

SYNERGY AS STRATEGY FOR THE ENERGETIC VALORIZATION OF WASTE FOCUSED IN TRANSPORT

Alvarez Cabal, J. V.; Luiña Fernández, R.; Ortega Fernández, F.; Lobo Rosario, P.

Universidad de Oviedo

Industrial by-products synergy is potentially capable of generating an industrial ecosystem that minimizes waste production. This article presents a case of synergy of a by-product use to produce fuel for the transport sector. This sector is selected because the public administration is focused in reducing its fuel consumption. The initial by-product is dairy industry waste. This waste could be seen as a treatment problem, but can also be presented as an opportunity for energy recovery. Thinking on energy recovery, anaerobic digestion is the most suitable alternative. The biogas obtained can be upgraded for use in vehicles. Synergistic processes will be evaluated in order to use the by-products generated. Environmental sustainability analysis will be made using Life Cycle Analysis tool. Carbon Footprint and Energy Ratio tools are also used. This work proposes an industrial ecosystem as closed as possible to minimize the required inputs and waste produced, improving the sustainability of the waste treatment process.

Keywords: *Life Cycle Analysis; Carbon footprint; Industrial synergy*

SINERGIA EN LOS PROCESOS DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS PARA EL TRANSPORTE

La sinergia de coproductos entre procesos industriales permite generar un ecosistema industrial que minimiza los residuos generados. En este artículo se presenta un caso de sinergia que permite minimizar los residuos para un caso de generación de combustibles para el sector del transporte. Se selecciona este sector pues es señalado como prioritario en la reducción de consumos de recursos no renovables. El punto de partida son los residuos ganaderos y de la industria asociada pueden representar un problema de tratamiento, pero al mismo tiempo se pueden presentar como una oportunidad de valorización energética. Por su orientación a la valorización energética, la digestión anaerobia es la alternativa más adecuada. El biogás obtenido puede ser reformado para su uso en vehículos de transporte, evaluando procesos sinérgicos para el uso de los coproductos generados. Se utilizará el Análisis de Ciclo de Vida como herramienta adecuada para evaluar la sostenibilidad ambiental del proceso. Se utilizan también otras dos herramientas: la huella de carbono y la tasa de retorno energético. Se propone un ecosistema lo más cerrado posible que minimice los insumos necesarios y los residuos producidos, mejorando la sostenibilidad del proceso.

Palabras clave: *Análisis de Ciclo de Vida; Huella de carbono; Sinergia industrial*

Correspondencia: valer@api.uniovi.es

1. Introducción

El crecimiento económico basado en el consumo creciente de recursos se está revelando como insostenible. Es necesario optimizar el consumo de energía y recursos para favorecer un crecimiento sostenible. Hace falta entender que las distintas industrias consumen recursos y los intercambian como constituyentes de un ecosistema. Igual que en un ecosistema natural todos los residuos son un recurso, en un ecosistema industrial se debe aplicar dicho principio.

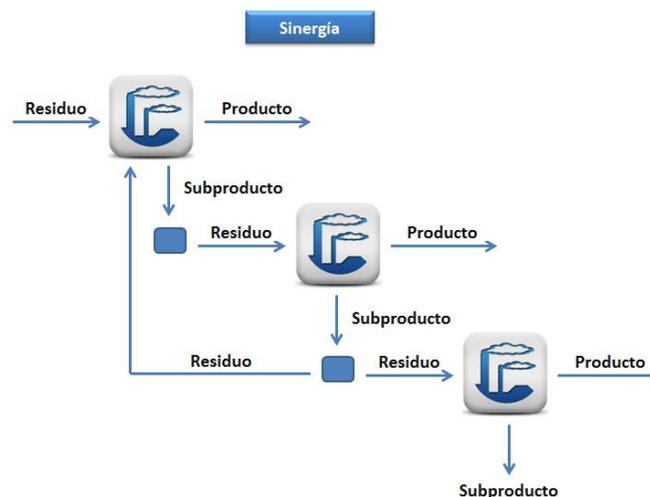
El principio de la “By-product synergy” (BPS) es que los residuos de una industria puedan ser utilizados como recursos primarios por otra. Es una idea muy sencilla, pero que tiene un gran potencial a la hora de reducir residuos, emisiones tóxicas al aire y al agua y costes de operación (Network for Business Innovation and Sustainability, 2012).

Sin embargo, evolucionar hacia esta forma de concebir la producción constituye un gran reto. La idea tradicional de sistema industrial se corresponde con una cadena lineal que comienza con la obtención de las materias primas que pasan por un proceso hasta que llegan a un consumidor, a partir del cual se convierten en desechos que son enviados a vertedero.

Es necesario transformar este sistema lineal en uno cíclico, en el que las relaciones con el medio ambiente sean tenidas en cuenta y se imiten las relaciones de los ecosistemas naturales, donde un sistema queda definido por un conjunto de interrelaciones internas y otras externas con el ambiente que le rodea.

El objetivo es que los parques industriales funcionen como ecosistemas para lograr minimizar los impactos ambientales, favorecer la reutilización y reciclaje de los materiales entre las industrias potencialmente generadoras y consumidoras de subproductos y para incentivar el mercado de cambio de todo tipo de residuo (Mangan et al., 2003).

Figura 1. Esquema de la filosofía de “By-product synergy” (International Institute for Sustainable Development, 2012)



La sinergia de los co-productos es el principio en que se basa el concepto de “ecología industrial”, una visión holística de la industria en la que las organizaciones intercambian energía y materiales entre sí en lugar de operar como unidades aisladas. La ecología industrial busca un abandono de los sistemas abiertos y lineales para llegar a circuitos cerrados e interdependientes entre sí.

En el informe "*Industrial Ecology: Some Directions for Research*" realizado por Wernick, I., & Ausubel, J. (1997), se define a la Ecología Industrial, o Ecosistema Ecológico, como un sistema donde se optimiza el consumo de energía y de materiales, se minimiza la generación de desagües y se favorece la reutilización de residuos de un proceso como materia prima para otros procesos.

Para facilitar el intercambio de materiales y recursos es necesario que las empresas colaboren en la determinación de los productos no deseados y en encontrar las posibles aplicaciones potenciales. Estos residuos llegan a transformarse en recursos que pueden intercambiarse, venderse o simplemente pasarse gratis entre diferentes industriales logrando así una sinergia de co-productos.

Este es el caso de la solución propuesta por una planta canadiense productora de cemento que ha logrado traducir las elevadas emisiones de CO₂ de su proceso productivo en el cultivo de algas, las cuales, además de capturar dichas emisiones suponen una fuente renovable de energía como es el caso del biodiesel. Éste a su vez, podría abastecer una parte de la fuerte demanda energética de la fabricación de cemento (Hurst, 2010).

Actualmente, el mejor ejemplo de ecología industrial es la industria danesa de Kalunborg. Aunque un estudio reciente realizado por la EPA sugiere que aún existe un gran potencial de sinergia de co-productos sin explotar entre industrias cercanas.

Para lograr el ideal de la Ecología Industrial, es necesario disminuir los impactos ambientales negativos, promover la utilización de materiales que puedan reutilizarse y/o reciclarse, mejorar los procesos tecnológicos de transformación para aumentar la eficiencia en el uso de materias primas. En este punto entra en juego el ecodiseño. De esta forma, la idea de generar sinergia entre los co-productos es una iniciativa que involucra a los miembros de distintas empresas mediante un enfoque innovador y emprendedor de gestión de materiales y recursos a nivel regional.

Para diseñar un plan de sinergia de co-productos es necesario conocer el lugar de actuación para evaluar los co-productos disponibles y los procesos de gestión de los mismos. A continuación se tratará de detectar las oportunidades de sinergia que pueden surgir y el intercambio de materiales y energía que se podría establecer. También tienen un papel importante las estrategias de reducción de residuos.

Los beneficios alcanzados por la puesta en práctica de la idea de sinergia de co-productos supone descubrir nuevas oportunidades de vender materiales en lugar de pagar por enviarlos a vertedero, adaptar los procesos para que el uso de los materiales requiera menor coste y menor ocupación de vertedero, el desarrollo del reciclaje y la reducción de residuos, la participación de intercambios rentables tanto para el momento actual como de cara al futuro y tener acceso a conocimientos técnicos y a las bases reguladoras para la evaluación de las oportunidades (Network for Business Innovation and Sustainability, 2012).

2. Objetivo

Una de las opciones con mayor desarrollo en el aprovechamiento de biomasa es la obtención de biogás a partir de residuos. El aprovechamiento de residuos agrícolas y ganaderos abre un campo a la obtención de un combustible de características equivalentes al gas natural y que puede ser insertado en red o utilizado como combustible en medios de transporte.

Dentro de las posibilidades técnicas existentes, el proceso al que se refiere este artículo es el proceso de la digestión anaerobia que permite obtener un biogás rico en metano y el reformado posterior hasta alcanzar las características exigidas del gas natural.

A pesar de que genera un combustible sostenible, el proceso tiene como subproductos grandes cantidades de CO₂ y un digerido orgánico. De acuerdo con los principios de la ecología industrial sería conveniente buscar otro proceso que utilice dichos subproductos como entradas. Como limitación se intenta que dicho proceso genere energía.

El proceso en el que se ha pensado es el cultivo de algas que permite la obtención de biodiesel tras el proceso de transesterificación. Se asume la proximidad de una planta de transesterificación en la que los lípidos del alga serían una materia prima alternativa. Además, no se considera la posibilidad de secado solar de la biomasa algal y ambas plantas, cultivo de algas y GNS, son adyacentes.

La consideración es que es necesario evaluar estos procesos de ecología industrial para asegurarse de que realmente se produce una mejora en la sostenibilidad del proceso combinado para lo cual se ha seleccionado la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). En este caso, al tratarse de un proceso de obtención de energía, también se va a evaluar una mejora del rendimiento energético mediante Tasa de Retorno Energética (TRE). Como complemento, y por tratarse de uno de los conceptos más extendidos y tradicionales se ha decidido incluir la Huella de Carbono (HC). Por lo tanto, se procede a realizar la comparación una Alternativa 0 o inicial, la producción de GNS obtenido a partir de la digestión anaerobia de residuos agroindustriales y de su posterior reformado criogénico, frente a una Alternativa Planteada que introduce el concepto de ecología industrial al combinar dos procesos complementarios que pueden llegar a constituir un ciclo cerrado como son la producción de GNS y biodiesel a partir de del cultivo de microalgas.

3. Obtención del GNS mediante el aprovechamiento energético de residuos agroindustriales

El proceso de producción de GNS propuesto consta de dos fases: la producción de biogás y el reformado del mismo, que serán descritos por separado.

3.1. Producción de biogás

La planta de producción de biogás parte de purines de vacuno y residuos cárnicos y lácteos para obtener biogás con una pureza del 60 %. La mezcla adecuada de estas sustancias y su homogeneización permitirá un proceso estable con un rendimiento aceptable (Marañón, Fernández & Castrillón, 2009).

En el caso considerado, cada día se reciben en promedio 19.200 kg de estiércol de vacuno, 1.000 kg de residuo de matadero, y 600 kg de residuos lácteos. Con estas entradas promedio se producirían 533 Nm³ de biogás al día con una composición del 60% CH₄, 37% CO₂, 3% N₂ y trazas de azufre.

Tratar estos residuos evita impactos ambientales que deben ser considerados como una aportación positiva del proceso. Según los valores aportados en (Luiña et al., 2012) esto supone 2,04 Kg CO₂ evitados por cada m³ de biogás producido.

En cuanto al transporte de los materiales, se presupone que las instalaciones que harán uso de la planta estarán uniformemente distribuidas en cuanto a distancia en un radio de 20 km alrededor de la planta, por lo que se asumirá un transporte promedio de 14 Km de los residuos hasta la planta.

Se supone una vida útil de la instalación de 25 años y de la maquinaria de 10 años. Durante la operación normal de la planta, se produce un consumo 1,3GJ de energía eléctrica de y 2,22 GJ de calor.

Junto con el biogás, se obtiene el digerido a razón de 20.010 kg diarios. Este co-producto de la digestión anaerobia puede utilizarse directamente como fertilizante o pasar a un proceso productivo para obtención de fertilizante químico.

3.2. Proceso de purificación y reformado del biogás

El reformado de biogás trata de producir un combustible con las características del gas natural con un porcentaje de metano superior al 96% y eliminado el H₂S y el agua para evitar la corrosión que tal combinación produciría en las tuberías de suministro (Persson, Jönsson & Wellinger, 2006).

En este caso se propone una separación criogénica de gases. Se basa en que el CO₂, H₂S y los demás contaminantes del gas licuan a diferentes combinaciones de presión y temperatura, lo que hace posible separarlos del metano. Su ventaja es que almacena todos los gases resultantes por lo que el CO₂ resultante de la separación no se emite a la atmosfera. Pero requiere un fuerte consumo de energía ya que la separación tiene lugar a temperaturas muy bajas, cercanas a -100 °C y altas presiones, 40 bares.

El proceso requiere una serie de compresores e intercambiadores colocados en línea. El biogás se pasa por un intercambiador de calor que baja la temperatura del gas hasta los -70°C aproximadamente. A continuación se colocan en cascada compresores e intercambiadores de calor que llevan el gas a -100°C y 40 bares de presión, condiciones en las que entra en una columna de destilación que separa el metano de los contaminantes. Se puede utilizar para tratar altas cantidades de gas con resultados de gran pureza con un consumo energético de 0,505 kWh por Nm³ de GNS producido.

La planta debe tratar 823 t anuales de biogás (suponiendo una densidad de 0,6 Kg/m³). La planta tiene unas instalaciones complejas y exigentes. Se considera que está situada en el mismo terreno habilitado para la instalación de biogás por lo que no se hace necesaria nueva ocupación de terreno. Se estima una vida de la instalación de 15 años.

4. Producción de biodiesel a partir de microalgas cultivadas en estanque.

Las microalgas crecen de manera espontánea en ambientes acuáticos y húmedos. Sin embargo pese a su abundancia en la naturaleza, para la producción de biocombustibles en masa se lleva a cabo su cultivo controlado en plantas en tierra firme (Barraza et al., 2009).

La instalación de referencia cuenta con un sistema de cultivo de algas en estanques de alto rendimiento con cubierta de invernadero, seleccionando como alga a producir la *Chlorella vulgaris* que cuenta con una tasa de crecimiento de 25 gm⁻²d⁻¹ (Lundquist et al., 2010). La instalación está formada por 3 estanques de 1.500 m² de área útil, lo que supone una superficie total de 4.500 m² generando una producción diaria de 112,5 kg de biomasa.

En el cultivo del alga influyen determinados factores como la luz, la temperatura y los nutrientes. Las necesidades del alga se cubren mediante la inyección del CO₂ y el aporte de fertilizante. Las necesidades de los mismos se calculan según la composición del alga reflejada en (Collet et al., 2011). En cuanto a la dosis de CO₂ requerida, el doble de la masa de alga, es inyectada a presión a lo largo del estanque.

Además, es necesario llevar a cabo un lavado del agua para controlar el desarrollo de bacterias y evitar acumulaciones de compuestos tóxicos o inhibidores. Para ello se emplea una bomba de 750 W y se trata in situ, mediante un tratamiento básico de aguas residuales (Lardon et al., 2009). Las pérdidas de agua debidas a la evaporación y a al proceso de cosecha que se estiman en 0,5 mm al día (Collet et al., 2011).

Todo el sistema de cultivo estará en constante agitación mediante unas paletas rotatorias que generan un flujo inestable que supone un flujo horizontal a 20 cm/s y oscilaciones en la superficie en sentido vertical (Tampier, Alabi & Bibeau, 2009).

Dado que el alga se encuentra muy diluida en el medio de cultivo, la cosecha se suele hacer en dos pasos, una decantación natural seguida de una centrifugación. Con el primer paso se consigue obtener el 65 % de la biomasa con una concentración 20 veces mayor que en la corriente de cultivo tras 2 horas de residencia (Collet et al., 2011). Se requiere de una bomba con un consumo de 0,1 KWh/m³ bombeado o 45 kWh por cosecha.

Una vez realizada la sedimentación en los decantadores se procede a la centrifugación mediante la tecnología de plato de espiral que genera un flujo de salida con una concentración de algas del 50 kg m⁻³. Según (Fernandes, Lapa & Olson, 2010) el consumo eléctrico de la centrifugación 3.000 KWh/t alga seca para lograr una concentración 18% de sólidos que pasará a la siguiente fase del proceso.

El flujo de salida pasa a la fase de secado para alcanzar una concentración del 90% de sólidos, que según (Sazdanoff, 2006) permite asimilar la pasta de algas al proceso que siguen las semillas de soja para la producción de biodiesel, tomándose de esta forma el proceso de referencia de producción de biodiesel a partir de soja existente en la base de datos de Ecoinvent (Ecoinvent, 2007).

Para lograr dicha concentración se usa de una cinta de secado que utiliza tanto la presión de la gravedad y mecánica como el aporte de calor (Viessman & Hammer, 2004). A pesar de ser uno de los medios menos exigentes, aun así, requiere 400 Wh de electricidad y el aporte de 13,8 MJ de calor por kg de materia seca procesada para alcanzar una concentración final del 90% (Hassebrauk & Ermel, 1997), lo que supone un consumo energético muy importante.

La pasta se envía a una planta de trasesterificación localizada a 100 km, donde se obtiene el aceite por trituración, haciendo circular un disolvente a contracorriente. Las salidas del molino son aceite crudo y torta. Se calcula que un 87% del producto total es metil éster y un 13% es de glicerina. Una vez obtenido el aceite ha de esterificarse con un alcohol para transformarse en biodiésel.

5. Proceso integrado buscando un ciclo cerrado

Como ya se ha descrito anteriormente, la producción de GNS genera como co-productos CO₂ y fertilizante que pueden ser aprovechados por el cultivo de microalgas como nutrientes para crecer. De esta forma no se hace necesario el aporte de fertilizante mineral. Por su parte, la producción de biodiesel genera como co-productos torta agotada de extracción y glicerina que se recirculan al biodigestor incrementando el rendimiento del mismo (Luiña et al., 2012).

Además, es clara la dependencia energética de los dos procesos, especialmente el secado del alga, por lo que se propone el envío de parte del biogás generado a cogeneración con el fin de producir el calor necesario para los procesos y una cierta cantidad de electricidad que puede que también será invertida en el sistema. Como co-producto se obtiene "flue-gas" que puede ser lavado en los estanques de microalgas, realizando las funciones de fuente de CO₂.

Para ello se considera un aumento en la cantidad de residuos a tratar, de forma que se pueda disponer de una fracción de biogás exclusivamente para abastecer la demanda de calor del sistema (digestión y secado) mediante su combustión en un proceso de cogeneración que, además, también produzca electricidad.

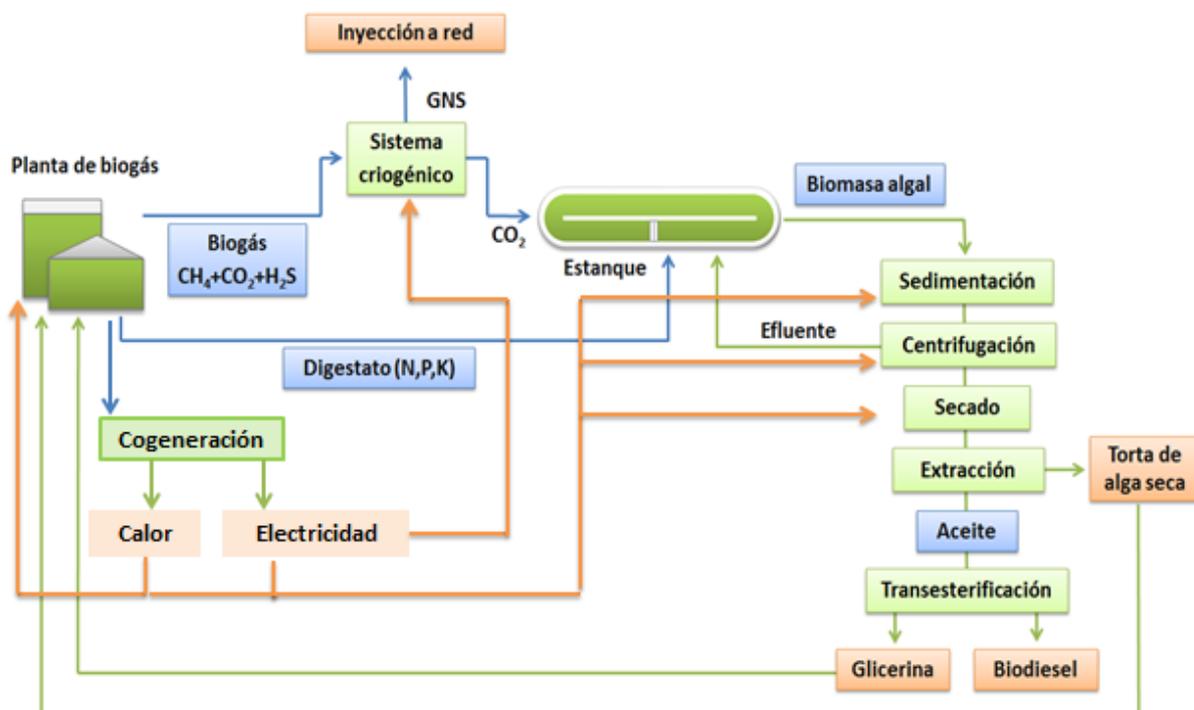
Esto supone un incremento de residuos del 86%, obteniendo un total de 1.130,19 Nm³ de biogás (contemplando un incremento del 14% en la producción de biogás debido al aporte de la glicerina obtenida en el proceso de transesterificación) de los cuales 458,39 Nm³ van destinados a generar el calor necesario durante la digestión de los residuos y secado de la biomasa algal y 677,79 Nm³ a la producción de GNS. Se estima un rendimiento en cogeneración del 55% para calor y 32% para electricidad según la base de datos Ecoinvent de la cual se toma el proceso de cogeneración. Además se asumen pérdidas en el transporte e intercambiadores de calor del 40%. Por lo tanto, de esta etapa se obtienen 4.215,35 MJ y 1.703,17 kWh, de los cuales 1.552,47 MJ y 1.158,9 kWh irán destinados a cubrir el consumo del biodigestor, mientras que el resto del calor se emplea en el secado de la biomasa algal. En cuanto al sobrante de electricidad obtenido en la cogeneración, además de cubrir las necesidades del biodigestor, 324,03 kWh se emplean en el reformado criogénico y 212,22 en el cultivo y cosechado de la biomasa algal. El sobrante de electricidad, 1.052,63 kWh.

Para mejorar el sistema mediante la aplicación de la filosofía de “By-products synergy” se procede al lavado de los gases de combustión que se burbujearán en los estanques para abastecer la demanda de CO₂. Dado que se estima una tasa de fijación de CO₂ del doble de la masa del alga producida y que el burbujeo cuenta una menor dilución en el agua que la inyección, es necesario contabilizar las emisiones a la atmósfera desde los estanques.

Mediante un balance de CO₂ se calcula que las emisiones durante la combustión del biogás en el motor de cogeneración son de 4 kg por cada m³ de biogás, lo que se traduce en 3.200 kg de CO₂ al día, mientras que la instalación de microalgas sólo absorbe 226 kg de CO₂ diarios. Por lo tanto, el burbujeo de los gases de combustión al estanque supone un ahorro de aproximadamente el 7%.

Por otra parte, burbujear los gases de combustión en lugar de inyectar el CO₂ a presión, como en la combinación con el reformado criogénico, supone un coste energético aproximadamente 6,5 veces mayor (Campbell, Beer & Batten, 2009).

Figura 2: Esquema de la alternativa Planteada



6. Análisis

Dado que estos procesos generan formas de energía diferentes es necesario escoger un marco común que las haga comparables. Por lo tanto, la unidad funcional de evaluación será el transporte, 1.000 km recorridos por un autobús urbano según las condiciones de (Luiña et al., 2012). Para recorrer dicha distancia un autobús de GN consume 740 Nm³ mientras que uno de biodiesel B30 504 kg.

6.1. ACV

Para el realizar el ACV se utiliza el EI99 por ser la metodología más extendida. Los cálculos se realizan con el software GaBi y las bases de datos utilizadas son Ecoinvent y ELCD.

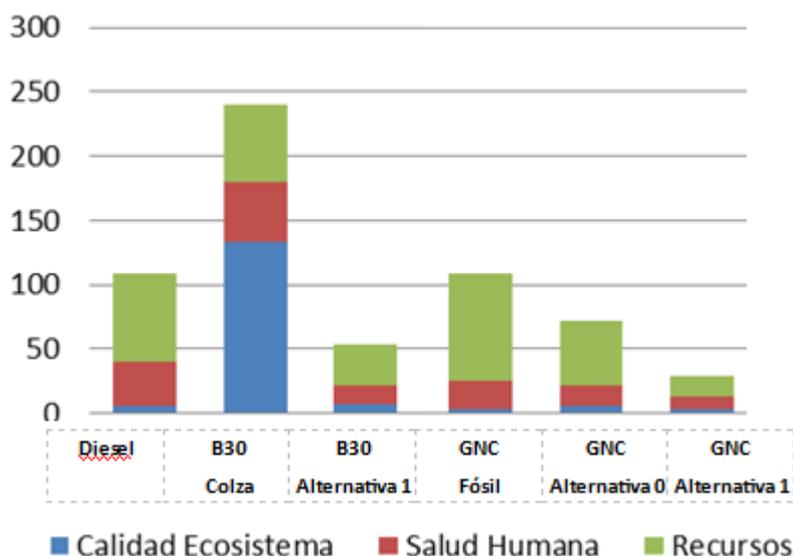
La alternativa 0, producción de GNS, genera un impacto que traducido a la referencia de los 1.000 km recorridos o 1tkm supone un impacto de 49,2 pt por tkm. Sin embargo, esta puntuación global sería mayor si no se considerase que el CO₂ separado del biogás es embotellado y si emitido.

En cuanto a la producción de biodiesel a partir de microalgas para 1 tkm supone un impacto de 94,72 pt. De esta puntuación global, al biodiésel le corresponden 39,38 pt. Por lo tanto, este escenario permite obtener un biocarburante B30 con una puntuación muy inferior al obtenido a partir de colza, 245 pt, en (Luiña et al., 2012) e incluso similar al obtenido a partir de aceites reciclados.

En el caso del sistema en ciclo cerrado se obtiene una mejora en la puntuación con 61 pt/tkm, de los cuales, 13 pt le corresponden al GNS y 29,5 al Biodiésel. Estos resultados suponen una mejora de casi 8 pt respecto al caso anteriormente planteado.

En la Figura 3 se representa la puntuación obtenida para los diferentes tipos de autobús en la que se incluyen los valores de algunos carburantes de referencia y los obtenidos en cada una de las sinergias, reflejando así la mejora que supone cada una de ellas. Los valores de la alternativa inicial o 0 y de la Alternativa Planteada o 1 se comparan con la puntuación obtenida por otras formas de motorización evaluadas en (Luiña et al., 2012).

Figura 3: Comparativa de la puntuación única EI99 HA del ciclo completo de un autobús referido a 1 tkm según los distintos sistemas de motorización



6.2. Tasa de Retorno Energético

La evaluación del rendimiento energético del sistema también es importante para comprobar su idoneidad, además del análisis del impacto ambiental. Para ello se evalúa la tasa de retorno energética que evalúa la cantidad de energía demandada por el sistema y la producida.

El cálculo de la Tasa de Retorno Energético (TRE) se realiza mediante un balance de energías primario en el que se contabilizan las entradas y salidas expresadas en m³ de GNS. Para realizar esta conversión se tiene en cuenta un rendimiento en la transformación de la energía química en calor de 0,8 y se adopta como valor para la transformación que 1 m³ de GN tiene 41,8 MJ.

En la Tabla 1 se muestra el TRE del proceso de producción de GNS que ofrece un resultado óptimo, ya que la inversión de energía realizada en el tratamiento de residuos para la obtención de biogás y su posterior reformado permite obtener un vector energético de forma rentable.

Tabla 1: Balance de energía del proceso de producción de GNS expresado a m³ de GNS

Proceso	Input	Output
Transporte	31,73	-
Electricidad digestión	15,57	-
Calor digestión	42,81	-
Electricidad reformado	34,60	-
Producción GNS	-	303,81
Total	124,721	303,81
TRE	-	2,43

Sin embargo, tras los buenos resultados obtenidos para la producción de GNS, al realizar el balance energético de la producción de biodiésel a partir de microalgas cultivadas en estanque, el rendimiento obtenido es muy desfavorable, ya que el sistema demanda más energía de la que produce. Sólo si se analizara desde el punto de vista de ofrecer independencia energética sería adecuado.

Tabla 2: Balance de energía del proceso de producción de Biodiésel B30

Proceso	Input	Output
Flue Gas	7,487	-
Paletas	5,102	-
Transporte fertilizante	0,658	-
Cosecha	3,903	-
Centrifugado	21,347	-
Calor secado	46,471	-
Electricidad secado	40,371	-
Transesterificación	0,283	-
Transporte biomasa	0,825	-
Diésel	93,996	-
Producción biodiésel	-	125,242
Total	220,442	125,242
TRE	-	0,568

A continuación se presenta el cálculo del TRE para la producción de 458 Nm³ de biogás que se destinan a cogeneración para la generación de energía eléctrica y calor. El rendimiento de este proceso es excelente, ya que se obtiene un valor de 6,248. En este caso la cogeneración resulta muy eficiente en términos energéticos debido a que el calor producido será utilizado en la propia instalación para abastecer la demanda de la digestión anaerobia y el secado del alga. Sin embargo, en caso de no existir un proceso al que aplicar este calor, el rendimiento no sería tan adecuado.

Tabla 3: Balance de energía del proceso de producción de biogás y cogeneración

Proceso	Input	Output
Transporte	31,731	-
Electricidad digestión	13,397	-
Calor digestión	36,788	-
Calor cogeneración	-	125,65
Electricidad cogeneración	-	385,878
Total	81,916	511,929
TRE	-	6,248

Una vez analizados los TRE de cada uno de los procesos de forma individual se procede a evaluar el TRE de la alternativa 1. Es destacable cómo baja el rendimiento de la producción de GNS a costa de mejorar el de la producción de biodiésel.

Tabla 4: TRE del escenario de la Alternativa Planteada

Proceso	Input	Output
GNS	133,499	380,190
Cogeneración	81,916	511,829
B30 (tratamiento y transporte digerido)	221,00	125,242
Total	436,415	1.017,261
TRE	-	2,331

6.3. Huella de Carbono

Para su cálculo se utiliza la metodología CML 2001 en kg-CO₂ equivalente. Tomando como referencia una producción de 303,8 Nm³ de GNS y 112,5 kg de biomasa algal que tienen un rendimiento de 25,6 kg de biodiésel, se obtiene un HC negativa de -140 y -70 kg-CO₂ equivalentes respectivamente, debido principalmente a la fijación de CO₂ tanto en la digestión anaerobia como en el cultivo de las microalgas. Es importante destacar que el valor negativo se debe a que no se tiene en cuenta los gases emitidos durante la combustión de estos vectores energéticos. Otro factor que es determinante en el valor negativo de esta HC es el hecho de contemplar que durante el reformado, los gases separados son perfectamente aislados y que existe un destino para ellos diferente de su emisión a la atmósfera.

Sin embargo, al contrario que en la metodología ACV o en TRE, el valor de la alternativa Planteada, 228,77 kg-CO₂ equivalentes, es peor que en los casos anteriores. Esto se debe al proceso de cogeneración, ya que supone una importante emisión de CO₂ a la atmósfera.

7. Conclusiones

De los resultados del trabajo se puede afirmar que la ecología industrial permite una gestión más sostenible.

Partiendo de la valorización energética de residuos agroindustriales se demuestra que la producción de GNS (alternativa 0) tiene un buen comportamiento ambiental, que incluso puede mejorar si se aprovechan todos los co-productos generados.

Se comprueba que el proceso de cultivo de microalgas para la producción de biodiesel es un proceso complementario con el de la producción de GNS, ya que una vez estudiados ambos procesos se descubre que los inputs de un proceso pueden abastecerse con los outputs del otro.

De esta forma, los análisis realizados sobre la sostenibilidad ambiental de cada uno de los procesos individuales y las diferentes conexiones propuestas reflejan que existe una clara mejora en la puntuación alcanzada según se avanza hacia el ciclo cerrado. No ocurre lo mismo con los resultados de TRE y de Huella de Carbono.

8. Referencias

- Barraza, C., Collao, V., Espinoza, C., Moya, F., Thun, G., & Torres, M. (2009). *Producción de biodiésel a partir de microalgas*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Bioquímica.
- Campbell, P. K., Beer, T., & Batten, D. (2009). *Greenhouse gas sequestration by algae - Energy and greenhouse gas life cycle studies*. CSIRO Energy Transformed Flagship.
- Collet, P., Hélias, A., Lardon, L., Ras, M., Goy, R., & Steyer, J.P. (2011). Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. *Bioresource Technology*, 102, 207-214.
- Ecoinvent. (2007). *Life Cycle Inventories of Bioenergy*. Ecoinvent v2 database.
- Fernandes, D., Lapa, N., & Olson, L. (2010). *Chlorella sp. coagulation-- flocculation by inducing a modification on the pH broth médium*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Gronauer A., Helm M., & Schön H. (1997). *Verfahren und Konzepte der Biofabrikkompostierung*. Vergleich - Bewertung - Empfehlung. Bayerische Landesanstalt für Landtechnik der tu München-Weihenstephan.
- Hassebrauck, M., & Ermel, M. (1996). Two examples of thermal drying of sewage sludge. *Water science and Technology*, 33, 235-242.
- Hurst, T. (2010). *Canadian cement plant becomes first to capture CO2 in algae*. Earth and Industry.
- IEA Bioenergy. (1999). *Biogas upgrading and utilization*. Task 24: Energy from biological conversion of organic waste.
- International Institute for Sustainable Development (IISD). (Acceso: 2012). *By-product synergy and industrial ecology*.
- Jungbluth, N., Faist, M., Dinkel, F., Stetter, C., Doka, G., Chudacoff, M., Dauriat, A., Gnansounou, E., Sutter, J., Spielmann, M., Kljun, N., Keller, M., & Scheleiss, K. (2007). Life cycle inventories of bioenergy. *Ecoinvent report No 17*.
- Lardon, A., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J., & Bernard, O. (2009). Life-cycle Assessment of

- biodiesel production from microalgae. *Policy Analysis*, 43, 6475-6481.
- Luiña, R., Álvarez, V., Ortega, F., & Martínez, G. (2012). *Evaluation of the environmental feasibility of using Biogas for bus fletes supply*. Area de Proyectos de Ingeniería, Universidad de Oviedo.
- Lundquist, T.J., Woertz, I.C., Quinn, N.W., & Benemann, J. R. (2010). *A realistic technology an engineering assessment of algae biofuel production*. Energy Biosciences Institute, University of California.
- Mangan, A., Berkebile, R., McLennan, J. F., Svec, W., Sauer, B. J., Schneider, S. H., Mann, R., & Silva, O. (2003). *Kansas City Regional By-Product Synergy Initiative Feasibility Study*. Mid-America Regional Council Solid Waste Management District.
- Marañón, E., Fernández, Y., & Castrillón, L. (2009). *Manual de Estado del Arte de la Co-digestion Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales*. Universidad de Oviedo.
- Network for Business Innovation and Sustainability (NBIS). (2012). *By-product synergy Northwest*.<http://nbis.org/programs/by-product-synergy-nw-2/>
- Persson, M., Jönsson, O., & Wellinger, A. (2006). *Biogas upgrading to vehicle fuel standrs and grid injection*. IEA Bioenergy.
- Sazdanoff, N. (2006). *Modeling and simulation of the Algae to biodiesel fuel cycle*. The Ohio State University, Department of Mechanical Engineering.
- Schleiss, K., & Edelmann, W. (1994). *Stromproduktion aus der Feststoff-Vergärung*. Bundesamt für Energie und Biogasforum Schweiz, Baar.
- Tampier, M., Alabi, A.O., & Bibeau, E. (2009). *Microalgae technologies & processes for biofuels/ bioenergy production in british Columbia: Current technology, suitability & barriers to implementation*. The British Columbia Innovation Council.
- Viessman, W., & Hammer, M.J. (2004). *Water supply and pollution control*. Pearson Pretince Hall. Upper Saddle River, New Jersey.
- Wernick, I., & Ausubel, J. (1997). *Industrial Ecology: Some Directions for Research*. Program for the Human Environment. The Rockefeller University.