUEL	F	340,18	637,15	1081,8	265,96	1670,63	499,8	1462	460,2	105	969,45	

Tabla 112. Tabla F-P para el caso de co-digestión con glicerina (kW).

⟨FP⟩	P1	P2	P3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
F1	0	0	0	0	0	0	0,00032	0	0
F2	0	0	0	0	0	0	0,00044	0	0
F3	0,11238	0,11238	0	0,11238	0	0	0,19909	0	0
F4	0	0	0,63249	0	0	0	0,00044	0	0
F5	0,68070	0,68070	0	0,68070	0	0	0,16249	0	0
F6	0,20690	0,20690	0	0,20690	0	0	0,03503	0	0
F7	0	0	0	0	1	0	0	0	0
F8	0	0	0	0	0	0,95882	0	0	0
F9	0	0	0,24994	0	0	0	0	0	0

Tabla 113. Matriz FP para el caso de co-digestión con glicerina (kW).

⟨RP⟩	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1895
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3551
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3071
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1481
5	0	0	0	0	0	0	0	0,858	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0,141	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 114. Matriz RP para el caso de co-digestión con glicerina.

$\langle P^* \rangle$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	441,577	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	826,532	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	2115,70	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1418,35	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	4115,64	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1069,85	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	4115,64	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1025,8	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	528,799

Tabla 115. Matriz  $P^*$  para el caso de co-digestión con glicerina (kW).

FE	P0
F1	340
F2	636,9
P3	831,9
F4	0
F5	737,8
F6	224,2
F7	0
F8	0
F9	0

Tabla 116. Vector FE para el caso de co-digestión con glicerina (kW).

$\langle I \rangle$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I1	0,28	0	0	0	0	0	0	0	0
I2	0	0,55	0	0	0	0	0	0	0
I3	0	0	661,7	0	0	0	0	0	0
I4	0	0	0	5,06	0	0	0	0	0
I5	0	0	0	0	208,63	0	0	0	0
I6	0	0	0	0	0	19,84	0	0	0
I7	0	0	0	0	0	0	905,49	0	0
I8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 117. Matriz I para el caso de co-digestión con glicerina (kW).

$\langle R^* \rangle$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	100,245
2	0	0	0	0	0	0	0	0	187,784
3	0	0	0	0	0	0	0	0	162,427
4	0	0	0	0	0	0	0	0	78,3421
5	0	0	0	0	0	0	0	880,27	0
6	0	0	0	0	0	0	0	145,52	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 118. Matriz  $R^*$  para el caso de co-digestión con glicerina (kW).

	Desbaste	Dec. 1ª	Trat. Biol.	Dec. 2ª	Digestión	Pulmón/ Centrif.	Cogen.	8	9	R8	R9	TOTAL
<b>1.Desb.</b>	0,00082	5,1E-07	0,00039	4,7E-06	0,00026	0	0,00115	0	0	0,00112	0,29536	<b>1,29913</b>
<b>2. Dec. 1ª</b>	1,9E-07	0,00086	0,00029	3,5E-06	0,00019	0	0,00085	0	0	0,00083	0,29530	<b>1,29835</b>
<b>3.Trat. Biol.</b>	0,00022	0,00043	1,90600	0,00400	0,14310	0	0,62109	0	0	0,60379	0,75753	<b>5,03618</b>
<b>4.Dec. 2ª</b>	0,00022	0,00044	1,94185	0,02347	0,14622	0	0,63463	0	0	0,61696	1,07257	<b>5,43640</b>
<b>5.Digestor</b>	0,00018	0,00037	0,28183	0,00340	0,19171	0	0,21274	0	0	0,80892	0,31589	<b>2,81507</b>
<b>6.Pulmón/ Cent.</b>	0,00016	0,00032	0,24861	0,00300	0,03700	0,04133	0,16059	0	0	0,45933	0,27866	<b>2,22904</b>
<b>7.Cogen.</b>	0,00049	0,00097	0,74039 637	0,00895	0,50366	0	2,18597	0	0	2,12511	0,82988	<b>7,39545</b>
<b>8.Dig.</b>	0,00016	0,00032	0,24861	0,00300	0,03700	0,04133	0,16059	0	0	0,45933	0,27866	<b>2,22904</b>
<b>9.Balsa</b>	0,00022	0,00043	1,90600	0,00400	0,14310	0	0,62109	0	0	0,60379	0,75753	<b>5,03618</b>

Tabla 119. Descomposición de los costes exergéticos unitarios de los productos para cada uno de los procesos de la planta de tratamiento de purines de Capella, en el caso de co-digestión con glicerina.

- **CASO IV. Tratamiento de purines con Co-Digestión con mezcla de residuos industriales, de matadero y de vegetales**

TABLA F-P: CO-DIGESTIÓN CON MEZCLA DE RESIDUOS												
PROCESOS (kw)		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F0	PRODUCTO
Ambiente	P0	340	636,9	952,61	0	10023,41	6054,0	0	0	0	0	18007
Desbaste	P1	0	0	5,0508	0	208,7597	126,08	0	0	0	0	339,9
Dec. 1ª	P2	0	0	9,4597	0	390,9868	236,15	0	0	0	0	636,6
Trat. Biol.	P3	0	0	0	265,71	0	0	0	0	105	49,39	420,1
Dec. 2ª	P4	0	0	3,8769	0	160,2395	96,783	0	0	0	0	260,9
Digestión	P5	0	0	0	0	0	0	6514	0	0	0	6514
Pulmón/ Centrifuga	P6	0	0	0	0	0	0	0	6492	0	19,76	6511,76
Cogen.	P7	0,18	0,25	110,8	0,25	287,8	19,5	0	0	0	2063	2481,78
D. Digerido	P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6492	6492
D. Balsa	P9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	105	105
FUEL	F	340,18	637,15	1081,8	265,96	11071,2	6532,6	6514	6492	105	8729,15	

Tabla 120. Tabla F-P para el caso de co-digestión con mezcla de residuos (kW).

⟨FP⟩	P1	P2	P3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
F1	0	0	0	0	0	0	7,2E-05	0	0
F2	0	0	0	0	0	0	0,00010	0	0
F3	0,01485	0,01485	0	0,01485	0	0	0,04464	0	0
F4	0	0	0,63249	0	0	0	0,00010	0	0
F5	0,61417	0,61417	0	0,61417	0	0	0,11596	0	0
F6	0,37096	0,37096	0	0,37096	0	0	0,00785	0	0
F7	0	0	0	0	1	0	0	0	0
F8	0	0	0	0	0	0,99696	0	0	0
F9	0	0	0,24994	0	0	0	0	0	0

Tabla 121. Matriz FP para el caso de co-digestión con mezcla de residuos (kW).

⟨RP⟩	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,18957
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,35511
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0,30716
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14815
5	0	0	0	0	0	0	0	0,9762	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0,0237	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 122. Matriz RP para el caso de co-digestión con mezcla de residuos.

$\langle P^* \rangle$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	441,371	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	826,043	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	2106,79	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1412,69	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	21337,3	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	7390,87	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	21337,3	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	7368,4	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	526,574

Tabla 123. Matriz  $P^*$  para el caso de co-digestión con mezcla de residuos (kW).

FE	P0
F1	340
F2	636,9
P3	952,6
F4	0
F5	10023,4
F6	6054,0
F7	0
F8	0
F9	0

Tabla 124. Vector FE para el caso de co-digestión con mezcla de residuos (kW).

$\langle I \rangle$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I1	0,28	0	0	0	0	0	0	0	0
I2	0	0,55	0	0	0	0	0	0	0
I3	0	0	661,7	0	0	0	0	0	0
I4	0	0	0	5,06	0	0	0	0	0
I5	0	0	0	0	4557,2	0	0	0	0
I6	0	0	0	0	0	20,84	0	0	0
I7	0	0	0	0	0	0	4032,22	0	0
I8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 125. Matriz I para el caso de co-digestión con mezcla de residuos (kW).

$\langle R^* \rangle$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	99,8239
2	0	0	0	0	0	0	0	0	186,993
3	0	0	0	0	0	0	0	0	161,744
4	0	0	0	0	0	0	0	0	78,0124
5	0	0	0	0	0	0	0	7193,5	0
6	0	0	0	0	0	0	0	174,93	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 126. Matriz  $R^*$  para el caso de co-digestión con mezcla de residuos (kW).



	<i>Desbaste</i>	<i>Dec. 1ª</i>	<i>Trat. Biol.</i>	<i>Dec. 2ª</i>	<i>Digestión</i>	<i>Pulmón/ Centrif.</i>	<i>Cogen.</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>R8</i>	<i>R9</i>	<i>TOTAL</i>
<b>1.Desb.</b>	0,00082	8,3E-08	6,3E-05	7,7E-07	0,00112	0	0,00099	0	0	0,00177	0,29375	<b>1,29853</b>
<b>2. Dec. 1ª</b>	3,17E-08	0,00086	4,7E-05	5,7E-07	0,00083	0	0,00073	0	0	0,00131	0,29379	<b>1,29758</b>
<b>3.Trat. Biol.</b>	3,14E-05	6,1E-05	1,62218	0,00056	0,56437	0	0,49935	0	0	0,89085	0,43756	<b>5,01499</b>
<b>4.Dec. 2ª</b>	3,21E-05	6,3E-05	1,65220	0,01997	0,57680	0	0,51036	0	0	0,91048	0,74477	<b>5,41470</b>
<b>5.Digestor</b>	3,07E-05	6,0E-05	0,04597	0,00055	0,80752	0	0,09548	0	0	1,27466	0,05132	<b>3,27562</b>
<b>6.Pulmón/ Cent.</b>	1,66E-05	3,2E-05	0,02492	0,00030	0,01497	0,00320	0,01324	0	0	0,05049	0,02781	<b>1,13500</b>
<b>7.Cogen.</b>	8,07E-05	0,00015	0,12068	0,00145	2,11952	0	1,87535	0	0	3,34565	0,13470	<b>8,59761</b>
<b>8.Dig.</b>	1,66E-05	3,2E-05	0,02492	0,00030	0,01497	0,00320	0,01324	0	0	0,05049	0,02781	<b>1,13500</b>
<b>9.Balsa</b>	3,14E-05	6,1E-05	1,62218	0,00056	0,56437	0	0,49935	0	0	0,89085	0,43756	<b>5,01499</b>

Tabla 127. Descomposición de los costes exergéticos unitarios de los productos para cada uno de los procesos de la planta de tratamiento de purines de Capella, en el caso de co-digestión con mezcla de residuos.

## ANEXO V. ANÁLISIS DE SITUACIONES ALTERNATIVAS.

En el presente anexo se van a tratar de determinar los litros de combustible necesarios para transportar el purín en cada una de las situaciones que se explican a continuación:

- SITUACIÓN 1. Suponiendo la no existencia de una planta de tratamiento de purines en la zona de Capella (Huesca).
- SITUACIÓN 2. Suponiendo la existencia de una planta de tratamiento de purines en la zona de Capella (Huesca).

### Análisis del combustible empleado en el transporte de los purines.

En el presente apartado se va a tratar de realizar una estimación sobre el consumo de combustible necesario para transportar el purín en las situaciones antes mencionadas:

- Situación 1. Sin la existencia de la planta de tratamiento, los purines deben transportarse a grandes distancias desde las explotaciones ganaderas para de esta manera poder abarcar suficiente tierra arable sin resultar contaminante para la misma.



Figura 10. Esquema del transporte del purín según la situación 1 analizada.

- Situación 2. Con la existencia de la planta de tratamiento, los purines, por un lado, deben ser transportados desde las explotaciones ganaderas hasta la planta de tratamiento y, por otro lado, el digerido sólido debe ser transportado desde dicha planta hasta las tierras arables.



Figura 11. Esquema del transporte del purín según la situación 2 analizada.

**SITUACIÓN 1. Análisis del consumo de combustible en la situación en la que no exista planta de tratamiento.**

Teniendo en cuenta que las tierras agrícolas tienen una capacidad limitada para absorber purín, en el caso de no existir una planta de tratamiento de purines los ganaderos tendrían que transportar el purín generado por sus explotaciones porcinas a largas distancias de dichas explotaciones, para de esta forma no saturar el terreno cercano. El hecho de tener que transportar el purín conlleva unos altos costes exergéticos debidos, fundamentalmente, al coste de los combustibles de los vehículos agrícolas, es decir, al gasoil tipo “B”.

b.h. (%)	Gasóleo
C	86
H	11,1
N	1
O	0
S	0,8
w	1
z	0,1
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	850
PCI (kJ/kg)	43.100

*Tabla 128. Análisis elemental del gasóleo [66], así como su densidad [67] y su poder calorífico inferior [68].*

Para poder analizar el ahorro exergético que supondría la instalación de la planta de tratamiento de purines en Capella (Huesca) frente a tener que transportar el purín a zonas alejadas a la explotación ganadera, a continuación se van a analizar las características de la zona objeto de estudio para, de esta manera, poder determinar los kilómetros que serían necesarios ser recorridos por los vehículos agrícolas.

En primer lugar, se estudiara el balance entre las necesidades de Nitrógeno de los cultivos y el Nitrógeno contenido en los estiércoles:

- La superficie de cultivo utilizada será la que aparece recogida en las parcelas de la PAC (Política Agraria Común) con la categoría de Tierra Arable (TA) [69]. La superficie de tierra arable para el municipio de Capella son 1.593,4 ha.
- Dentro de la TA, y siguiendo las indicaciones del Plan de Biodigestión de Purines [70], se contabiliza únicamente la superficie de cultivos herbáceos para la valorización del purín (*“hectáreas de superficie agraria de herbáceos: tierras*

*ocupadas por cultivos temporales, praderas temporales y tierras dedicadas a huertas”).*

- Teniendo en cuenta que toda la superficie de cultivo no está disponible realmente para la valorización del estiércol, se supondrá un 75% de dicha superficie de cultivo [5].
- La zona de Capella (Huesca), está considerada como zona no vulnerable [71], por lo que se considerara un valor de extracción de 210 kgN/ha [72]. No obstante, según un estudio llevado a cabo por el Gobierno de Aragón y por Sodemasa en 2006, se considerará un índice medio de extracción de 150 kgN/ha para una presión ganadera sostenible, teniendo en cuenta la producción del tipo de cultivo (secano) en la zona de Capella (Huesca).

Por lo tanto, teniendo en cuenta la anterior información, a continuación se indica la cantidad de Nitrógeno que puede ser absorbida por el municipio de Capella (Huesca)

Tierra Arable, (ha) 75% TA	Cantidad total de nitrógeno, (kgN) 150kgN/ha
<b>1.195,05</b>	<b>179.250</b>

Tabla 129. Kilogramos de Nitrógeno que puede ser absorbido por las tierras arables del municipio de Capella.

Según un estudio de las explotaciones ganaderas de la zona de Capella (Huesca) llevado a cabo en la memoria de la planta [5], se determinó que el purín de dicha zona tenía 7.000 mgN/l purín, es decir, teniendo en cuenta que la planta esta dimensionada para 60.000m<sup>3</sup> de purín (en base al cálculo de las explotaciones de la zona), se tendrían 420.000kg de nitrógeno en la zona de Capella. Por lo tanto, se puede comprobar que dicho municipio no podría absorber todo el purín generado, por lo que éste tendría que ser transportado a otras zonas más alejadas para conseguir una presión ganadera sostenible.

Para determinar el área sobre el que tendría que repartirse el purín generado (60.000m<sup>3</sup>) sin generarse un problema medioambiental, se realizará un cálculo proporcional teniendo en cuenta los datos de Capella, es decir, si 1.195,05ha pueden absorber 179.250kgN, los 420.000kgN generados podrán ser absorbidos por 2.800ha. Por lo tanto, teniendo en cuenta que la superficie total del municipio de Capella son 60,7km<sup>2</sup> y éste dispone de 1.195,05ha de tierra arable valorizable, se considerará que las 2.800 ha necesarias para absorber los 420.000kgN equivalen a una superficie total de 142km<sup>2</sup>.

En conclusión, si no existiera la planta de purines en Capella, el purín generado por las explotaciones ganaderas de la zona ( $60.000\text{m}^3$  de purín) tendría que ser repartido en un área de  $142\text{km}^2$  para conseguir una presión ganadera sostenible. Teniendo en cuenta dicha área para el cálculo exergético de los costes de transportar el purín, se considerará una media de 70 kilómetros/trayecto (considerando la ida y la vuelta). Dicha distancia, si bien será tomada en cuenta para los cálculos exergéticos, es una distancia mínima, ya que las en las zonas adyacentes al municipio de Capella también existen explotaciones ganaderas que pueden repartir los purines generados por sus tierras arables, por lo que todavía tendrían que desplazarse más lejos los vehículos agrícolas de Capella en caso de no existir la planta de tratamiento.

Por otro lado, teniendo en cuenta la capacidad de las cisternas arrastradas por vehículos agrícolas, en torno a 10.000 litros, serán necesarios **6.000 trayectos** para repartir todo el purín generado.

Finalmente, teniendo en cuenta el consumo de un vehículo agrícola arrastrando una cisterna a plena capacidad y en vacío (una vez que ha descargado), se determinará la cantidad total de litros de combustible (gasoil) necesarios para evacuar de una forma sostenible el purín generado.

	*Consumo, l/100Km	Recorrido, km	Nº Trayectos/año	Combustible, l/año
Trayecto de ida Granja/TA (Cisterna Cargada)	30	35	6.000	63.000
Trayecto de vuelta TA/Granja (Cisterna Descargada)	18	35	6.000	37.800

*Tabla 130. Litros de gasoil necesarios para transportar el purín en caso de no existir una planta de tratamiento próxima si sin generar una presión ganadera insostenible (\* consumo estimado según información facilitada por diversos ganaderos).*

### SITUACIÓN 2. Análisis del consumo de combustible en la situación en la que exista planta de tratamiento.

En primer lugar se analizará tanto la ubicación de la planta como la de las explotaciones ganaderas para las cuales está diseñada la misma.

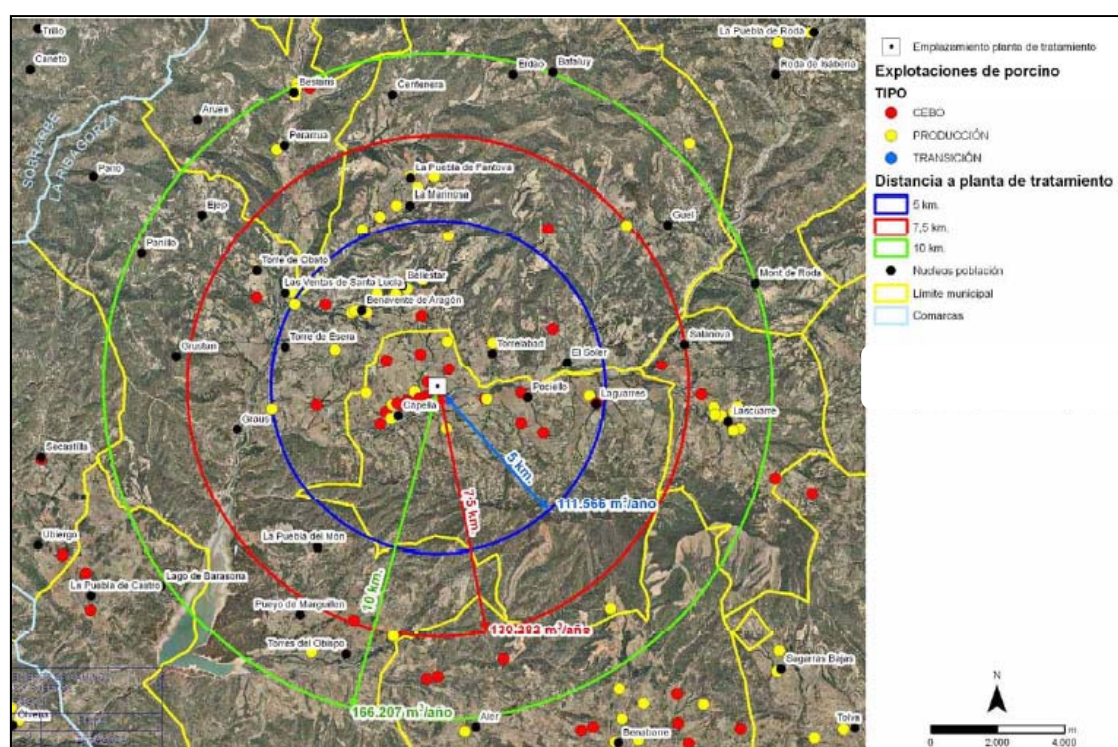


Figura 12. Producción de purín en el entorno del emplazamiento de la planta de tratamiento de Capella [5].

A la vista del gráfico anterior, se puede comprobar que en un radio de 5 kilómetros desde la ubicación de la planta de tratamiento, las explotaciones ganaderas de esa área ya generan  $111.566 \text{ m}^3$  de purín al año, por lo que teniendo en cuenta la capacidad de la planta ( $60.000 \text{ m}^3$ ), serían dichas explotaciones las que transportarían sus purines a la planta, por lo que recorrerían un trayecto de unos 5 kilómetros. Por lo tanto, a continuación se indican los litros de gasoil necesarios para transportar el purín desde las explotaciones ganaderas hasta la planta de tratamiento (Trayecto 1).

	*Consumo, l/100Km	Recorrido, km	Nº Trayectos/año	Combustible, l/año
<b>Trayecto de ida Granja/Planta (Cisterna Cargada)</b>	30	2,5	6.000	4.500
<b>Trayecto de vuelta Granja/Planta (Cisterna Descargada)</b>	18	2,5	6.000	2.700

Tabla 131. Litros de gasoil necesarios para transportar el purín desde la explotación ganadera hasta la planta de tratamiento (trayecto 1) si sin generar una presión ganadera insostenible. (\* consumo estimado según información facilitada por diversos ganaderos).

En esta segunda situación, también hay que tener en cuenta el coste del transporte del abono sólido producido en la planta de tratamiento tras la digestión (digerido sólido) desde la planta de tratamiento hasta las tierras arables. A continuación se indican las propiedades de dicho digerido:

FLUJOS DE PURÍN	Tn/año	m <sup>3</sup> /año	Nitrógeno kg N/año	Fósforo kg P/año
<b>10</b> <b>(Digerido sólido)</b>	3.105	4.436	30.817	14.272

Tabla 132. Nitrógeno y fosforo contenido en el flujo 10 de la planta de tratamiento (para realizar los cálculos se ha supuesto que el flujo 10 está compuesto por nutrientes y materia orgánica, considerándose los datos volumétricos correspondientes al caso sin co-digestión).

Teniendo en cuenta, como ya se ha explicado anteriormente, que el municipio de Capella podría absorber 179.250kgN/año, se puede comprobar que no sería necesario transportar el digerido fuera de dicho municipio, es decir, todo el digerido sólido podría ser repartido sobre parte de sus tierras arables valorizables.

Por otro lado, considerando una capacidad media de una abonadora de abono orgánico sólido, en torno a 5.000 litros, serán necesarios 890 trayectos para repartir todo el digerido solido.

A continuación se indican los litros de gasoil necesarios para transportar el digerido sólido desde la planta de tratamiento hasta las tierras arables.

	*Consumo, l/100Km	Recorrido, km	Nº Trayectos/año	Combustible, l/año
<b>Trayecto de ida</b> <b>Planta/TA</b> <b>(Abonadora Cargada)</b>	25	2,5	890	556
<b>Trayecto de vuelta</b> <b>Planta/TA</b> <b>(Abonadora Descargada)</b>	15	2,5	890	334

Tabla 133. Litros de gasoil necesarios para transportar el digerido sólido desde la planta de tratamiento hasta las tierras arables (trayecto 2) si sin generar una presión ganadera insostenible. (\* Consumo estimado según información facilitada por diversos ganaderos).