



INGENIERÍA QUÍMICA Y TECNOLOGÍA DEL MEDIO
AMBIENTE
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE
ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN
SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS
POR MICROOXIGENACIÓN Y
ENRIQUECIMIENTO EN METANO, Y SU
COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE
DEPURACIÓN DE BIOGÁS
CONVENCIONAL.**

**JAVIER PRIETO LAJO
SEPTIEMBRE 2015**



RUBÉN IRUSTA MATA, profesor/a del Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad de Valladolid

INFORMA:

Que **JAVIER PRIETO LAJO** ha realizado bajo su dirección el Trabajo Fin de Máster titulado **EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS POR MICROOXIGENACIÓN Y ENRIQUECIMIENTO EN METANO, Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL.**

RUBÉN IRUSTA MATA

Valladolid, 10 de septiembre de 2015



Reunido el Tribunal designado por el Comité Académico del Máster en Ingeniería Ambiental, para la evaluación de Trabajos Fin de Máster, y después de estudiar la memoria y atender a la defensa del trabajo **EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS POR MICROOXIGENACIÓN Y ENRIQUECIMIENTO EN METANO, Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL**, presentado por el alumno **JAVIER PRIETO LAJO**, decidió otorgarle la calificación de _____.

El Presidente

El Secretario

FDO:

FDO:

Vocal

Fdo.:

Valladolid, 10 de Septiembre de 2015



Índice de contenidos

1. Motivación y justificación	9
2. Introducción	10
3. Objetivos	12
4. Materiales y métodos	13
I. Apartado energético.	15
II. Tecnología biológica.....	16
a) Unidades de proceso.....	17
b) Fase de montaje (infraestructura)	18
c) Ciclos de vida adicionales.....	20
III. Tecnología convencional	22
a) Unidades de proceso.....	22
b) Fase de montaje (infraestructura)	23
c) Ciclos de vida adicionales.....	25
IV. Métodos de Evaluación de impacto considerados en el estudio de ACV.	26
5. Evaluación de impacto del ciclo de vida y discusión de resultados	29
I. Discusión de resultados.....	30
II. Análisis de mejoras.....	53
III. Análisis de sensibilidad.....	56
6. Conclusiones.....	62
7. Bibliografía	63
8. Anexos	65
1. Cálculos	65
A. Cálculos sobre la tecnología alternativa	65
B. Cálculos tecnología convencional	71



Índice de figuras

Figura 1: Diagrama sobre la introducción de datos a SimaPro	15
Figura 2: Estadística anual del 2014 del mix energético español (Fuente: <i>Oficina Catalana de Cambio climático,2014</i>).....	15
Figura 3: Diagrama del tratamiento con la tecnología biológica.	17
Figura 4: Diagrama del tratamiento con la tecnología convencional	22
Figura 5: Anillos Pall (Fuente: Bauer, F., 2013)	26
Figura 6: Caracterización de los resultados de la tecnología biológica mediante el método del eco indicador 99.....	31
Figura 7: Caracterización de los resultados de la tecnología convencional mediante el método del eco indicador 99.....	34
Figura 8: Comparación de la caracterización de las tecnologías estudiadas mediante el método del eco indicador 99.....	36
Figura 9: Comparación de la normalización de los resultados de las tecnologías estudiadas mediante el método del eco indicador 99.....	37
Figura 10: Caracterización de los resultados de la tecnología biológica mediante el método CML.....	39
Figura 11: Caracterización de los resultados de la tecnología convencional mediante el método CML.....	41
Figura 12: Comparación de la caracterización de los resultados de las tecnologías estudiadas mediante el método CML.....	43
Figura 13: Comparación de la normalización de los resultados de las tecnologías estudiadas mediante el método CML.....	44
Figura 14: Caracterización de los resultados de la tecnología biológica mediante el método CED	46
Figura 15: Evaluación de impacto de los resultados normalizados de la tecnología biológica mediante el método CED	47
Figura 16: Caracterización de los resultados de la tecnología convencional mediante el método CED	49
Figura 17: Evaluación de impacto de los resultados normalizados de la tecnología convencional mediante el método CED.....	50
Figura 18: Comparación de la caracterización de los resultados de las tecnologías estudiadas mediante el método CED.....	51
Figura 19: Comparación de los resultados normalizados de las tecnologías estudiadas mediante el método CED.....	52
Figura 20: Comparación de la caracterización de los resultados de la tecnología convencional con y sin regeneración de carbón activo mediante el método eco indicador 99.....	54
Figura 21: Comparación de la caracterización de los resultados de la tecnología biológica y la convencional con regeneración de carbón activo mediante el método eco indicador 99.....	55
Figura 22: Futuro de la energía renovable por la Universidad de Stanford (EEUU).	56
Figura 23: Comparación de la caracterización de los resultados de la tecnología biológica en 2014 y en 2050 mediante el método eco indicador 99	58
Figura 24: Comparación de la caracterización de los resultados de la tecnología convencional en 2014 y en 2050 mediante el método eco indicador 99	59



Figura 25: Comparación de la caracterización de los resultados de la tecnología convencional con regeneración del carbón activo en 2014 y en 2050 mediante el método eco indicador 99 60

Figura 26: Comparación de la caracterización de los resultados de la tecnología biológica en 2014 y en 2050 mediante el método CED..... 61



Índice de tablas

Tabla 1: Composición del biogás bruto y tratado.	14
Tabla 2: Proceso de enriquecimiento en O ₂ del aire requerido en la tecnología biológica.	18
Tabla 3: Proceso de obtención de hidrogeno requerido en la tecnología biológica.	18
Tabla 4: Proceso de enriquecimiento en metano del biogás requerido en la tecnología biológica.	18
Tabla 5: Generador de oxígeno requerido en la tecnología biológica	19
Tabla 6: Digestor metanogénico requerido para la tecnología biológica	19
Tabla 7: Resto de materiales necesarios para la tecnología biológica, tecnología biológica.	20
Tabla 8: Mantenimiento del digestor anaerobio debido a la eliminación del H ₂ S de la tecnología biológica.	21
Tabla 9: Mantenimiento del digestor metanogénico de la tecnología biológica.....	22
Tabla 10: Proceso de adsorción por carbón activo requerido en la tecnología convencional. ..	23
Tabla 11: Proceso de absorción con water scrubbing requerido en la tecnología convencional.	23
Tabla 12: Diseño depósitos carbón activo requeridos para la tecnología convencional	24
Tabla 13: Características de diseño de los equipos de water scrubbing de la tecnología convencional	24
Tabla 14: Resto de equipos necesarios para operar con la tecnología convencional.....	25
Tabla 15: Ciclo de vida adicional del carbón activo de la tecnología convencional.....	25
Tabla 16: Ciclo de vida adicional del PVC del material de relleno del water scubbing, tecnología convencional	26
Tabla 17: Sustancias que más carga tienen en cada categoría de impacto de la tecnología biológica mediante el método del eco indicador 99 H/A.	30
Tabla 18: Sustancias que más carga tienen sobre cada categoría de impacto de la tecnología convencional mediante el método del eco indicador 99.....	33
Tabla 19: Sustancias que más carga tienen en cada categoría de impacto de la tecnología biológica mediante el método CML	38
Tabla 20: Sustancias que más carga tienen en cada categoría de impacto de la tecnología convencional mediante el método CML	40
Tabla 21: Tabla de corrientes tecnología biológica.....	65



Resumen

Los reactores anaerobios de las plantas depuradoras de aguas residuales son una fuente de biometano, un combustible renovable que, debido a las necesidades energéticas actuales, es muy rentable utilizarlo como fuente de energía. Sin embargo, para poder utilizar este biogás es necesario depurarlo y separar la mayor cantidad posible de los contaminantes que tiene asociados.

En este estudio se ha llevado a cabo el análisis de ciclo de vida (ACV) de dos procesos para la depuración de un biogás de este tipo. Uno de ellos se basa en tecnologías biológicas la microoxigenación para eliminación de H_2S y posterior bioenriquecimiento en metano y, el otro sistema de depuración estudiado se basa en tecnologías convencionales de adsorción con carbón activo para la eliminación de H_2S y posterior absorción del CO_2 mediante water scrubbing. El objetivo de este trabajo va a ser determinar cuáles son los impactos ambientales de estas dos tecnologías y compararlos entre sí para conocer que tecnología origina menos impactos sobre el medio ambiente.

La realización del ACV se ha llevado a cabo mediante el programa informático SimaPro versión 7.2.4 Multi user, este programa permite computar tanto la materia empleada como la energía utilizada y las emisiones al entorno generadas. Referenciando esta información con la bases de datos existentes en programa se podrán analizar comparar dichos sistemas de depuración y determinar qué sistema origina menos impactos en el medio ambiente y evaluar qué etapas del ciclo de vida tienen más peso, con el fin de minimizar su impacto medioambiental con futuras mejoras del proceso.

Una vez completadas todas las entradas y salidas del inventario del ACV se ha llevado a cabo la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida mediante tres métodos de análisis: Eco Indicator 99, CML 2000 Baseline y Cumulative Energy Demand.

Por último, se han interpretado los resultados, pudiéndose concluir que: i) la tecnología convencional origina más impactos ambientales que la tecnología biológica a consecuencia principalmente del carbón activo utilizado en el proceso; ii) el impacto ambiental de la tecnología biológica está principalmente asociado a la demanda de energía del proceso y, por último, iii) los dos procesos son generadores de energía ya que producen más energía (biometano) de la que consumen, sin embargo, en la tecnología biológica se obtiene mucho más biometano por m^3 de biogás bruto a depurar gracias al proceso de enriquecimiento de metano que se lleva a cabo.

Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida; Tecnología Biológica de depuración de gases; Tecnología Convencional de depuración de gases; Biometano; Impacto Ambiental; Depuración de Biogás.



1. Motivación y justificación

Durante el desarrollo del máster se realizó un análisis de ciclo de vida de una planta de tratamiento de vinazas, para ello se utilizó un programa informático llamado Simapro. Este tema me interesó desde el principio porque supone la combinación entre el tema informático, uno de mis hobbies, y el tema ambiental o de la protección del medio ambiente que es mi profesión y una de mis aficiones.

Por otro lado, el tema de las fuentes de energía alternativas cobra cada día mayor importancia por los problemas ambientales asociados al uso de combustibles fósiles, al agotamiento de sus reservas y a su encarecimiento. Entonces, surgió la oportunidad de llevar a cabo al análisis de ciclo de vida (en adelante ACV) sobre alguna de las tecnologías alternativas emergentes de purificación de biogás que se están investigando en el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Valladolid, y compararlas con las tecnologías físico-químicas convencionales.

Posteriormente, se unió al proyecto mi compañera Deisi Fica Schuster que igualmente pensó en realizar su proyecto fin de máster sobre este tema. Entonces, se pensó en realizar un ACV sobre las dos tecnologías emergentes que se están investigando en el Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad de Valladolid, la microoxigenación para eliminación de H_2S y posterior bioenriquecimiento en metano, y un sistema de depuración mediante la utilización simbiótica de microalgas y bacterias, la primera llevada a cabo por mí y el otro sistema desarrollado por mi compañera. Gracias al estudio simultáneo de estas dos tecnologías se va a poder, además de compararlas respecto a la tecnología convencional, compararlas entre sí.



2. Introducción

La sociedad actual precisa de una gran cantidad de energía para satisfacer sus necesidades, para ello es necesario disponer de fuentes de energía alternativas además de las convencionales. Una de estas fuentes que cada vez cobra más importancia es el Biogás, que se genera en el proceso biológico de la digestión anaerobia de materia orgánica.

Las plantas de depuración de biogás generalmente se instalan en zonas donde haya una fuente cercana de este biogás, un ejemplo claro es una planta depuradora de aguas residuales. En su reactor anaerobio se generan gases fruto de la actividad metabólica de los microorganismos, principalmente metano y dióxido de carbono, de los cuáles algunos de ellos, como el metano (CH_4) y el hidrógeno (H_2), son combustibles, obteniéndose energía en el proceso de oxidación. Sin embargo hay otros elementos que son nocivos para el medio ambiente y es conveniente eliminarlos para que no sean emitidos a la atmosfera. Para ello, se han desarrollado una serie de tecnologías para la depuración de estos gases.

Estas tecnologías se pueden clasificar según su grado de desarrollo en convencionales físico-químicas y alternativas o biológicas.

- Las tecnologías convencionales de depuración de biogás: tradicionalmente, se han basado en los siguientes procesos físico-químicos: la absorción, la adsorción, la condensación y los procesos con membranas. Son las tecnologías más desarrolladas y las más utilizadas.

Estas tecnologías suelen ser más eficientes para grandes caudales de gases y suelen producir menos cantidad de residuos. Sin embargo, éstos tienen un carácter más peligroso y han de ser gestionados de forma especial y además se emplea una gran cantidad de sustancias químicas.

- Las tecnologías alternativas de depuración de biogás: han empezado a desarrollarse más recientemente, siendo a partir de los años ochenta cuando empezaron a usarse sobre todo para la obtención de caudales pequeños de biogás. Estas tecnologías se basan en la utilización de determinados tipos de seres vivos (bacterias o algas) para eliminar las sustancias nocivas o contaminantes contenidas en este biogás. Estos organismos fijan estas sustancias, las emplean en sus metabolismos o las transforman en otras aprovechables (metano).

Además los procesos biológicos presentan generalmente una serie de ventajas: como son la producción de residuos menos peligrosos, el menor empleo de productos químicos, una mayor producción de biogás por metro cúbico de gas tratado, etc. Sin embargo, también presentan una serie de problemas como es el menor grado de desarrollo, y en consecuencia la falta de optimización para el tratamiento de caudales grandes.

Actualmente, según el último informe presentado en 2012 por la EBA (European Biogas Association), la primera potencia europea en este sector es Alemania, alcanzando las 8700 plantas de producción de biogás. Además en países como Reino Unido, Francia, o Italia ha experimentado un gran crecimiento [European Biogas Association, 2012].



En España la producción de biogás industrial es bastante discreta, situándose en el puesto 22 de los 28 países que conforman la Unión Europea. Esto puede ser debido a la falta de incentivos a las nuevas instalaciones de energías renovables y a las limitaciones al autoconsumo.

Aproximadamente el 90% del biogás producido en nuestro país proviene de vertederos y depuradoras. Últimamente también se está impulsando el uso de desechos agrícolas como materia prima para la obtención de este recurso (Twenergy, 2015).



3. Objetivos

En la actualidad, las tecnologías biológicas o alternativas de depuración de biogás están ganando terreno a las convencionales, sobre todo para bajos caudales de biogás. Estas se promocionan como más respetuosas con el medio ambiente o con un impacto ambiental más pequeño que las físico-químicas. Pero, ¿Esto hasta qué punto es verdad?

En el siguiente proyecto, se pretende determinar el impacto ambiental asociado a un de tecnología alternativa (la microoxigenación para eliminación de H_2S y posterior bioenriquecimiento en metano) y la tecnología convencional más utilizada (adsorción con carbón activo para la eliminación de H_2S y posterior absorción del CO_2 mediante water scrubbing) y se van a comparar dichos impactos entre sí para saber hasta qué punto sería más adecuado, ambientalmente hablando, el empleo de una u otra tecnología.

Paralelamente a este proyecto, se va ha llevado a cabo por parte de mi compañera Deisi Fica Schuster otro estudio similar comparando otro tipo de tecnología biológica basada en un proceso simbiótico de microalgas y bacterias, y dicha tecnología convencional.

Este trabajo paralelo ofrece la posibilidad de comparar, además, las dos tecnologías alternativas entre sí.



4. Materiales y métodos

Para llevar a cabo la determinación del impacto ambiental de estas tecnologías y su comparación, se van a realizar diferentes estudios del Análisis de Ciclo de Vida de cada una de ellas con el programa informático SimaPro 7, versión 7.2.4.

“SimaPro es una herramienta profesional para el cálculo de los impactos ambientales, sociales y económicos, asociados a una producto o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida, con aplicación al ecodiseño, al desarrollo de ecoetiquetas, al cálculo de huellas de carbono o huellas hídricas, entre otros.” (SimaPro,2015).

Los análisis de ciclo de vida incluyen el ciclo completo de cada tecnología teniendo en cuenta desde sus etapas de extracción y transformación de materias primas, proceso de materiales, distribución, uso y por último el fin de su vida útil o su disposición final.

Por lo tanto, con los siguientes análisis del ciclo de vida se van a poder cuantificar las cargas ambientales asociadas a cada sistema de depuración, computando tanto la materia empleada como la energía utilizada y las emisiones al entorno generadas. Con esta información se podrán comparar dichos sistemas de depuración y extrapolar qué sistema es más respetuoso con el medio ambiente y evaluar qué etapas del ciclo de vida tienen más peso, con el fin de minimizar su impacto medioambiental con futuras mejoras del proceso.

Gracias a este programa y a sus completas y extensas bases de datos se pueden analizar con un alto grado de detalle todas las operaciones unitarias de los procesos objeto de estudio. Habrá algunos procesos en los que se puedan utilizar las bases de datos de SimaPro, y otros en los que habrá que modificar y adaptar estas bases de datos del programa al caso concreto de este estudio. Por último, habrá procesos cuyas bases de datos deberán crearse completamente para hacer el análisis lo más real posible.

En primer lugar, se ha llevado a cabo un aprendizaje, no reflejado en este documento, para conocer de forma general la tecnología biológica de depuración objeto de este TFM cuya evaluación ambiental va a realizarse con ayuda de la aplicación informática SimaPro. Para profundizar en el conocimiento de la tecnología de la microoxigenación de H_2S y enriquecimiento en metano del biogás bruto se ha contado con la ayuda del investigador Israel Díaz Villalobos, que está trabajando en proyectos de investigación relacionados con dichas tecnologías alternativas. Para conocer mayores detalles de la tecnología convencional, se ha contado con la ayuda del profesor Raúl Muñoz, experto en tecnologías de depuración de gases. En este caso se ha optado para la depuración convencional de biogás una adsorción con carbón activo para eliminar el H_2S , y una absorción con water scrubbing para eliminar físicamente el CO_2 del gas, ya que son las tecnologías más utilizadas.

Ambos sistemas de depuración del biogás, convencional y alternativo, se han dimensionado para un caudal aproximado de $500 \text{ Nm}^3/\text{h}$. En la tabla 1 se indica la composición media del biogás bruto a depurar y del biogás depurado para hacerlo apto como biocombustible una vez introducido en la Red Nacional de Biogás (Boletín Oficial del Estado, 2013)

**Tabla 1: Composición del biogás bruto y tratado.**

Biogás	CO ₂ (%vol)	H ₂ S (%vol)	O ₂ (% vol)	N ₂ (% vol)	CH ₄ (% vol)	NH ₄ (mg/NL)	Benceno (mg/Nm ³)	Tolueno (mg/Nm ³)	Siloxanos (ppm)
Sin tratar	34	0,5	0,1	0,4	65	45,25	0,3	5	10
Tratado	1,2	0,0	0,0	2,1	96,7	0	0	0	10

La unidad funcional (UF) definida en este proyecto ha sido 1 Nm³ de biogás bruto a depurar, esta unidad es la cuantificación de las salidas funcionales de un sistema (Comité Europeo de Normalización. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y estructura. 1997). Se ha escogido esta unidad funcional para proporcionar la misma unidad de referencia para todas las entradas y salidas con el fin de asegurar la máxima comparabilidad de los resultados y que éstos tengan unos valores abarcables y de fácil comprensión.

Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios deberán incluirse dentro del ACV y cuáles no. Este estudio en particular incluye en su análisis la fase de construcción de la planta de depuración de biogás y la fase de operación de ésta por un período de 20 años; no se considerará la etapa de desmantelamiento.

Los investigadores de cada tecnología alternativa nos han facilitado una tabla de corrientes y un diagrama orientativo de proceso, para el caudal y composición del biogás fijado. Dicha bibliografía se encuentra en el apartado de los anexos y de la tecnología biológica.

Los datos primarios suministrados y los secundarios derivados de éstos se han volcado al programa SimaPro.

Para la introducción de los datos a SimaPro, se ha seguido un proceso que se puede esquematizar en los siguientes pasos:

1. En primer lugar, se lleva a cabo un primer estudio de las dos tecnologías:
 - a. Se realiza el estudio y el análisis del diagrama de flujo y la tabla de corrientes facilitada por el investigador sobre su tecnología.
 - b. Se elabora el diseño y el análisis de la tecnología convencional para tratar el caudal de biogás que se ha fijado.
2. En segundo lugar, se aísla y se identifica cada proceso y se establecen las entradas y salidas que tienen en función de la información que se dispone. Dentro de cada entrada o salida, se analiza su composición y naturaleza de cara a la inclusión de este parámetro en el programa.
3. En tercer lugar, dentro del programa se actualiza la base de datos existente sobre el mix energético español ya que este factor va a ser muy determinante en el futuro análisis. Para ello, se busca el mix energético actual y se modifica la base de datos del programa.
4. En cuarto lugar, se separan los procesos o entidades en función de si pertenece a la propia infraestructura de la planta, si es parte de la operación normal o si está asociado a un proceso de limpieza, mantenimiento o recambio de dicha instalación. Las entradas relacionadas con la construcción de la planta están dentro de un apartado separado, éste a su vez tiene un subapartado para cada tecnología. Por otro lado, se crea otro apartado llamado “unidades de proceso” para cada tecnología

donde se introducen las entradas relacionadas con los procesos de funcionamiento en estacionario, y por último, se crean los ciclos de vida adicionales dónde se recogen las operaciones de mantenimiento y limpieza de cada planta y los recambios que son necesarios para el desarrollo óptimo de las tecnologías estudiadas.

5. En quinto lugar, una vez están los apartados divididos y sus diferentes procesos creados, se va a ir completando cada proceso particular con cada entrada y salida. Estas son recursos, materiales o combustibles o electricidad o calor, que en primer lugar se buscan en la base de datos del programa y si no se encuentra una que pueda ser válida para el caso de estudio, se modifica una entrada existente o se crea una entrada nueva.
6. En sexto lugar y por último, se lleva a cabo el análisis de ciclo de vida en el programa con el método de evaluación de impacto que se estime oportuno, éste genera una serie de gráficas, tablas, árboles de datos, etc. que se analizan y se comentan para para explicar y contextualizar los datos que el programa proporciona.

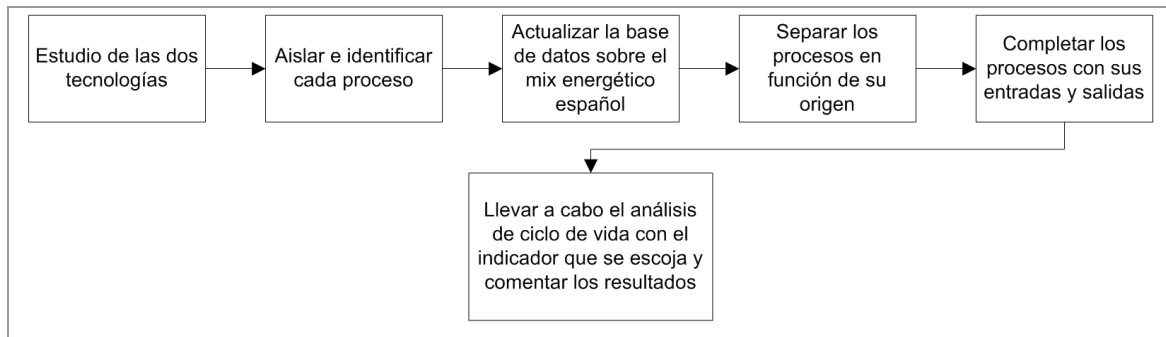


Figura 1: Diagrama sobre la introducción de datos a SimaPro

I. Apartado energético.

Dada la importancia que se sospechaba que podía a tener en los resultados finales, en primer lugar se ha actualizado la entrada sobre las características de la energía utilizada en España. Para ello se ha basado en la entrada existente en el programa, mix energético español del 2007 de la base de datos de Ecoinvent. Hemos actualizado la base de datos con la estadística anual del año 2014 de la Oficina Catalana del Cambio climático que podemos ver en la figura 2.

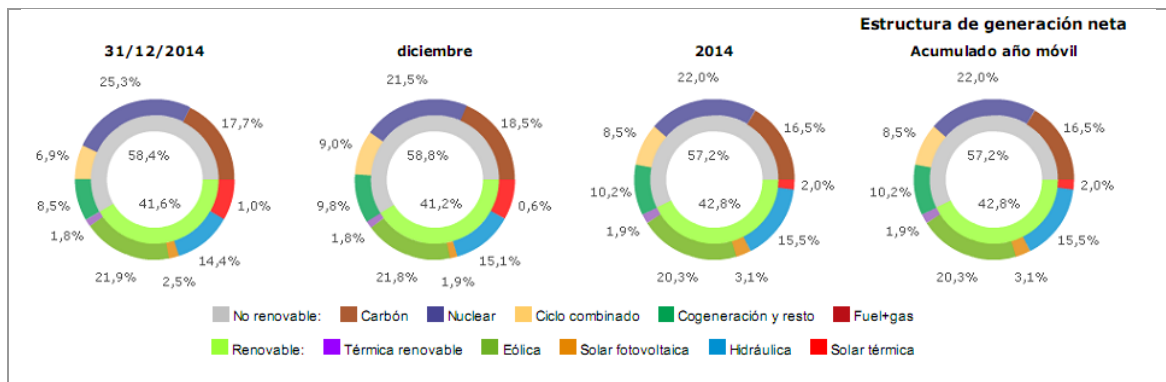


Figura 2: Estadística anual del 2014 del mix energético español (Fuente: Oficina Catalana de Cambio climático, 2014)

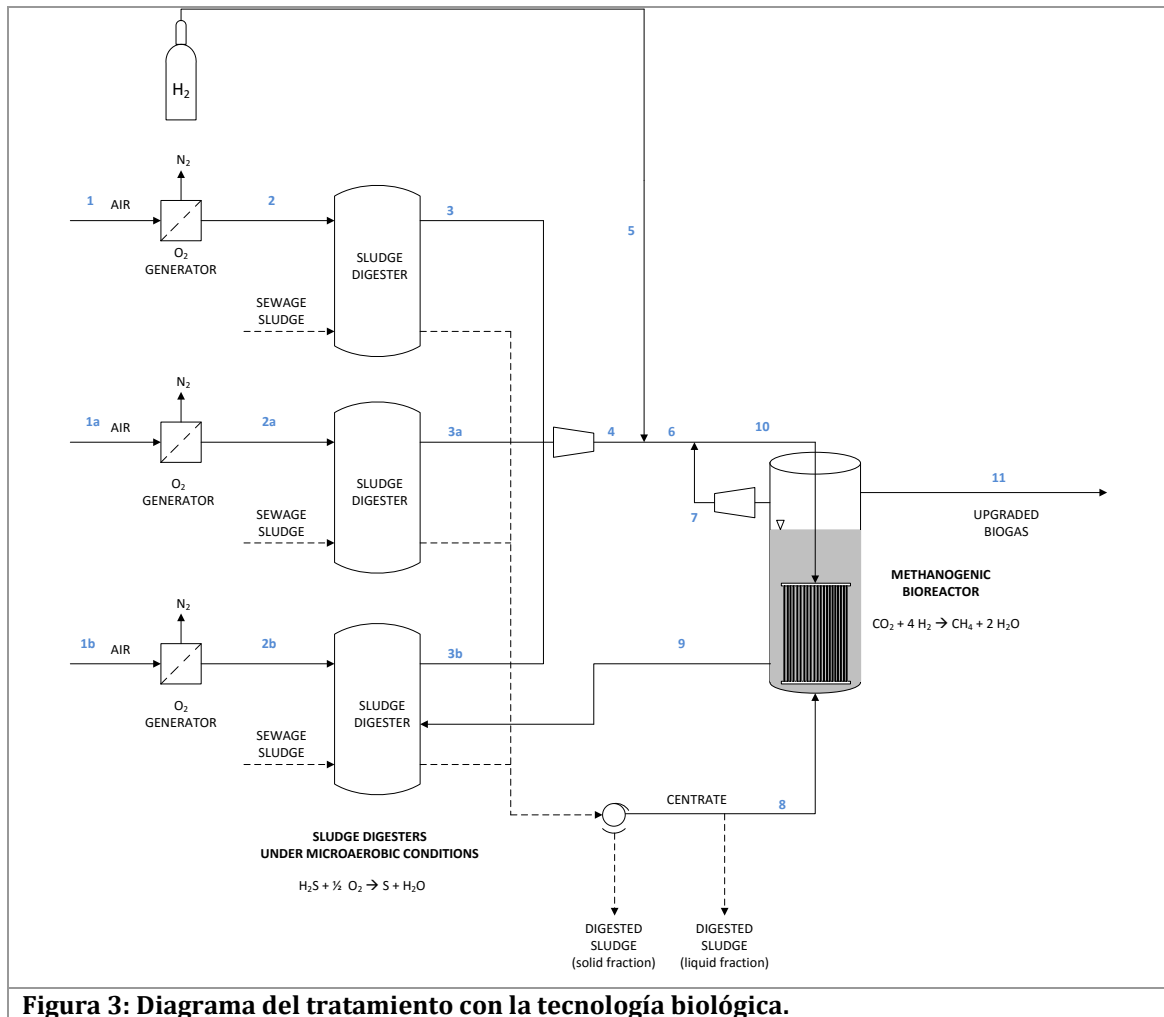


Una vez creada y modificada esta entrada, se procede a ir introducir en las diferentes tecnologías sus gastos energéticos asociados referenciando siempre con la energía de medio y bajo voltaje que se ha introducido.

Con el apartado energético se ha tenido un gran miramiento para hacerlo lo más realista posible ya que, a priori, podría ser uno de los apartados más determinantes en los impactos de las diferentes tecnologías. De esta forma, en el análisis de cada tecnología estará contabilizado implícitamente el consumo eléctrico penalizando a las que requieren más energía en su proceso.

II. Tecnología biológica

En la figura 3 se muestra el diagrama de flujo del proceso de depuración biológica de biogás que se ha considerado para el diseño de la tecnología biológica. En primer lugar, el biogás que se produce en los digestores anaeróbicos (sludge digester) sufre una microoxidación (con oxígeno al 95% procedente de los generadores de oxígeno (O_2 generator) para transformarse en H_2S en azufre elemental que se fijará a las paredes del digestor. Seguidamente, el biogás desulfurado, previamente calentado, se mezcla con H_2 y alimenta un reactor metanogénico (Methanogenic bioreactor) donde bacterias metanogénicas obtenidas del fango de los digestores anaerobios transforman el CO_2 del biogás en biometano con la calidad suficiente para introducirlo en la red de gas natural nacional. Para conseguir alcanzar los niveles de pureza del biogás tratado, en este último reactor, habrá una pequeña recirculación. Para el diseño y la configuración de este sistema se han seguido las indicaciones recogidas en el trabajo de Díaz et al. (2015).



a) Unidades de proceso

Centrándose en las tecnologías que se van a estudiar, presumiblemente el apartado que más carga ambiental va a tener en el futuro análisis van a ser las diferentes necesidades y los productos y los residuos que genere cada tecnología funcionando en estacionario.

Para poder identificar los flujos de materia y energía de cada unidad de proceso es necesario apoyarse un balance de materia y un flujo de corrientes.

Por lo tanto, para analizar este sistema se han introducido las siguientes entradas en SimaPro:

- A. Proceso de purificación de oxígeno: En el reactor anaerobio introducimos oxígeno al 95% de pureza para se produzca la siguiente reacción: $2H_2S + O_2 \rightarrow S_2 + 2H_2O$. Se va a utilizar aire enriquecido porque los rendimientos son mejores, sin embargo, este proceso trae consigo un consumo energético y unas emisiones de nitrógeno a la atmósfera. Estos datos se pueden ver más detalladamente en la tabla 2. Además este equipo necesita un mantenimiento de los filtros, sondas, actuadores y válvulas de control que lleva, sin embargo, ya que el caudal tratado es alto y la frecuencia de sustitución relativamente baja (> 1 año), se puede considerar despreciables estos datos.

**Tabla 2: Proceso de enriquecimiento en O₂ del aire requerido en la tecnología biológica.**

Proceso de enriquecimiento de O ₂ del aire	Valor introducido al programa	Bases de datos
Consumo energético del generador de oxígeno	$4,88 \times 10^{-3}$ kJ/UF	Mix energético español 2014 (Elaboración propia de la base de datos).
Emisiones de nitrógeno en el generador de O ₂	0,02 kg/UF	Base de datos Ecoinvent de SimaPro.

- B. Proceso de obtención de hidrogeno: Es necesario la introducción de hidrógeno en el proceso del enriquecimiento de metano para que, las bacterias metanogénicas lleven a cabo la siguiente reacción: $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$. Este hidrógeno será de origen electrolítico (tabla 3).

Tabla 3: Proceso de obtención de hidrogeno requerido en la tecnología biológica.

Proceso de obtención de hidrogeno	Valor introducido al programa	Bases de datos
hidrógeno electrolítico	0,12 kg H ₂ /UF	Base de datos Ecoinvent de SimaPro.

- C. Proceso de enriquecimiento de metano: En el proceso de metanogénesis se produce un biogás rico en metano, que será introducido en la Red Nacional de Biogás para su futuro uso como fuente de energía en sustitución del gas natural. Se ha diseñado este reactor para que el biogás enriquecido en biometano cumpla la legislación para su entrada a dicha red. Por otro lado, este proceso tiene asociado un consumo energético alto ya que el sistema se compone de varias bombas, soplantes y compresores y un intercambiador de calor. Se pueden ver más detalladamente los valores introducidos en la tabla 4.

Tabla 4: Proceso de enriquecimiento en metano del biogás requerido en la tecnología biológica.

Proceso de enriquecimiento en metano	Valor introducido al programa	Bases de datos
Energía producida por el biogás	38180,90 kJ/UF	Base de datos Ecoinvent de SimaPro.
Consumo eléctrico del equipo metanogénico	0,12 kWh/UF	Mix energético español 2014 (Elaboración propia de la base de datos).

b) Fase de montaje (infraestructura)

El apartado de construcción de la planta de biogás tiene que ser también tenido en cuenta. La carga que presumiblemente tendrá en el análisis de impacto ambiental será bajo ya que, comparado con los impactos que supondrán los procesos durante los 20 años de vida útil, la construcción de la infraestructura y los diferentes equipos tiene una importancia ambiental relativamente baja.



Con la información facilitada por I. Díaz y los conocimientos adquiridos sobre esta tecnología se han incluido las siguientes entradas del sistema en la aplicación SimaPro, para realizar el análisis de impacto ambiental:

- A. Generador de oxígeno: Se necesita un equipo generador de oxígeno al 95% para su introducción en el digestor anaerobio y mejorar la eficacia del proceso, para ello, se ha adaptado la entrada de un generador de la base de datos del programa. Además, también se ha introducido un compresor, ya que dicho equipo tiene asociado un compresor Parise de 10 Bar y 5,5 kW (tabla 5).

Generador de oxígeno	Valor introducido al programa	Bases de datos
Generador de oxígeno	Equipo comercial	Adaptación de la base de datos Ecoinvent de SimaPro.
Compresor del generador de oxígeno	Equipo comercial de 5,5 kW	Adaptación de la base de datos Ecoinvent de SimaPro.

- B. Digestor metanogénico: Para el tratamiento del caudal que se ha definido se va a necesitar un digestor metanogénico de un volumen de al menos 415 m³, para construirlo se va a emplear 518,36 m³ de cemento, siendo sus dimensiones las que se recogen en la tabla 6.

Digestor metanogénico	Valor de diseño	Bases de datos
Construcción de digestor metanogénico	Altura= 6 m Diámetro= 10 m Espesor= 1,5 m Volumen útil= 415m ³ Volumen de cemento necesario= 518,36 m ³	Base de datos Ecoinvent de SimaPro.

- C. Compresores, bombas y tuberías: Se han considerado los equipos que se indican a continuación y que se recogen en la tabla 7.
- Soplante: Para aumentar la presión a la entrada del reactor metanogénico, para su inclusión en el programa se ha modificado la entrada de un pequeño compresor añadiendo las entradas necesarias según bibliografía.
 - Cambiador de calor: Es necesario un intercambiador de calor para calentar el gas a la entrada del reactor metanogénico para aumentar su rendimiento.
 - Compresor/bombas asociadas al equipo metanogénico: Para el proceso de metanización del CO₂ se necesita un compresor y las bombas que se detallan a continuación.
 - i. Bomba de recirculación.
 - ii. Bomba de introducción de centrate.
 - iii. Bomba de salida de centrate.



- Tuberías y válvulas: Para la introducción de este valor en el programa, se ha tomado el dato de tuberías y válvulas necesarias (*facilitado por Israel Díaz*), se ha calculado el acero inoxidable necesario para la construcción de dichos metros de tuberías y dicho número de válvulas y se ha introducido al programa teniendo en cuenta además, el torneado de dichos elementos.
- Terreno ocupado: Se ha estimado la superficie que va a ser necesaria transformar, adaptar y ocupar durante el periodo de funcionamiento de la planta. Se ha supuesto que inicialmente los campos utilizados estaban dedicados al cultivo de pastizales. La futura planta dispondrá de espacios verdes anexos a la zona ocupada por la planta.

Tabla 7: Resto de materiales necesarios para la tecnología biológica, tecnología biológica.		
Resto de equipos/materiales necesarios para la tecnología biológica	Valor de diseño	Bases de datos
GENERADOR DE OXÍGENO		
Generador de oxígeno	Equipo comercial	Adaptación de la base de datos Ecoinvent de SimaPro.
Compresor del generador de oxígeno	Equipo comercial de 5,5 kW	Adaptación de la base de datos Ecoinvent de SimaPro
EQUIPO DEL DIGESTOR METANOGÉNICO		
Intercambiador de calor	Equipo comercial de 50 kW	Adaptación de la base de datos Ecoinvent de SimaPro.
Compresor	Equipo comercial de 15 kW	Adaptación de la base de datos Ecoinvent de SimaPro
Bomba de recirculación	Equipo comercial de 2,5 kW	Adaptación de la base de datos Ecoinvent de SimaPro.
Bomba de inyección del centrate	Equipo comercial de 0,5 kW	Adaptación de la base de datos Ecoinvent de SimaPro
Bomba de salida del centrate	Equipo comercial de 0,5 kW	Adaptación de la base de datos Ecoinvent de SimaPro.
TUBERÍAS Y VÁLVULAS		
Pack de tuberías y válvulas	1963,39 kg de acero inoxidable 25 kg de turning de acero inoxidable	Base de datos Ecoinvent Idemat 2001 de SimaPro.
TRANSFORMACIÓN DEL TERRENO		
Terreno ocupado	1500 m ² zona industrial de construcción 500 m ² zona industrial verde	Base de datos Ecoinvent de SimaPro.

c) Ciclos de vida adicionales

En este tipo de estudios, se denominan ciclos de vida adicionales a aquellas sustancias, recambios o conjuntos de operaciones que hay que realizar o incorporar cada un cierto tiempo, normalmente corto, para que el sistema funcione correctamente. Las sustancias de las que se componen estos ciclos de vida sufren el mismo proceso que las sustancias del ciclo de vida de la tecnología que en la que se incorporan. Primero se elaboran, luego se transportan y se usan en nuestro sistema y, por último, se desechan. Los impactos generados por estos ACV



adiciones serán contabilizados dentro del análisis de ciclo de vida de la tecnología donde se emplean.

A efectos del programa, la introducción estos ciclos de vida se lleva a cabo de una forma similar y paralela a la del ACV principal siguiendo el mismo esquema y los mismos pasos.

En este caso, estos ciclos de vida están asociados a operaciones de limpieza y mantenimiento de los reactores implicados. En los siguientes apartados se van a ver de forma más detallada las operaciones que se han mencionado:

- A. Mantenimiento del digestor anaerobio debido a la eliminación del H₂S: En el reactor anaerobio se produce la transformación del sulfuro de hidrógeno a azufre elemental y éste se deposita en las paredes del reactor. Por ello, se debe llevar a cabo un mantenimiento en el reactor para eliminar la cantidad de azufre que se haya depositado, y éste posteriormente deberá ser gestionado. Este residuo no limita la actividad en el reactor en un tiempo inferior al de su periodo de mantenimiento normal, por ello, no será necesario llevar a cabo estas labores con mayor frecuencia y quedaría fuera de los límites de este ACV, con la excepción de los gastos y consumos asociados a la eliminación de este azufre. Los parámetros que se han introducido al programa son los que se detallan en la tabla 8.

Tabla 8: Mantenimiento del digestor anaerobio debido a la eliminación del H₂S de la tecnología biológica.

Mantenimiento del digestor debido a la eliminación de H₂S	Valor introducido al programa	Bases de datos
Acumulación de azufre en el reactor.	$3,42 \times 10^{-5}$ kg de azufre/UF	Base de datos Ecoinvent de SimaPro.
Nitrógeno para inertizar el reactor	$1,41 \times 10^{-4}$ kg N ₂ /UF	Base de datos Ecoinvent de SimaPro.
Consumo energético para inertizar el reactor	$1,36 \times 10^{-3}$ kWh/UF	Mix energético español 2014 (Elaboración propia de la base de datos).

- B. Mantenimiento del digestor metanogénico: El mantenimiento del reactor metanogénico es escaso, solamente hay que sustituir regularmente el filtro del compresor y sustituir la membrana interior del reactor que sirve como soporte para la reacción cada aproximadamente 3 años. Dicha membrana está hecha de polifluoruro de vinilideno (PVDF), este tipo de termoplástico no está recogido dentro de la base de datos del programa por lo que se ha considerado otro material similar (etileno vinilo acetato o EVA) y se han añadido los recursos necesarios adicionales para fabricar el PVDF (monocloropentafluoroetano). Además, esta membrana está provista de un soporte de acero inoxidable y una carcasa de PET que hay que sustituir cuando se repone la membrana. En la tabla 9 se pueden ver más detalladamente los valores introducidos en el programa.

Tabla 9: Mantenimiento del digestor metanogénico de la tecnología biológica.		
Mantenimiento del digestor metanogénico	Valor introducido al programa	Bases de datos
PVDF de la membrana del reactor metanogénico	$2,13 \times 10^{-4}$ kg PVDF/UF	Adaptación de la base de datos Ecoinvent de SimaPro.
Soporte de la membrana del reactor metanogénico	$8,78 \times 10^{-5}$ kg de acero inoxidable/UF	Base de datos Idemat 2001 de SimaPro.
Carcasa de la membrana del reactor metanogénico	$3,75 \times 10^{-5}$ kg PET/UF	Base de datos Idemat 2001 de SimaPro.

III. Tecnología convencional

En la figura 4 se muestra el diagrama de flujo del proceso de depuración de biogás que se ha considerado para el diseño de la tecnología convencional. En primer lugar, el biogás pasa por una etapa de adsorción de H₂S sobre carbón activo que se produce en dos tanques de adsorción (Tanque CA 1 y Tanque CA 2); seguidamente, el biogás desulfurado alimenta una columna de lavado (Columna de absorción) para absorber el CO₂ del biogás. Por otro lado, el agua de lavado se descomprime en una torre de flash (Columna flash) para recuperar los componentes volátiles del biogás y finalmente el agua enriquecida con CO₂ pasa por una torre de desorción (Columna de desorción) para eliminar el CO₂ absorbido y recircular el agua a la torre de absorción. Para el diseño y la configuración de este sistema se han seguido las indicaciones recogidas en el trabajo de Muñoz et al, (2015).

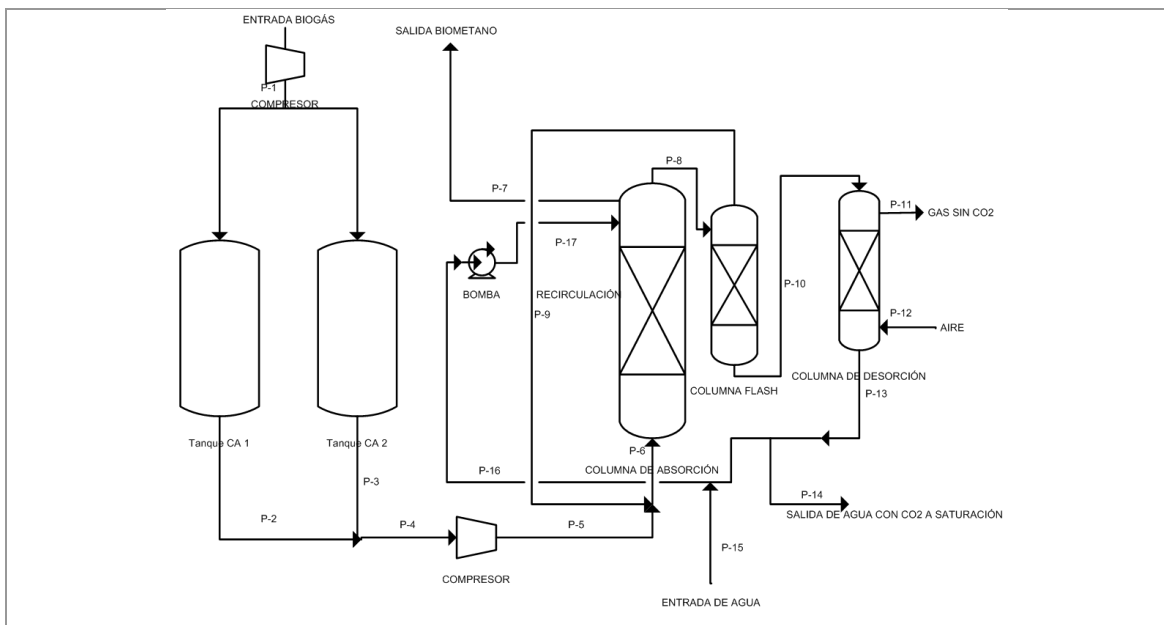


Figura 4: Diagrama del tratamiento con la tecnología convencional

a) Unidades de proceso

Seguidamente se cuantifican y explican con más detalle los principales insumos y emisiones de las operaciones unitarias que configuran el sistema de depuración convencional previamente descrito:



- A. Proceso de adsorción con carbón activo: Para la eliminación del sulfuro de hidrógeno se emplea carbón activo como adsorbente. El sistema se compone de 2 tanques de fibra de vidrio; mientras uno está en funcionamiento, el otro se recarga y permanece cargado y preparado para comenzar a operar cuando el otro agote la capacidad de adsorción del carbón activo. En la tabla 10 se muestra el consumo energético asociado a este proceso.

Tabla 10: Proceso de adsorción por carbón activo requerido en la tecnología convencional.

Proceso de adsorción por carbón activo	Valor introducido al programa	Bases de datos
Consumo de energía del compresor.	$6,74 \times 10^{-3}$ kWh/UF	Mix energético español 2014 (Elaboración propia de la base de datos)

- B. Proceso de absorción con water scrubbing: En este proceso se absorbe selectivamente el CO₂ contenido en el biogás y se obtiene un biogás depurado listo para ser inyectado a la Red Nacional de biogás. Además, para que el rendimiento de esta operación sea óptimo se deberá aumentar la presión a 8 bares. Por lo tanto, las entradas y salidas que se van a producir en esta operación unitaria son principalmente agua y energía (tabla 11):

Tabla 11: Proceso de absorción con water scrubbing requerido en la tecnología convencional.

Proceso de absorción con water scrubbing	Valor introducido al programa	Bases de datos
Energía producida por el biogás	25853,45 kJ/UF	Base de datos Ecoinvent de SimaPro.
Consumo de agua	2×10^{-4} m ³ de agua/UF	Base de datos Ecoinvent de SimaPro.
Consumo de energía	0,2 kWh/UF	Mix energético español 2014 (Elaboración propia en la base de datos).
Emisión de agua residual	2×10^{-4} m ³ de agua residual/UF	Base de datos Ecoinvent de SimaPro.
Emisión del CO ₂ disuelto en el agua residual del water scrubbing.	0,66 kg de CO ₂ biogénico/UF	Base de datos Ecoinvent de SimaPro.

b) Fase de montaje (infraestructura)

Al igual que para la tecnología biológica, en este apartado se detalla el inventario de recursos correspondientes a la construcción de la infraestructura y de los diferentes equipos necesarios durante la vida útil de la planta. (En el programa se SimaPro, estos valores se referencian a la Unidad Funcional adoptada, 1 Nm³ de biogás bruto a depurar).

- A. Depósitos para la adsorción con carbón activo: Dos depósitos de fibra de vidrio de 200 m³ de volumen para los que se precisan 978 kg de fibra. En la tabla 12 se pueden ver con más detalle los valores de diseño que se han tomado.



Tabla 12: Diseño depósitos carbón activo requeridos para la tecnología convencional

EQUIPO DE ADSORCIÓN POR CARBÓN ACTIVO	Valor de diseño	Bases de datos
2 Depósitos para el carbón activo	Altura= 2 m Diámetro= 11,3 m Volumen útil= 100 m ³ Volumen de diseño= 200 m ³ Cantidad de fibra de vidrio total= 978 kg	Base de datos Ecoinvent o SimaPro.

B. Depósitos para el water scrubbing: Tres depósitos, uno para la columna de absorción, otro para la columna de desorción y otro para la columna flash. En este caso van a ser de acero para evitar problemas con la presión y corrosión. La capacidad de estas columnas será de al menos de 10 m³ para la columna de absorción y de 5 m³ para las otras dos necesitando un total de aproximadamente 3090 kg de acero. En la tabla 13 se recoge el dimensionamiento de estos equipos.

Tabla 13: Características de diseño de los equipos de water scrubbing de la tecnología convencional

EQUIPO DE ABSORCIÓN POR WATER SCRUBBING	Valor de diseño	Bases de datos
Columna de absorción	Altura= 2 m Diámetro= 2,52 m Volumen útil= 8,3 m ³ Volumen de diseño= 10 m ³ Cantidad de acero inoxidable= 1290 kg	Base de datos Idemat 2001 o SimaPro.
Deposito flash y columna de desorción	Altura= 1 m Diámetro= 2,52 m Volumen útil= 4,15 m ³ Volumen de diseño= 5 m ³ Cantidad de acero inoxidable= 1800 kg	Base de datos Idemat 2001 o SimaPro.

- C. Resto de equipos necesarios para la tecnología convencional (Tabla 14):
- Compresor para la columna de carbón activo de 4 kW: para bombear el biogás dentro del lecho de carbón activo.
 - Compresor para el water scrubbing: Necesario para mantener una presión de 8 bares en los depósitos del sistema.
 - Bomba de recirculación del water scrubbing: necesario para llevar a cabo una recirculación de la columna de desorción a la de absorción para aumentar el rendimiento del proceso.
 - Tuberías y válvulas: Como en el caso de la tecnología biológica, se ha calculado el acero inoxidable necesario para la construcción de los metros de tuberías y el número de válvulas que se estiman necesarios.
 - Terreno ocupado: Se ha estimado la superficie que va a ser necesaria transformar, adaptar y ocupar durante el periodo de funcionamiento de la



planta. Se ha supuesto que inicialmente los campos utilizados estaban dedicados al cultivo de pastizales. La futura planta dispondrá de espacios verdes anexos a la zona ocupada por la planta.

Tabla 14: Resto de equipos necesarios para operar con la tecnología convencional.		
Resto de equipos para la tecnología convencional	Valor de diseño	Bases de datos
EQUIPO DE ADSORCIÓN POR CARBÓN ACTIVO		
Compresor	Equipo comercial de 4 kW	Adaptación de la base de datos Ecoinvent de SimaPro.
EQUIPO DE ABSORCIÓN POR WATER SCRUBBING		
Compresor	Equipo comercial de 200 kW	Adaptación de la base de datos Ecoinvent de SimaPro.
Bomba de recirculación	Equipo comercial de 0,5 kW.	Adaptación de la base de datos Ecoinvent de SimaPro.
TUBERÍAS Y VÁLVULAS		
Pack de tuberías y válvulas	2135,55 kg de acero inoxidable. 33 kg de turning de acero inoxidable.	Base de datos Ecoinvent Idemat 2001 de SimaPro.
TRANSFORMACIÓN DEL TERRENO		
Terreno ocupado.	2500 m ² zona industrial de construcción, 1000 m ² zona industrial verde.	Base de datos Ecoinvent de SimaPro.

c) Ciclos de vida adicionales

Atendiendo a la explicación que se ha llevado a cabo en el apartado homólogo de la tecnología biológica sobre los ciclos de vida adicionales, se han establecido los siguientes ACV adicionales para la tecnología convencional:

- A. Carbón activo: Los depósitos de carbón activo tienen un volumen de 100 m³ que habrá que sustituir cada 51 días aproximadamente. Después de la utilización dicho carbón se llevará a incinerar para eliminar su toxicidad y peligrosidad y convertirlo en un residuo inerte. Este proceso conllevará importantes costes ambientales por su gran cantidad y sus fuertes emisiones a la atmósfera. En la tabla 15 se pueden ver los consumos de este material adsorbente (Hjaila, K, 2013).

Tabla 15: Ciclo de vida adicional del carbón activo de la tecnología convencional.		
Ciclo de vida adicional del carbón activo	Valor introducido al programa	Bases de datos
Consumo de carbón activo.	450000 kg de carbón activo/recambio de lecho.	Elaboración propia de la base de datos

- B. PVC del material de relleno del water scrubbing: Para aumentar la superficie de contacto y por tanto la eficacia, se va a rellenar el lecho con Anillos Pall como los que se muestran en la figura 5; estos anillos deberán ser sustituidos cada 10 años. Como el

volumen es de lecho de 8,3 m³ se necesitarán sustituir 11454 kg de PVC en cada recambio (tabla 16).



Figura 5: Anillos Pall (Fuente: Bauer, F., 2013)

Tabla 16: Ciclo de vida adicional del PVC del material de relleno del water scrubbing, tecnología convencional

Ciclo de vida adicional del lecho de water scrubbing	Valor de diseño	Bases de datos
PVC del material de relleno del water scrubbing	11454 kg de PVC/recambio.	Adaptación de la base de datos Idemat 2001 de SimaPro.

IV. Métodos de Evaluación de impacto considerados en el estudio de ACV.

Los métodos de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV) empleados para llevar a cabo el presente estudio de ACV han sido:

- **Método Eco-indicator 99**, versión jerárquica (H), ponderación promediada (A).

Modeliza el daño ambiental mediante el análisis de destino de las emisiones, exposición, análisis de efectos, y finalmente, análisis de daños.

Éste es el método predeterminado y recomendado por defecto para el Eco-indicator 99 (Eco-indicator 99 H/A). En él se consideran tres categorías de daño (Copperalliance. 2015):



- Daño a la Salud Humana (SH): Esta categoría de daño se expresa en *Dissability Adjusted Life Years* (DALY), y se corresponde con los años de vida promediados de indisposición que una determina extracción o emisión de sustancias causa sobre el ser humano.
- Daño sobre la Calidad del Ecosistema (CE): El daño a la calidad del ecosistema incluye el efecto sobre la diversidad de especies, especialmente en las plantas vasculares y los organismos sencillos. Se expresa como *Potentially Disappeared Fraction* (PDF) y *Potentially Affected Fraction* (PAF) o fracción de especies que potencialmente desaparecerán o se verán afectadas, respectivamente, como consecuencia del impacto ambiental experimentado en un área durante un tiempo determinado.
- Daño a los Recursos (R): El daño a los recursos se obtiene a partir de modelos geoestadísticos que relacionan disponibilidad y concentración de éstos, y se expresa como la energía extra que será necesaria para la futura extracción mineral de baja calidad y recursos fósiles. Se expresa como MJ de energía extra que será necesaria en el futuro para dicha extracción.

➤ Método: **CML 2 baseline 2000.**

Este método permite calcular y evaluar distintos índices de impacto medioambiental, entre los que destaca el calentamiento global. Este método no dispone de fase de valoración final, con lo que los datos obtenidos están menos “manipulados” con respecto a los impactos iniciales para las diversas categorías de impacto. Las categorías de impacto que se presentan en este método de referencia CML son:

- Acidificación.
- Agotamiento Abiótico.
- Agotamiento de la capa de Ozono (PAO).
- Calentamiento Global (GWP100)
- Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce.
- Ecotoxicidad Acuática de Agua Marina.
- Ecotoxicidad Terrestre.
- Eutrofización.
- Oxidación Fotoquímica.
- Toxicidad – humanos.

➤ Método: **Cumulative Energy Demand (CED).**

Cuantifica solo el consumo energía para la obtención de un bien (por ejemplo un producto) referida a una unidad de servicio prestado. Cuantifica, por tanto, el consumo de energía dividido por la unidad de servicio (MJ/kg) (Ecolaningiería, 2015). Para evaluar la Demanda de Energía Acumulada, se consideran las siguientes categorías de impacto (Earthshift, 2015):

- Energías Fósiles, No Renovables.



- Energía Nuclear, No renovables.
- Biomasa, Renovable.
- Solar, Geotérmica, Eólica, Renovable.
- Hidráulica, Renovable.



5. Evaluación de impacto del ciclo de vida y discusión de resultados

En esta etapa, se lleva a cabo el análisis y la explicación de los resultados del inventario de datos que se ha introducido en el programa. Los resultados se pueden expresar agrupados por categorías de impacto, así como, opcionalmente normalizados o ponderados. Todas las entradas y salidas del inventario de ciclo de vida deben clasificarse en diferentes categorías de impacto, de acuerdo con el tipo de impacto que pueden tener en el medio ambiente.

La Caracterización es el cálculo de la contribución potencial de cada entrada/salida detectada en el análisis de inventario a un efecto ambiental. No depende solo de la cantidad de recursos consumidos/contaminantes emitidos, sino también de la distinta capacidad de cada uno de ellos para producir un determinado daño; de ahí que si se desean comparar los efectos de distintos compuestos, deben emplearse unos parámetros de peso o equivalencias a los que se denomina factores de caracterización. Se aplica asignando el valor de referencia 1 a una sustancia dentro de cada categoría de impacto, el resto de sustancias tendrán un valor relativo relacionado con dicha sustancia de referencia (Pérez, F, 2013).

Respecto a la Normalización, es evidente que cuando se desean comparar dos impactos muy diferentes no es posible hacerlo de una manera directa comparando cantidades emitidas. Por ejemplo, cuando nos referimos al Calentamiento Global, la magnitud de las unidades empleadas será mucho mayor que para la medida de los efectos Carcinógenos. Por tanto, para que sea posible comparar ambas categorías de impacto, deben efectuarse un conjunto de operaciones de normalización que permitan, por aplicación de determinados factores, ajustar las escalas de impacto de las diversas categorías analizadas. Los factores de normalización se calculan a partir del volumen existente en el medio de cada uno de los compuestos contaminantes, sin contemplar la cantidad aportada en el proceso evaluado; esto permite ponderar la importancia que tiene el producto o proceso estudiado con referencia al estado inicial del medio.

Por último, los indicadores normalizados se pueden multiplicar por factores de ponderación y después sumar los resultados parciales para producir un único indicador de impacto ambiental global. La ponderación es sin duda el paso más arbitrario y controvertido de todo el proceso de evaluación de impactos ya que la selección de los factores de ponderación es, en gran medida, una decisión política con limitada relevancia científica (Construction21,2015).

Como ya se mencionó se utilizarán tres métodos de evaluación CML 2 baseline 2000, Cumulative Energy Demand y Eco-indicador 99 (H/A), estos métodos han sido elegidos debido a las diferentes categorías de impacto/daño que considera cada uno de ellos y así poder evaluar de una forma más extensa los impactos ambientales asociados a las dos tecnologías de depuración de biogás consideradas en este estudio. De esta forma, va a ser posible evaluar el impacto ambiental generado por el consumo de energía o el impacto en la salud humana por la emisión de CO₂ a la atmosfera o los impactos ambientales producidos por el uso del suelo, etc.

I. Discusión de resultados

➤ Método Eco-indicator 99:

En la figura 6 se muestra, para el método Eco indicador 99 H/A, la caracterización de impactos (en una escala relativa del $\pm 100\%$) correspondientes a la aplicación de la tecnología de depuración biológica de biogás previamente descrita en esta Memoria. Los resultados ponen de manifiesto importantes cargas evitadas (valores negativos) en las categorías de impacto de “combustibles fósiles”, “cambio climático” y “respiración de sustancias orgánicas”. Esto es a consecuencia del biometano que se produce y se inyecta en la Red Nacional de Biogás, evitándose así la generación y el consumo de otras fuentes de energía más contaminantes a las que sustituye. En el apartado de combustibles fósiles, porque se dejan de utilizar este tipo de combustibles, en el del cambio climático, por el dióxido de carbono que se deja de emitir, y en la categoría del respirables orgánicos, por la emisión de sustancias orgánicas como los NMVOC que se evitan. Así mismo, puede apreciarse que la totalidad de las cargas evitadas tiene su origen en el reactor metanogénico donde se produce el CH_4 .

Por otro lado, esta tecnología conlleva otros impactos negativos (valores positivos en el diagrama) en el resto de categorías de impacto. Así, el proceso que más impacto negativo genera en el resto de categorías de impacto es también el de enriquecimiento en metano en el reactor metanogénico (color amarillo). Esto es a consecuencia de la gran cantidad de energía que es necesaria para el funcionamiento de este proceso. Más detalladamente, las sustancias que más carga ambiental tienen dentro de cada categoría de impacto se recogen en la tabla 17.

Tabla 17: Sustancias que más carga tienen en cada categoría de impacto de la tecnología biológica mediante el método del eco indicador 99 H/A.

Categorías de impacto	Sustancia que más carga tiene
Minerales	Cobre utilizado o necesario para la obtención de la energía requerida en el proceso (energía fotovoltaica)
Uso del suelo	Suelo ocupado y transformado de los bosques para la obtención de energía eléctrica necesaria para el proceso.
Acidificación / eutrofización	Dióxido de azufre generado por el gas natural que es obtenido en el proceso de depuración del biogás y el asociado a la obtención de energía eléctrica necesaria para el proceso.
Ecotoxicidad	Cromo VI utilizado o necesario para la obtención de la energía requerida en el proceso.
Capa de ozono	Metano, halón 1211 utilizado o necesario para la obtención de la energía requerida en el proceso.
Radiación	Radón 222 generado por la energía nuclear necesaria para la obtención de energía eléctrica que demanda el proceso.
Resp inorgánicos	Dióxido de azufre emitido para la obtención del hidrogeno, del gas natural y la energía necesaria para el proceso.
Carcinogénicos	lón arsénico utilizado o necesario para la obtención de la energía requerida en el proceso.

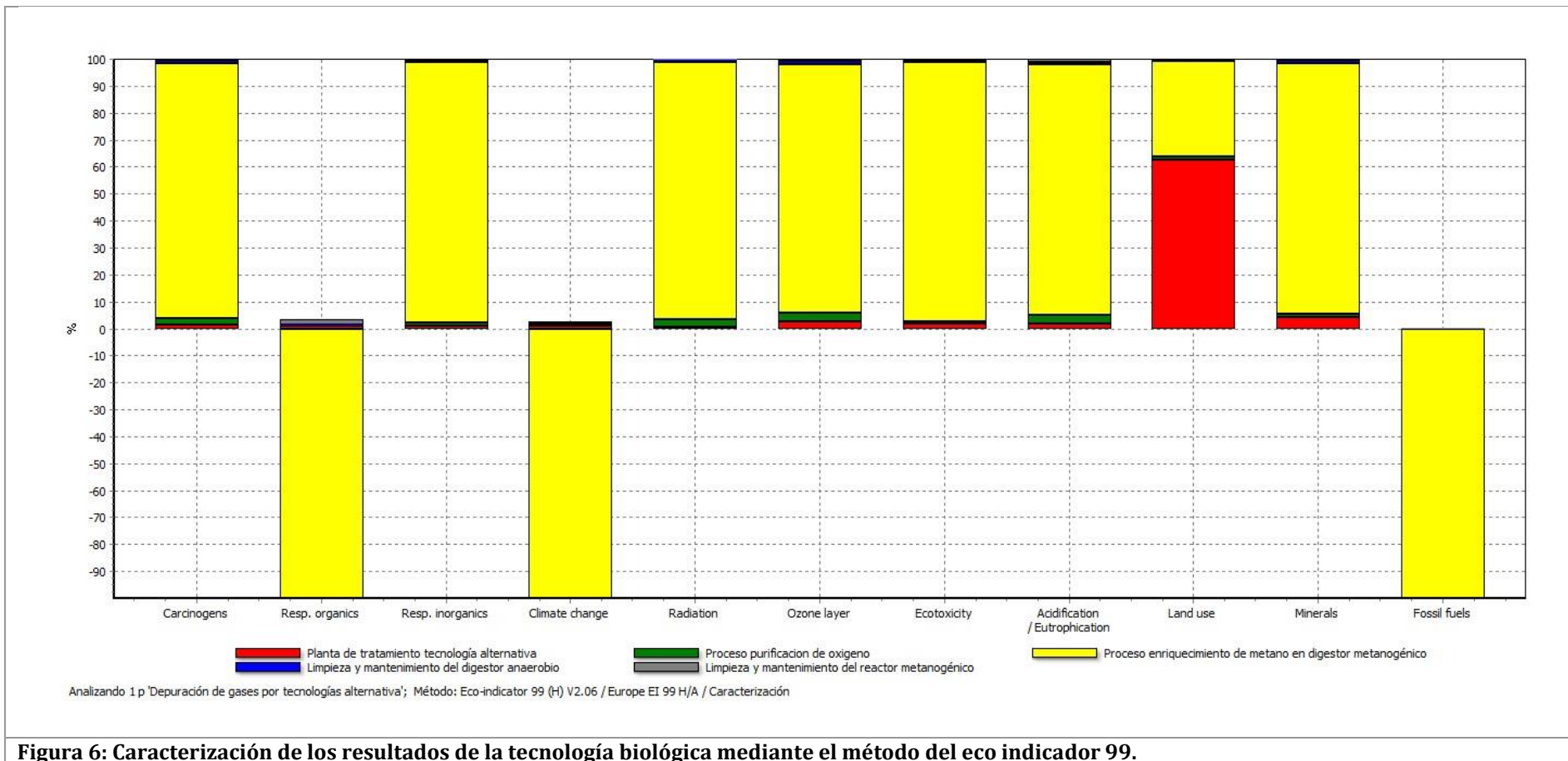


Figura 6: Caracterización de los resultados de la tecnología biológica mediante el método del eco indicador 99.



Análogamente, en la figura 7 se muestra, para el método Eco indicador 99 H/A, la Caracterización de impactos (en una escala relativa del $\pm 100\%$) correspondientes a la aplicación de la tecnología de depuración convencional del biogás previamente descrita en esta Memoria. Las cargas evitadas que se pueden ver en la categoría de impacto "Fossil fuels" corresponden al proceso de water scrubbing donde se absorbe el CO_2 del biogás y se inyecta el biogás depurado en la Red Nacional de Biogás. Gracias a este metano que se ha generado, se evita la producción y el uso de la misma cantidad equivalente de gas natural. Por ello, en el gráfico aparece como un impacto positivo (valor negativo) en la categoría de combustibles fósiles. Además, se aprecia también una pequeña carga evitada en la categoría "resp organics" a consecuencia de la menor emisión de sustancias orgánicas al aire al obtener biometano en sustitución del gas natural más contaminante en esta categoría.

Por otro lado, en todas las categorías de impacto se puede ver que el mayor impacto negativo que hay asociada a esta tecnología es el uso del carbón activo. Esto es debido al proceso de fabricación de este material, la gran cantidad que es necesaria y el escenario de disposición de residuos que se ha establecido: la incineración. Más adelante se realizará el mismo análisis bajo un escenario distinto, suponiendo que el carbón activo se regenera en la propia planta reduciendo con ello los impactos ambientales generados por este proceso.

Más detalladamente, los impactos ambientales negativos generados (valores positivos) en cada categoría están originados por diferentes sustancias que son necesarios para producir el carbón activo. En la tabla 18 se recoge cuál es la sustancia o el proceso que más carga ambiental origina sobre cada categoría de impacto.

**Tabla 18: Sustancias que más carga tienen sobre cada categoría de impacto de la tecnología convencional mediante el método del eco indicador 99.**

Categorías de impacto	Sustancia que más carga tiene
Minerales	Níquel presente en los silicatos para la producción del ácido fosfórico.
Uso del suelo	Suelo ocupado para la producción del ácido fosfórico.
Acidificación / eutrofización	Dióxido de azufre necesario para la fabricación del ácido fosfórico.
Ecotoxicidad	Cromo necesario para la fabricación del ácido fosfórico.
Capa de ozono	Metano derivado del uso de combustibles fósiles para el transporte de los diferentes materiales del carbón activo.
Radiación	Radón 222 generado por la energía nuclear necesaria para la obtención de la energía requerida para el proceso de fabricación de componentes del carbón activo como el ácido fosfórico o el N ₂ .
Cambio climático.	Dióxido de carbono fósil originado por la combustión del gas natural para obtener energía para la producción del carbón activo. También tiene una carga reseñable el dióxido de carbono generado en el water scrubbing al desorberlo del biogás y emitirlo a la atmósfera. Sin embargo, este CO ₂ sería de origen biológico y aunque este método lo contabiliza igual, en otros no tendría carga ambiental.
Resp inorgánicos	Al igual que en la categoría de la acidificación, en esta caso también es el dióxido de azufre la sustancia que más carga tiene.
Resp orgánicos	NM VOC originados por la combustión de gas natural para la obtención de la energía necesaria para el proceso de fabricación de los componentes del carbón activo, principalmente del ácido fosfórico.
Carcinogénicos	Ión arsénico generado en la producción del ácido fosfórico necesario para obtener el carbón activo.

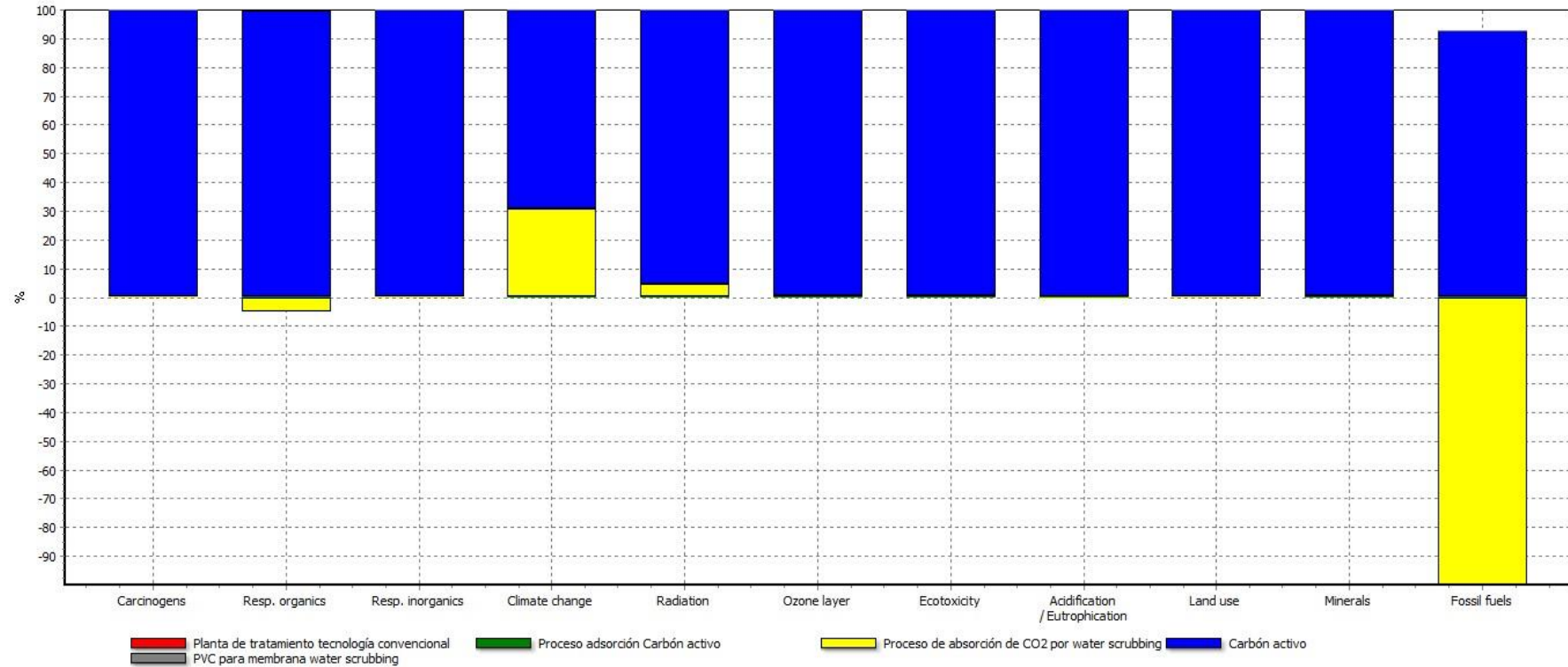


Figura 7: Caracterización de los resultados de la tecnología convencional mediante el método del eco indicador 99.



En la figura 8 se ilustra la comparación entre las dos tecnologías de depuración que se han estudiado con el método del eco-indicador 99. En la gráfica se ve claramente que la tecnología biológica tiene menos impactos negativos (valores positivos) en todas las categorías y tiene más impacto positivo o más cargas evitadas (valores negativos) en la categoría de combustibles fósiles, ya que se genera mucho más biometano con esta tecnología (38180,90 kJ/UF) que con la tecnología convencional (25853,45 kJ/UF). Además, en las categorías de impacto de “cambio climático” y “resp orgánicos” la tecnología biológica presenta más carga evitada que la convencional, puesto que, como se ha comentado antes, la primera genera más biogás que la segunda.

En el resto de las categorías, la tecnología convencional sale peor parada a consecuencia principalmente del carbón activo utilizado, debido a las altas cargas ambientales de su producción, utilización y disposición final. Por ello, más adelante, se va a llevar a cabo la evaluación ambiental de la aplicación de la tecnología convencional considerando la regeneración del carbón activo agotado.

En la figura 9, se puede ver la comparación de las dos tecnologías con los resultados normalizados en una base absoluta. Gracias a este análisis se puede apreciar la enorme diferencia que existe entre las cargas evitadas de combustibles fósiles con la tecnología biológica y la convencional y, además, destaca en mayor medida la diferencia entre los impactos negativos que tiene la energía biológica y los grandes impactos que tiene la convencional.

También es necesario aclarar que, en la categoría de impacto “uso del suelo” con los resultados caracterizados, la construcción de la planta para el tratamiento biológico del biogás tiene un peso importante, sin embargo, en las figuras 8 y 9 se muestra como este impactos es mucho mayor en la tecnología convencional. Los resultados caracterizados pueden llevar a error ya que parece relativamente más importante el impacto del proceso de la construcción de la planta, cuando en realidad, es más relevante en la tecnología convencional pero queda camuflado por las altas cargas que tiene en este caso el carbón activo.

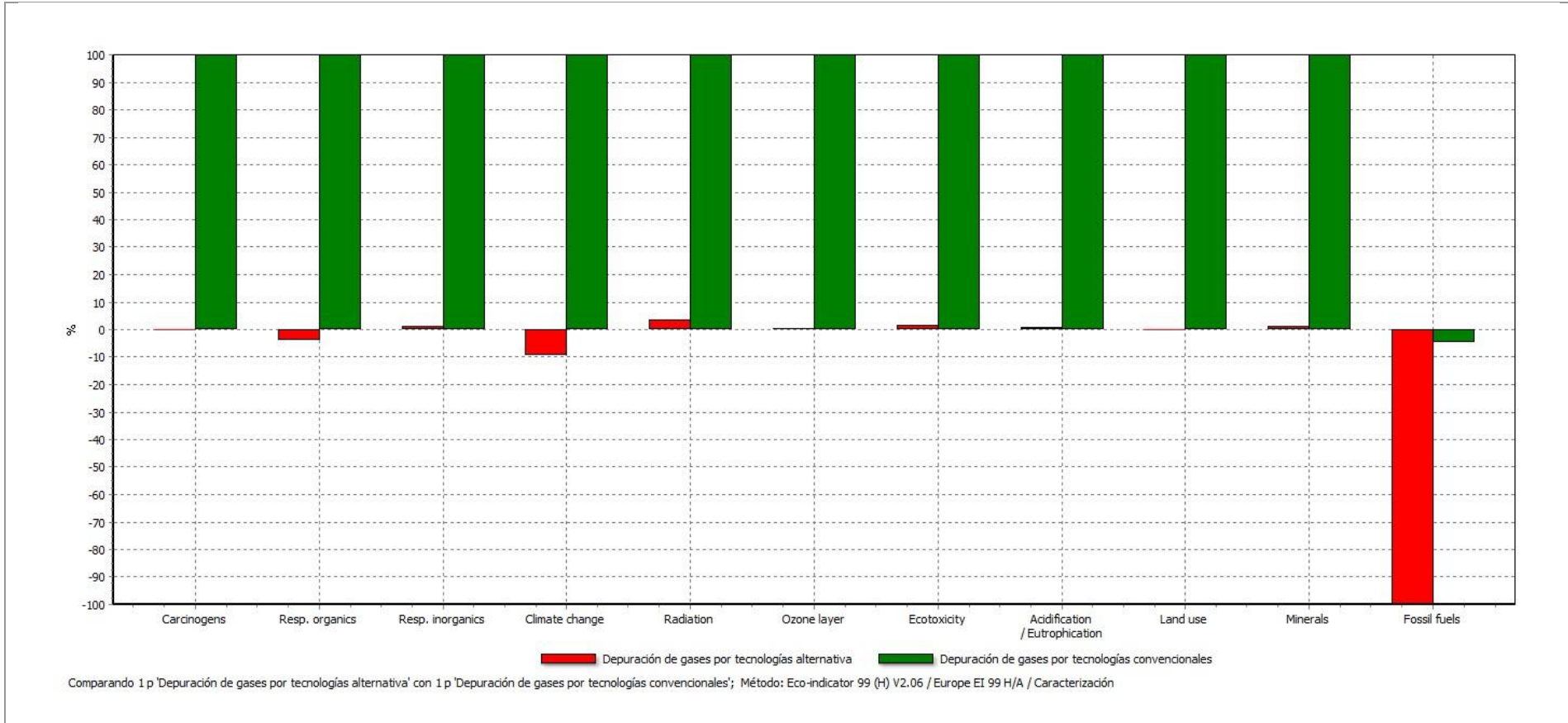


Figura 8: Comparación de la caracterización de las tecnologías estudiadas mediante el método del eco indicador 99.

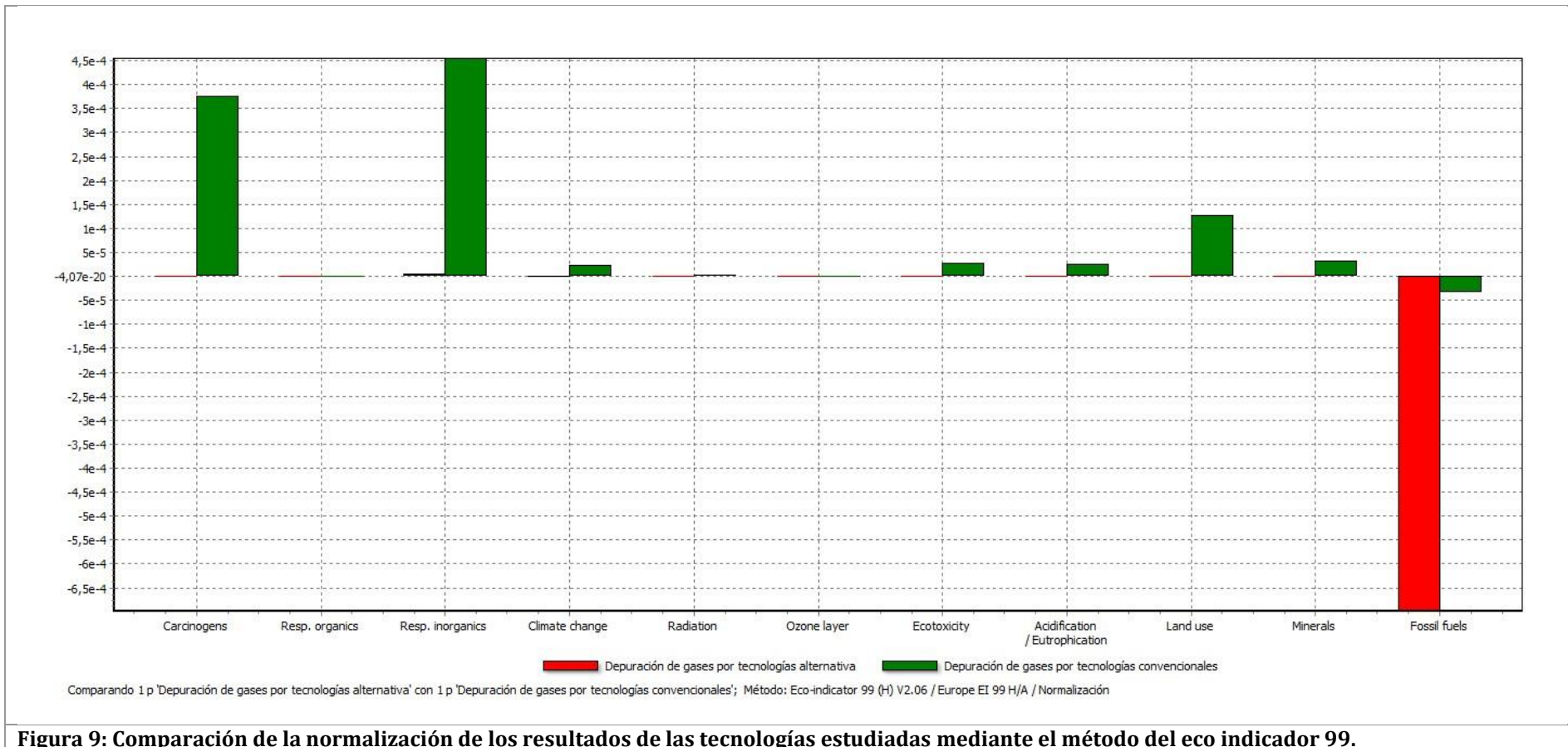


Figura 9: Comparación de la normalización de los resultados de las tecnologías estudiadas mediante el método del eco indicador 99.



➤ Método CML 2 Baseline 2000:

En la figura 10 se pueden ver los resultados obtenidos para la tecnología biológica mediante el método de estudio CML, en dicho gráfico se pueden apreciar claramente los impactos positivos o la carga evitada del biometano que se genera y se inyecta en la Red Nacional de Biogás. Estos impactos ambientales positivos se manifiestan en tres de las categorías de impacto: en la oxidación fotoquímica, calentamiento global y agotamiento abiótico. En los tres casos está originado por el metano, dióxido de carbono o demás productos derivados de la combustión de combustibles fósiles que se evitan producir gracias al biometano que se obtiene en la tecnología biológica.

Por otro lado, en el resto de categorías de impacto hay un fuerte impacto negativo, en cada caso está originado por diferentes sustancias asociadas al proceso de enriquecimiento de metano (color amarillo). Más detalladamente, en cada categoría de impacto las sustancias con más carga en el impacto negativo son las que se indican en la tabla 19.

Tabla 19: Sustancias que más carga tienen en cada categoría de impacto de la tecnología biológica mediante el método CML

Categorías de impacto	Sustancia que más carga tiene
Acidificación.	Dióxido de azufre necesario para la elaboración del hidrógeno electrolítico que se ha de introducir al proceso.
Eutrofización.	Óxidos de nitrógeno necesarios para la elaboración del hidrógeno electrolítico que se ha de introducir al proceso.
Agotamiento de la Capa de Ozono.	Metano, halón 1211 utilizado o necesario para la obtención de la energía requerida para el proceso.
Toxicidad Humana.	Arsénico que se genera cuando se obtiene la energía necesaria para el proceso.
Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce.	Ión vanadio que se genera cuando se obtiene la energía necesaria para el proceso.
Ecotoxicidad Acuática de Agua Marina.	Berilio que se genera cuando se obtiene la energía necesaria para el proceso.
Ecotoxicidad Terrestre.	Mercurio relacionado con la elaboración del hidrógeno electrolítico que se ha de introducir al proceso.

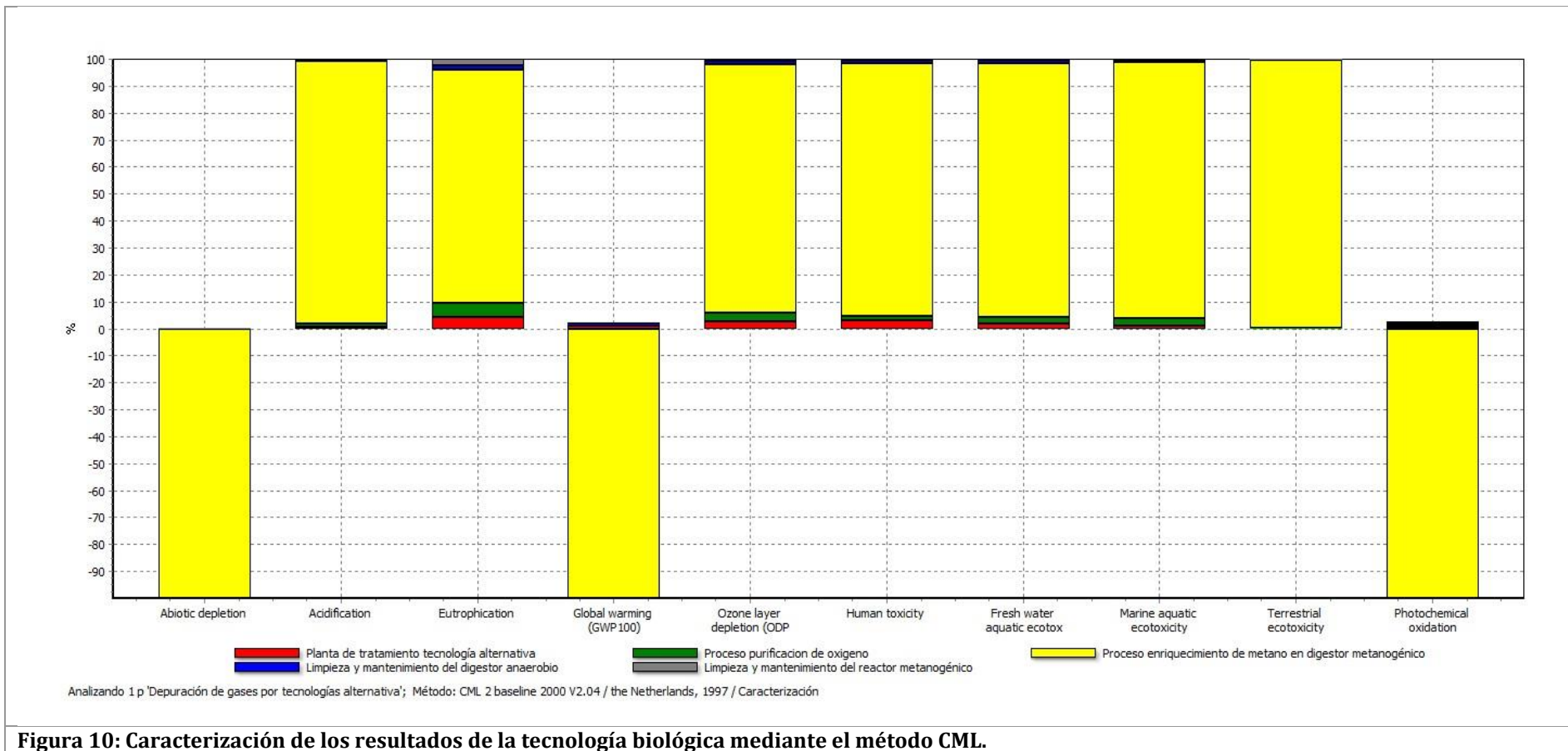


Figura 10: Caracterización de los resultados de la tecnología biológica mediante el método CML.

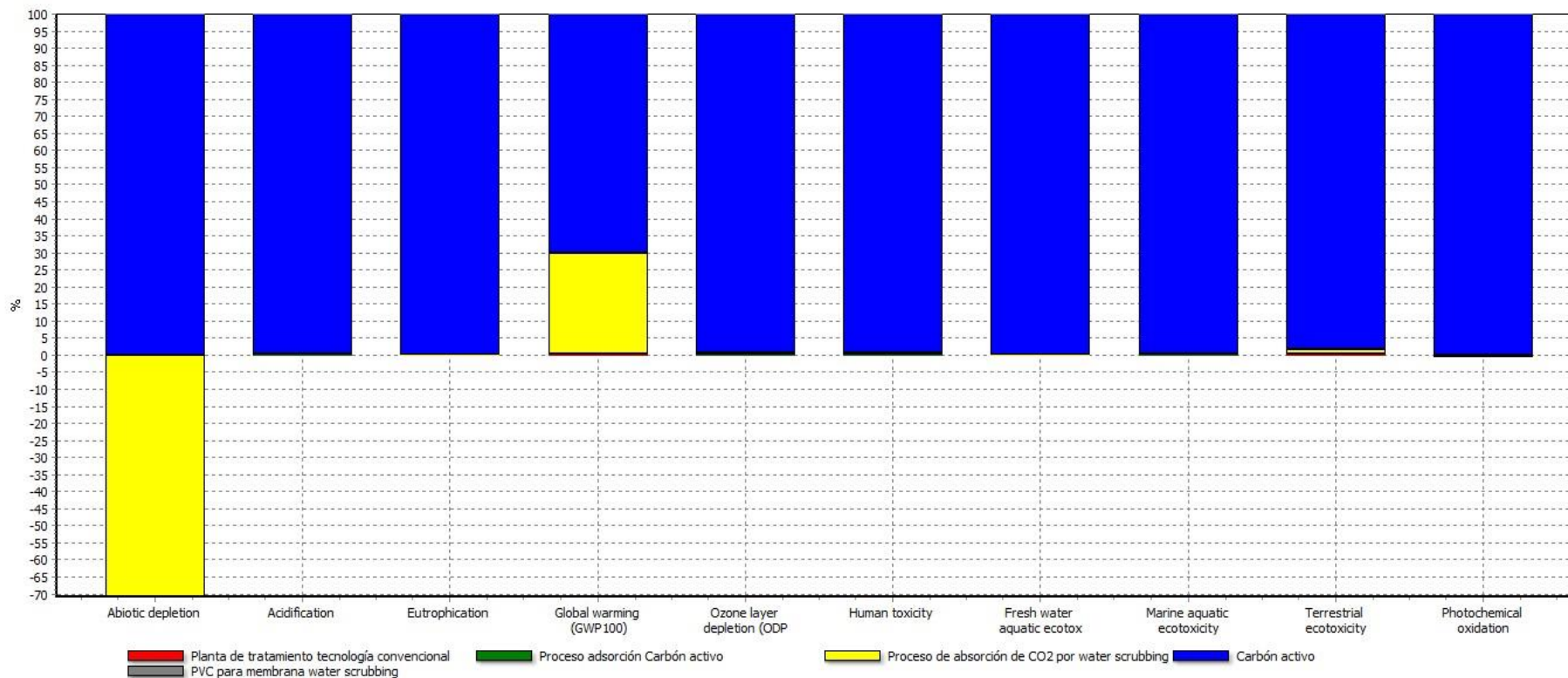


En la figura 11 se presentan los resultados obtenidos mediante el método CML asociados a la aplicación de la tecnología convencional de depuración. En el gráfico se puede ver que el proceso de absorción de CO₂ presenta un fuerte impacto ambiental positivo (valor negativo en el gráfico) a consecuencia del biometano que se genera a la salida de la torre de absorción (color amarillo). Por el contrario, este sistema de depuración tiene un impacto ambiental negativo importante (valor positivo en el gráfico) a consecuencia del dióxido de carbono presente en el biogás que se absorbe mediante el water scrubbing y posteriormente se desorbe a la atmósfera. Además, dentro de la categoría de ecotoxicidad terrestre, también el proceso de water scrubbing presenta una pequeña carga negativa por el formaldehído asociado a la energía necesaria para el proceso y al CO₂ absorbido en la columna de absorción.

Por otro lado, al igual con el método del eco-indicador 99, el carbón activo es el responsable de las principales cargas ambientales desfavorables que aparecen en todas las categorías de impacto (color azul), ahora bien, en cada una está provocada por una sustancia y/o proceso diferente (tabla 20):

Tabla 20: Sustancias que más carga tienen en cada categoría de impacto de la tecnología convencional mediante el método CML

Categorías de impacto	Sustancia que más carga tiene
Agotamiento abiótico.	Molibdeno para la elaboración de cobre necesario para la fabricación del ácido fosfórico necesario para obtener el carbón activo utilizado en el proceso.
Acidificación.	Dióxido de azufre necesario para la elaboración del ácido fosfórico necesario para obtener el carbón activo empleado.
Eutrofización.	Ácido fosfórico necesario para la elaboración del carbón activo
Calentamiento global.	Dióxido de carbono fósil originado por la combustión de combustibles fósiles para obtener energía para la elaboración del carbón activo. En el proceso también se consume dióxido de carbono pero este método de estudio no considera este gas como negativo para el calentamiento global.
Agotamiento de la Capa de Ozono.	Metano, halón 1301, necesario para la obtención de la energía requerida para el proceso de obtención de ácido fosfórico.
Toxicidad Humana.	ión vanadio necesario para la fabricación del ácido fosfórico que demanda el proceso de elaboración de carbón activo.
Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce.	ión vanadio necesario para la fabricación del ácido fosfórico que demanda el proceso de elaboración de carbón activo.
Ecotoxicidad Acuática de Agua Marina.	ión vanadio necesario para la fabricación del ácido fosfórico que demanda el proceso de elaboración de carbón activo.
Ecotoxicidad Terrestre.	Cipermetrina relacionados con los racimos de fruta de palma necesarios para la elaboración del carbón activo.
Oxidación Fotoquímica.	Dióxido de azufre necesario para la elaboración del ácido fosfórico necesario para obtener el carbón activo empleado.



Analizando 1 p 'Depuración de gases por tecnologías convencionales'; Método: CML 2 baseline 2000 V2.04 / the Netherlands, 1997 / Caracterización

Figura 11: Caracterización de los resultados de la tecnología convencional mediante el método CML.



En la figura 12 se puede ver la comparación entre las dos tecnologías de depuración de biogás para el método de evaluación de impacto CML 2000. En este gráfico se aprecia claramente el impacto ambiental positivo (valor negativo) que tiene la tecnología alternativa o biológica en comparación con la tecnología convencional. Esto es a consecuencia de que con la tecnología biológica generamos más biogás (38180,90 kJ/UF) que con la tecnología convencional (25853,45 kJ/UF). Este hecho se puede ver también en menor medida en la categoría de impacto del calentamiento global.

Dentro de los impactos ambientales negativos (valores positivos en el gráfico) que se pueden ver en el resto de las categorías de impacto, la tecnología convencional presenta mucho más impacto a consecuencia nuevamente de la carga ambiental que tiene el carbón activo.

Como sucedía para el eco indicador 99, con la caracterización de los datos no se aprecia la diferencia, en términos absolutos, que hay entre los resultados de las categorías de impacto de ambos métodos: por ello en la figura 13 se ilustran los resultados ya normalizados. Destaca el enorme impacto que presenta la tecnología convencional en las categorías de ecotoxicidad marina y de agua dulce y en la eutrofización (acidificación en menor medida) frente a la tecnología biológica, a consecuencia del ión vanadio implicado en el proceso de producción del carbón activo.

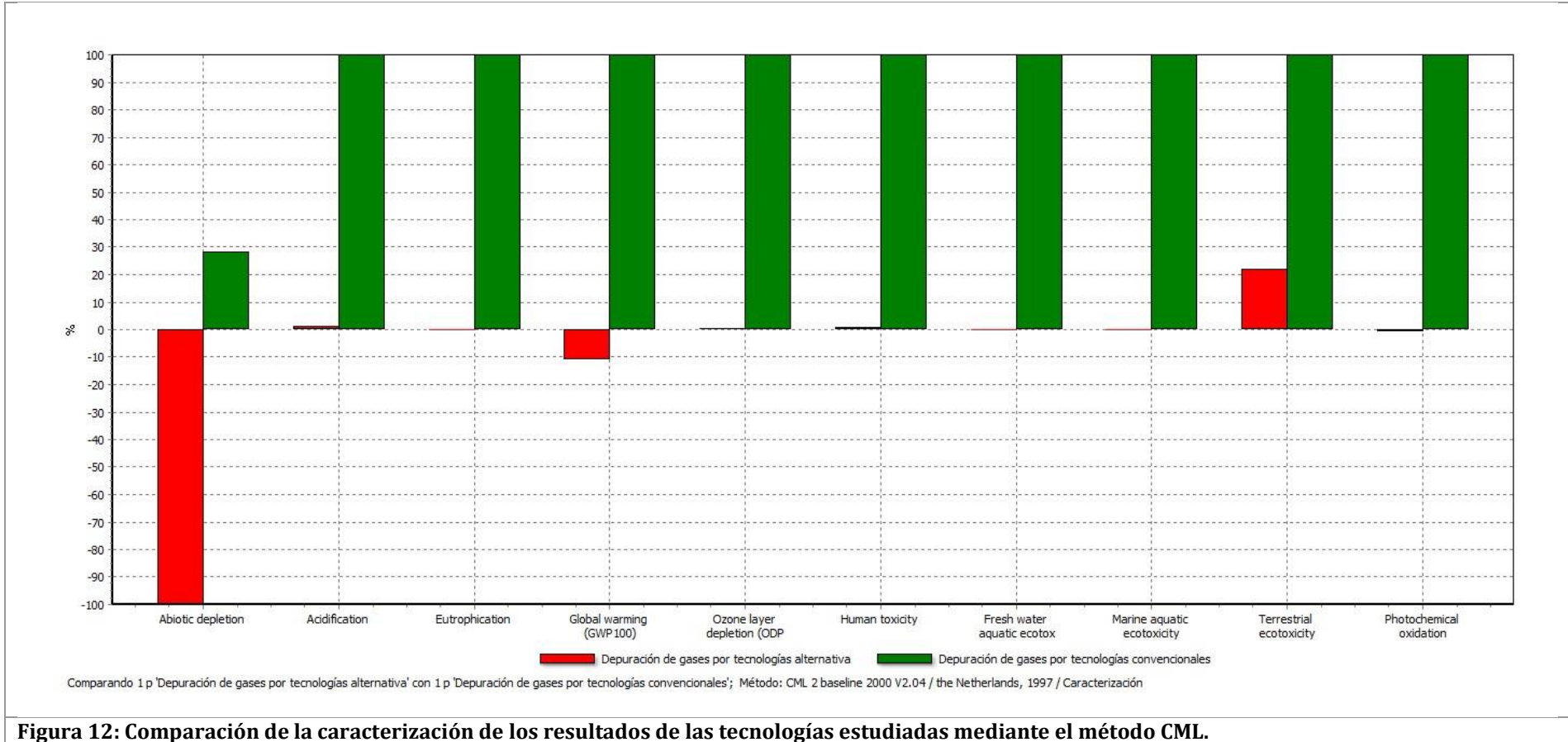


Figura 12: Comparación de la caracterización de los resultados de las tecnologías estudiadas mediante el método CML.

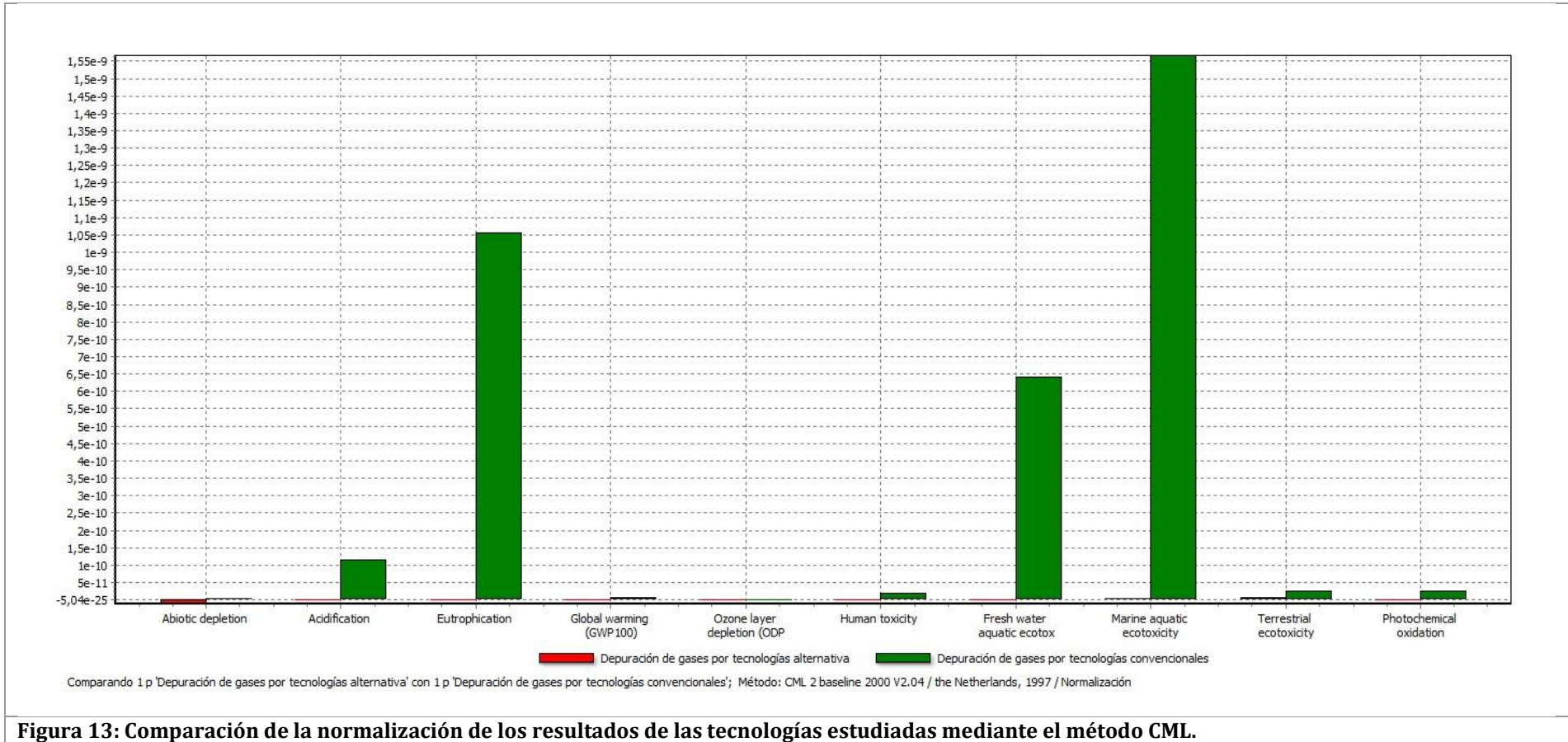


Figura 13: Comparación de la normalización de los resultados de las tecnologías estudiadas mediante el método CML.



➤ Método CED (Demanda Acumulada de Energía):

En la figura 14 se muestran los resultados de la Caracterización de impactos de la tecnología biológica cuando se aplica el método de evaluación de impacto CED (demanda acumulada de energía). Como se puede ver, en este caso se consideran 5 categorías de impacto en función del tipo de energía que se consume en el proceso. En el gráfico se puede ver el importante impacto ambiental positivo (valor negativo en el gráfico) que tiene esta tecnología para la categoría de la energía fósil no renovable debido al biometano que se genera en el proceso y que es una carga evitada (color amarillo) Por otro lado, el resto de las categorías tienen un impacto ambiental negativo a consecuencia de la gran cantidad de energía que requiere la etapa de metanización de esta tecnología (color amarillo). Dicha energía se obtiene de la red de distribución nacional; por lo tanto, en función del mix energético que haya en el país, así serán sus impactos. En el mix energético español actual están presentes las diversas fuentes de energía que considera el método, por ello, hay impactos negativos en las otras 4 categorías de impacto. Sin embargo, si el mix energético variara y aumentaran las renovables, la carga sobre las renovables sería mayor, y al ser éstas menos contaminantes, la contaminación del proceso sería más baja.

Viendo los resultados caracterizados (en una escala relativa de $\pm 100\%$) no se puede apreciar la diferencia absoluta que hay entre la carga evitada que genera el biometano que se produce y la carga ambiental negativa asociada a la energía necesaria para el funcionamiento de la tecnología. En la figura 15 se pueden ver los resultados normalizados, es decir, en una base absoluta.

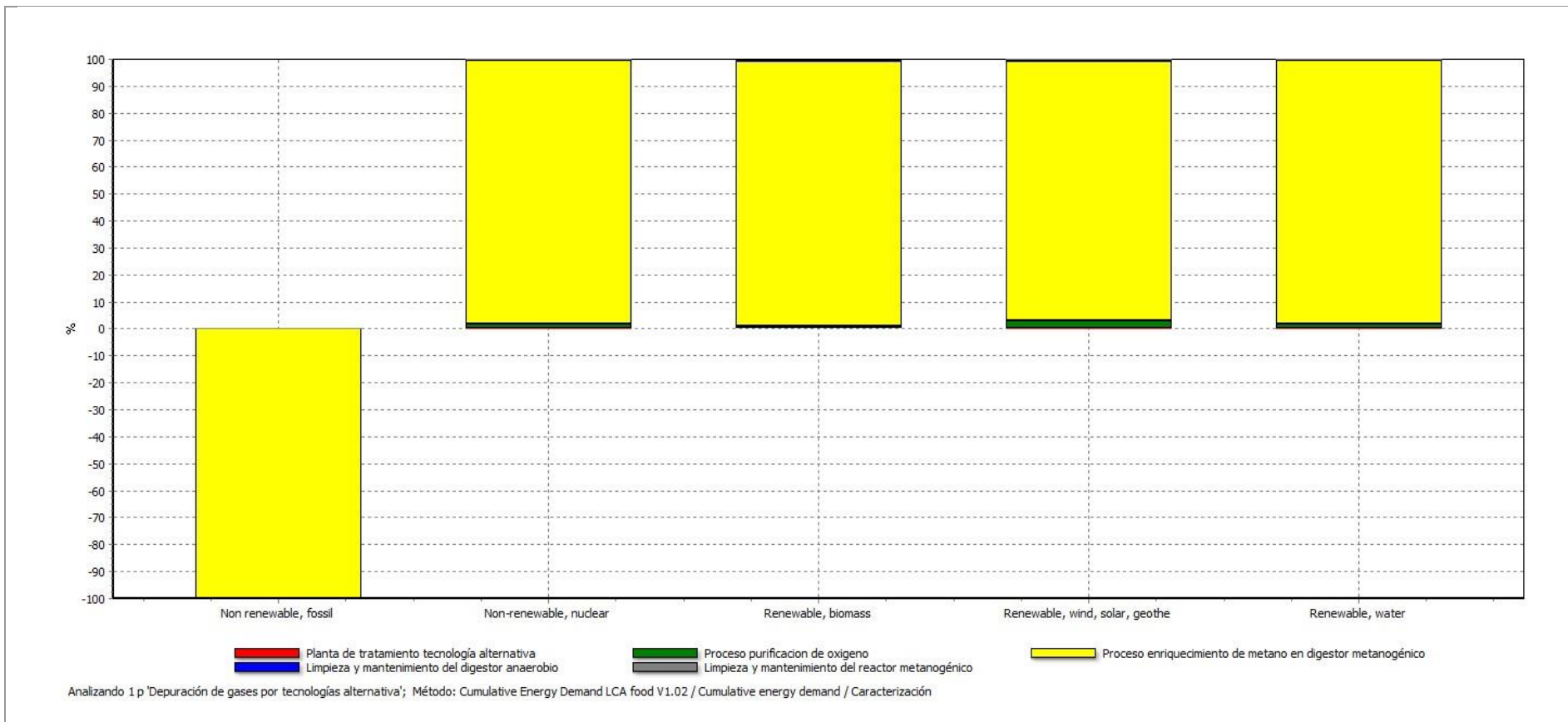


Figura 14: Caracterización de los resultados de la tecnología biológica mediante el método CED

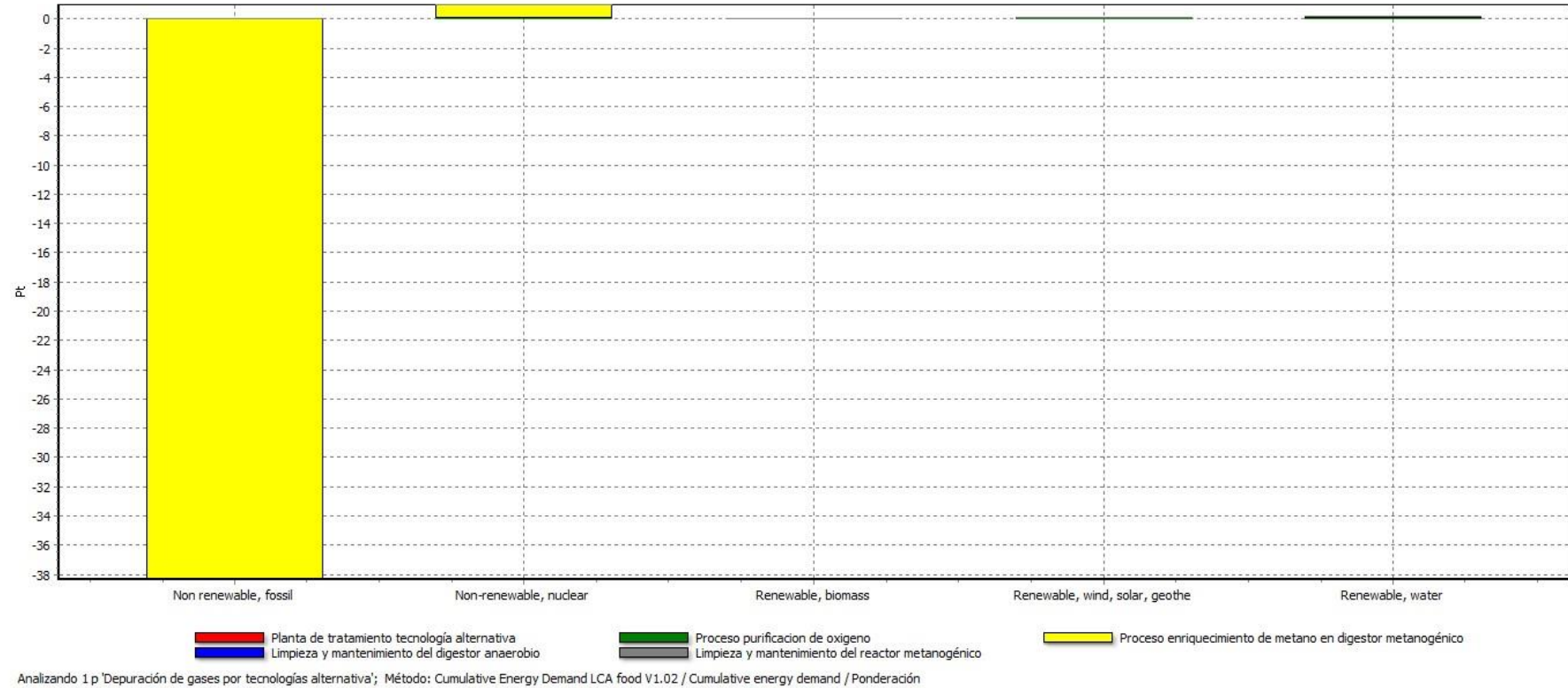


Figura 15: Evaluación de impacto de los resultados normalizados de la tecnología biológica mediante el método CED



En la figura 16 se muestran los resultados de la Caracterización de impactos de la tecnología convencional cuando se aplica el método de evaluación de impacto CED (demanda acumulada de energía). Al igual que en el caso de la tecnología biológica se puede ver un gran impacto positivo en la categoría de energía obtenida a partir de combustibles fósiles por el biometano que se genera (color amarillo) en el proceso. Sin embargo, en este caso, y para esta categoría, también se parecía un fuerte impacto ambiental negativo (valor positivo en la gráfica) a consecuencia de la de la gran cantidad de energía necesaria para producir el carbón activo (color azul).

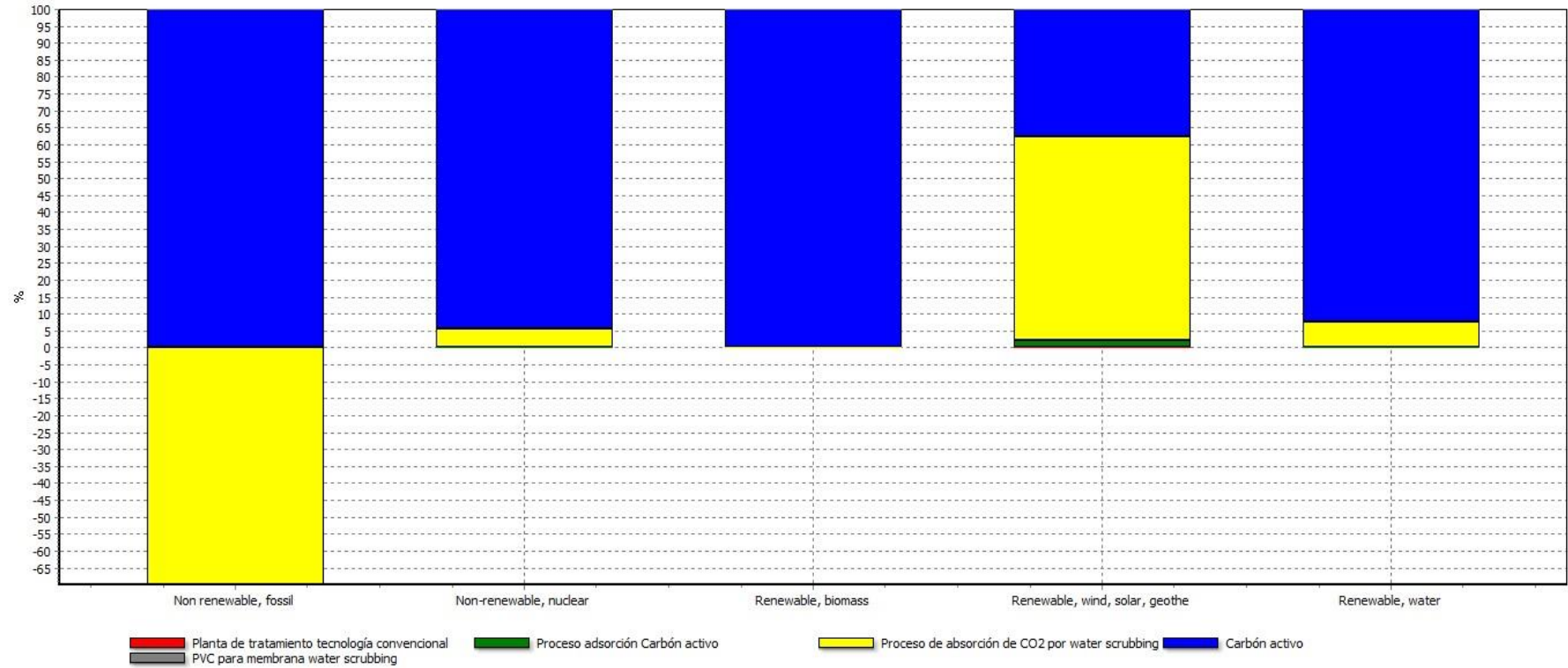
Para la categoría de impacto de “energías renovables: viento, solar y geotérmica”, se puede ver que el impacto ambiental es negativo y es debido al proceso de producción de carbón activo (azul), a la absorción por water scrubbing (amarillo) y, en menor medida, el propio proceso de adsorción con carbón activo (verde). Cuando los resultados, se expresan normalizados (figura 17) se puede ver cómo esta categoría en realidad representa una fracción muy pequeña, comparada con la de “energías fósiles no renovables”.

En el resto de categorías se puede apreciar el gran peso que tiene el consumo de energía para la producción de carbón activo.

En la figura 18 se muestra la comparación ambiental de las dos tecnologías con los resultados normalizados para el método CED. En el gráfico se aprecia que en todas las categorías, la tecnología convencional consume mucha más energía que la biológica a causa del gran consumo energético que precisa la producción de carbón activo.

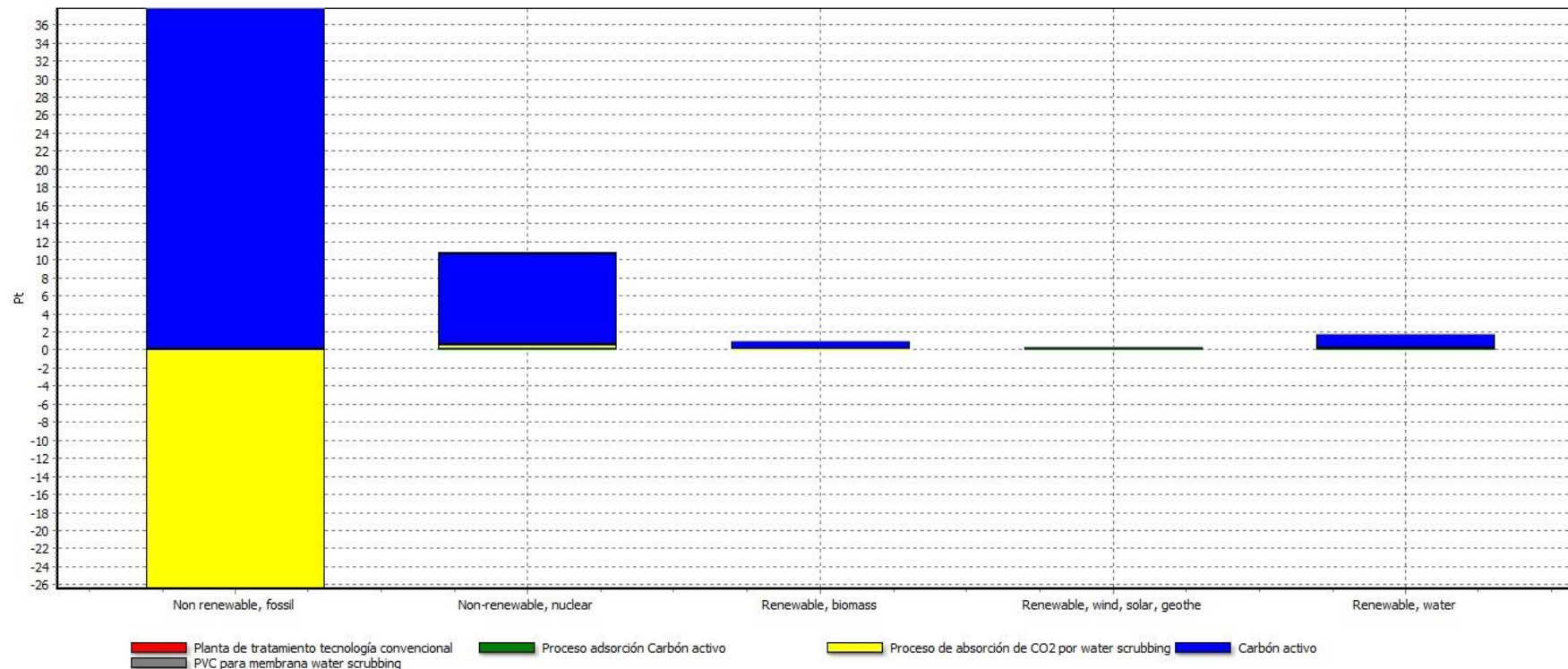
En la categoría de energía no renovable de combustibles fósiles se puede apreciar, en la figura 19 con los resultados normalizados, la gran diferencia que hay entre las dos tecnologías por dos razones:

1. Se produce menos biogás en la tecnología convencional.
2. Consume mucha más energía la tecnología convencional.



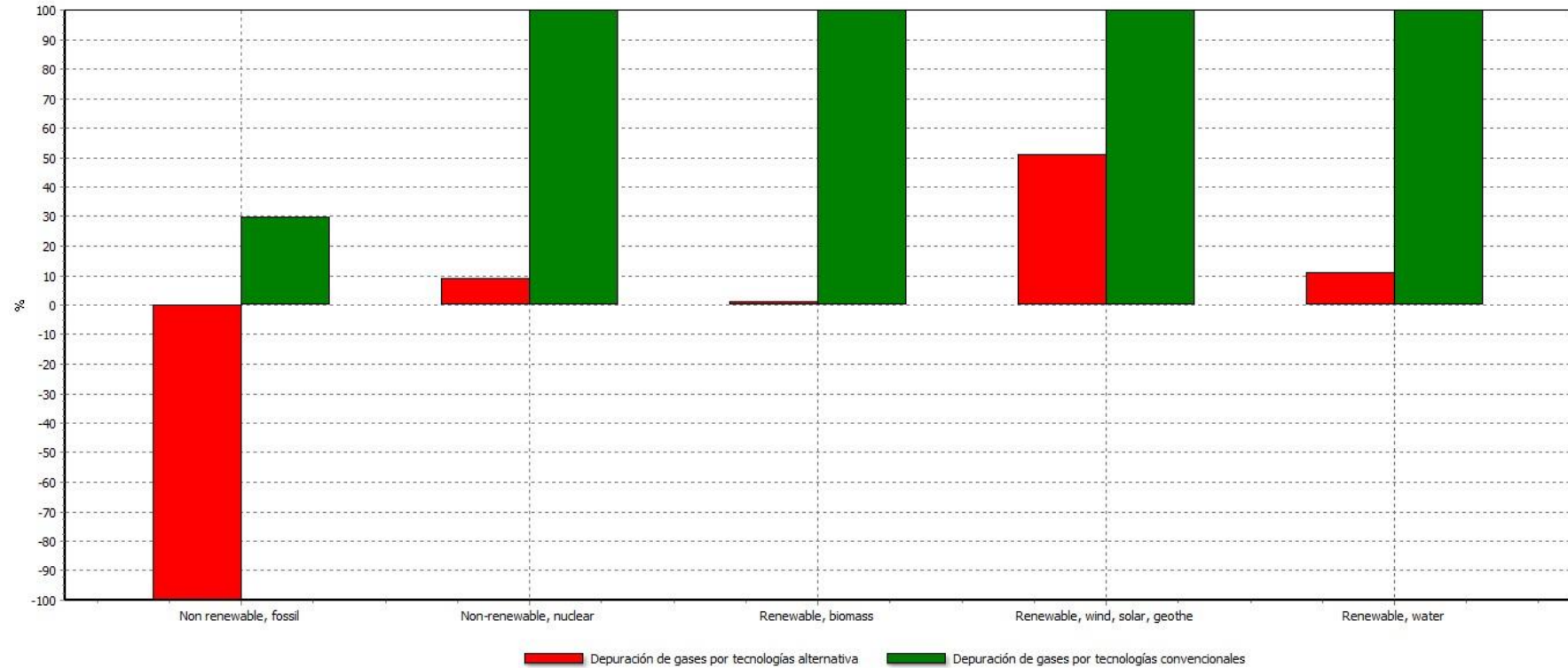
Analizando 1 p 'Depuración de gases por tecnologías convencionales'; Método: Cumulative Energy Demand LCA food V1.02 / Cumulative energy demand / Caracterización

Figura 16: Caracterización de los resultados de la tecnología convencional mediante el método CED



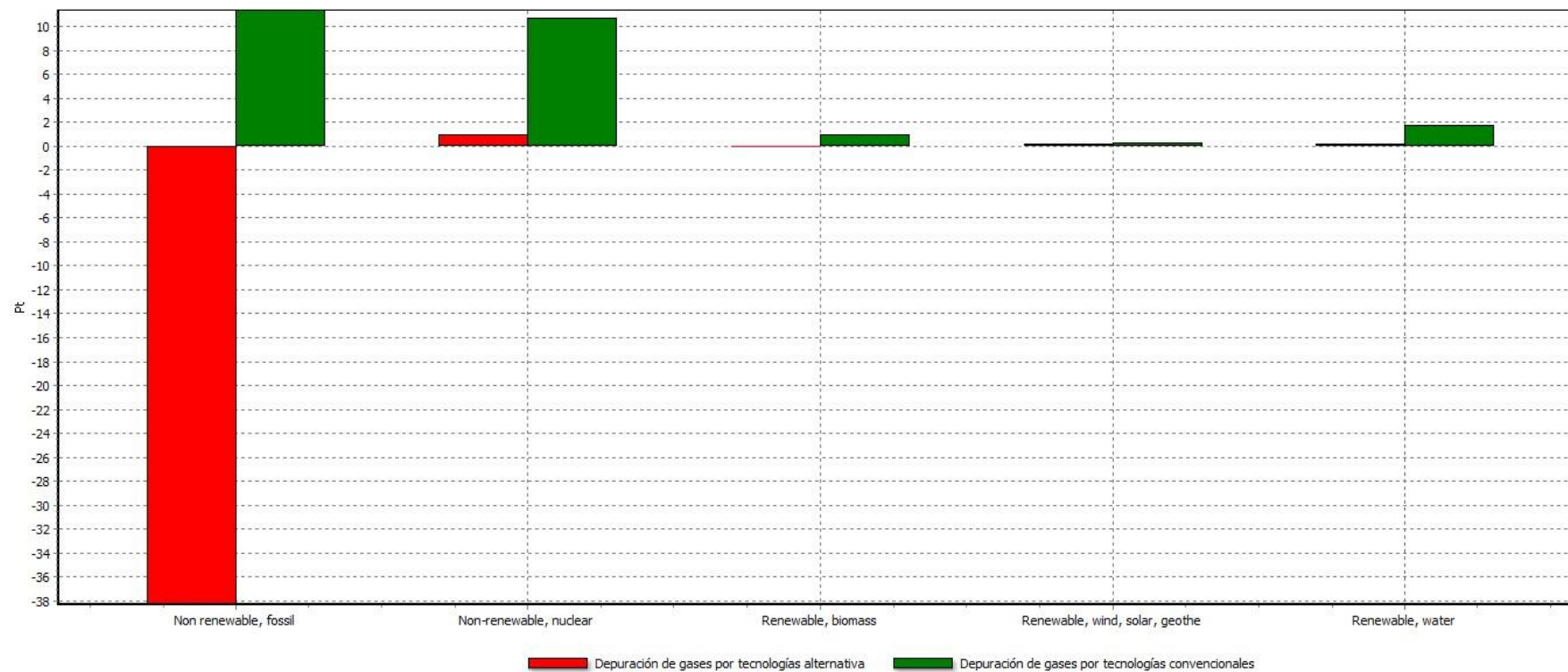
Analizando 1 p 'Depuración de gases por tecnologías convencionales'; Método: Cumulative Energy Demand LCA food V1.02 / Cumulative energy demand / Ponderación

Figura 17: Evaluación de impacto de los resultados normalizados de la tecnología convencional mediante el método CED.



Comparando 1 p 'Depuración de gases por tecnologías alternativa' con 1 p 'Depuración de gases por tecnologías convencionales'; Método: Cumulative Energy Demand LCA food V1.02 / Cumulative energy demand / Caracterización

Figura 18: Comparación de la caracterización de los resultados de las tecnologías estudiadas mediante el método CED.



Comparando 1 p 'Depuración de gases por tecnologías alternativa' con 1 p 'Depuración de gases por tecnologías convencionales'; Método: Cumulative Energy Demand LCA food V1.02 / Cumulative energy demand / Ponderación

Figura 19: Comparación de los resultados normalizados de las tecnologías estudiadas mediante el método CED.



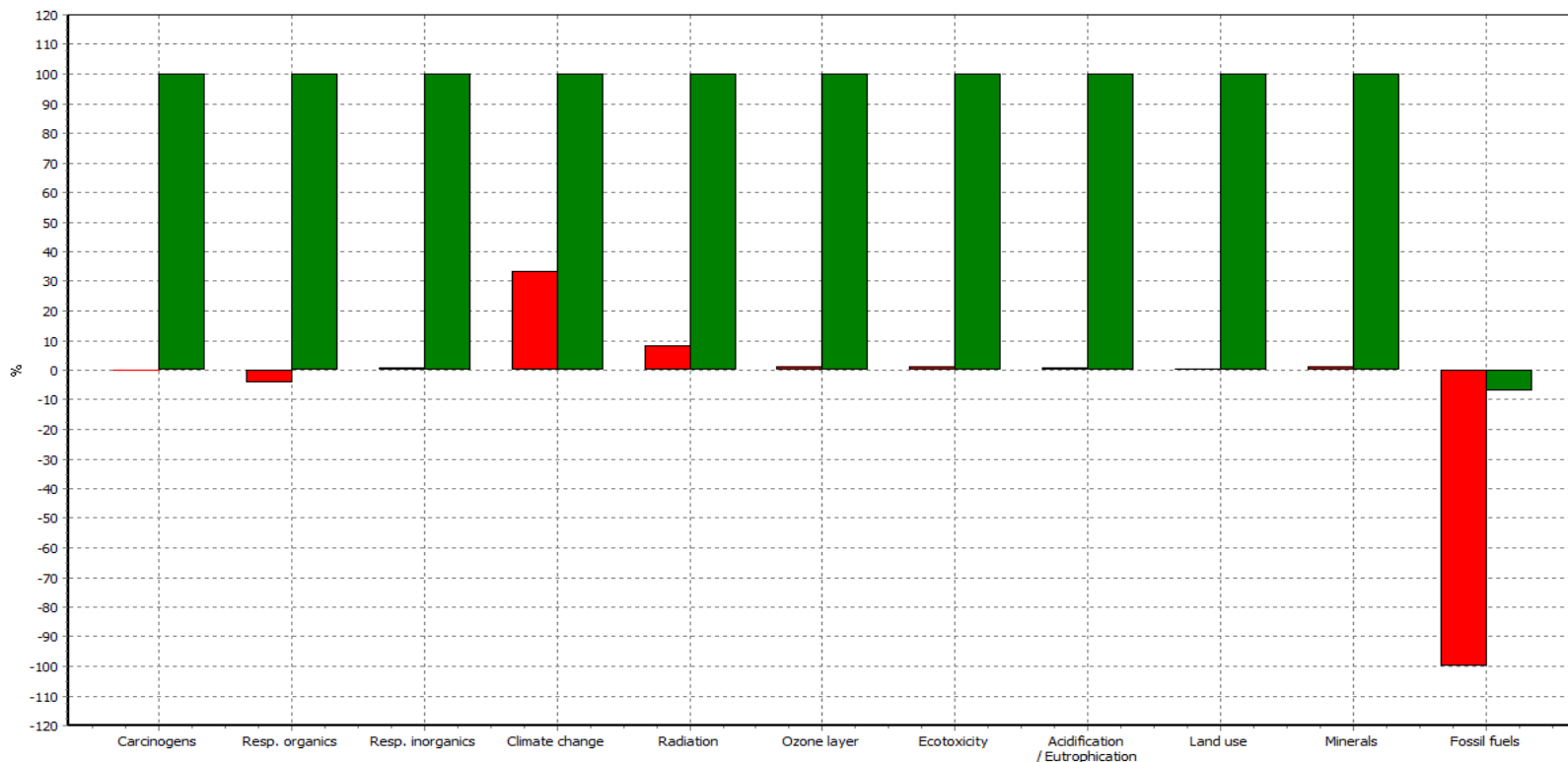
II. Análisis de mejoras

En el apartado de la discusión de resultados se ha podido ver que en la tecnología convencional, el proceso que más carga ambiental tiene es el ciclo de vida adicional asociado al carbón activo. Éste comprende principalmente su elaboración y su disposición final ya que el apartado de la utilización está dentro del proceso llamado “adsorción carbón activo”. Los grandes impactos que genera este proceso están relacionados con dos factores, los impactos asociados a su elaboración y disposición final, y la gran cantidad que se necesita de este material ya que el escenario planteado en el estudio no contempla la regeneración, sino la incineración una vez saturado el adsorbente.

Sin embargo, una mejora que se podría llevar a cabo en el sistema de depuración convencional es la regeneración del carbón activo que se usa en la etapa de adsorción del H_2S . Por ello, se ha llevado a cabo un análisis adicional considerando un escenario de regeneración de carbón activo mediante vapor de agua en una columna de desorción que se llevaría a cabo en el propio tanque mientras el otro depósito está en funcionamiento. A continuación se discuten los resultados de la EICV del ACV de la tecnología convencional considerando este nuevo escenario de regeneración y su comparativa con los resultados del ACV obtenidos con anterioridad.

En la figura 20 se puede ver la gran diferencia entre los impactos que ocasiona la tecnología convencional (color rojo) con y sin regeneración (color verde) del carbón activo para el método de EICV del Eco indicador 99. Como se sospechaba ésta es la etapa del ciclo de vida que más carga ambiental provoca. En el gráfico podemos ver cómo en la categoría de impacto del cambio climático aún sigue existiendo un impacto ambiental moderado a consecuencia del CO_2 que se emite en la etapa de absorción por water scrubbing. Además, hay una gran diferencia entre los impactos ambientales positivos (valores negativos en la gráfica) para ambos escenarios, ya que el ciclo de vida del carbón activo, cuando no se regenera, graba y amortiza parte de las cargas evitadas generadas por el biometano que se produce.

Por otro lado, en la figura 21 se puede ver la comparación de la tecnología biológica y la convencional con regeneración del carbón activo. En este gráfico se puede apreciar cómo las dos tecnologías tienen impactos más parecidos que en el caso de la tecnología convencional sin regeneración del carbón activo. La diferencia más acusada se aprecia en la categoría de impacto del cambio climático, debido a que con tecnología biológica el CO_2 del biogás se transforma en CH_4 aumentando así las cargas evita y descendiendo la emisión de CO_2 . El resto de las diferencias está asociado principalmente al desigual consumo energético que tienen ambas tecnologías.



Comparando 1 p 'Depuración de gases por tecno conven 2014 reg CA' con 1 p 'Depuración de gases por tecnologías conven 2014'; Método: Eco-indicador 99 (H) V2.06 / Europe EI 99 H/A / Caracterización

Figura 20: Comparación de la caracterización de los resultados de la tecnología convencional con y sin regeneración de carbón activo mediante el método eco indicador 99.

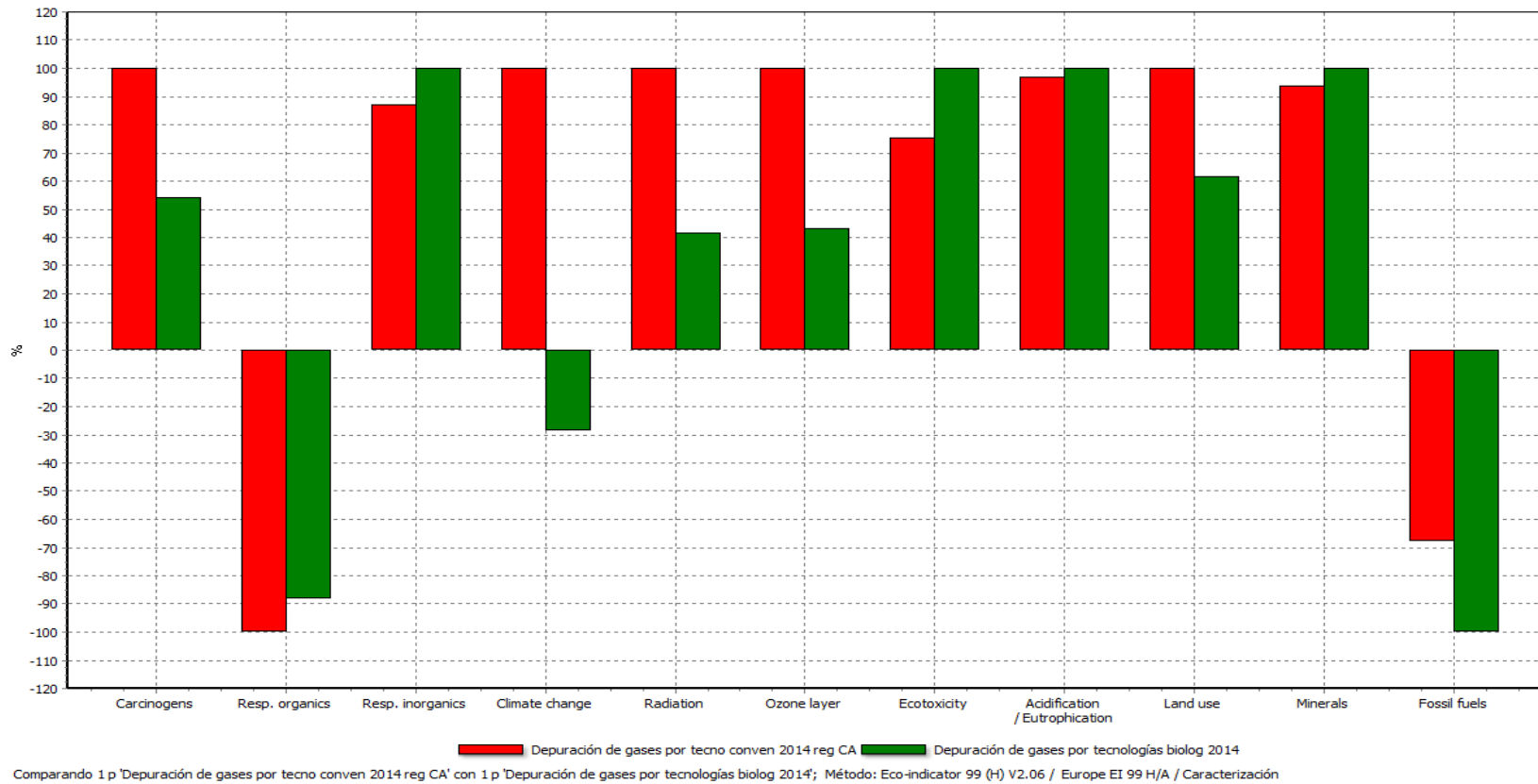


Figura 21: Comparación de la caracterización de los resultados de la tecnología biológica y la convencional con regeneración de carbón activo mediante el método eco indicador 99

III. Análisis de sensibilidad

Uno de los factores más influyentes en los impactos ambientales de las tecnologías que se han estudiado es su consumo de energía y los impactos que ésta genera. El ACV se ha llevado a cabo con el mix energético de España de 2014 que está detallado en el apartado 4. Sin embargo, varias directivas europeas, entre ellas la Directiva 2009/28/CE, instan a que todos los estados miembros fomenten las energías renovables y alcancen en 2020 un cuota de al menos el 20% para este tipo de energía en su mix energético (Directiva 2009/28/CE, 2009). Es más, como se muestra en la figura 22, en la Universidad de Stanford (EEUU) han desarrollado un plan para que en 2050 el 100% de la energía sea de origen renovable (Thesolutionsproject, 2015).

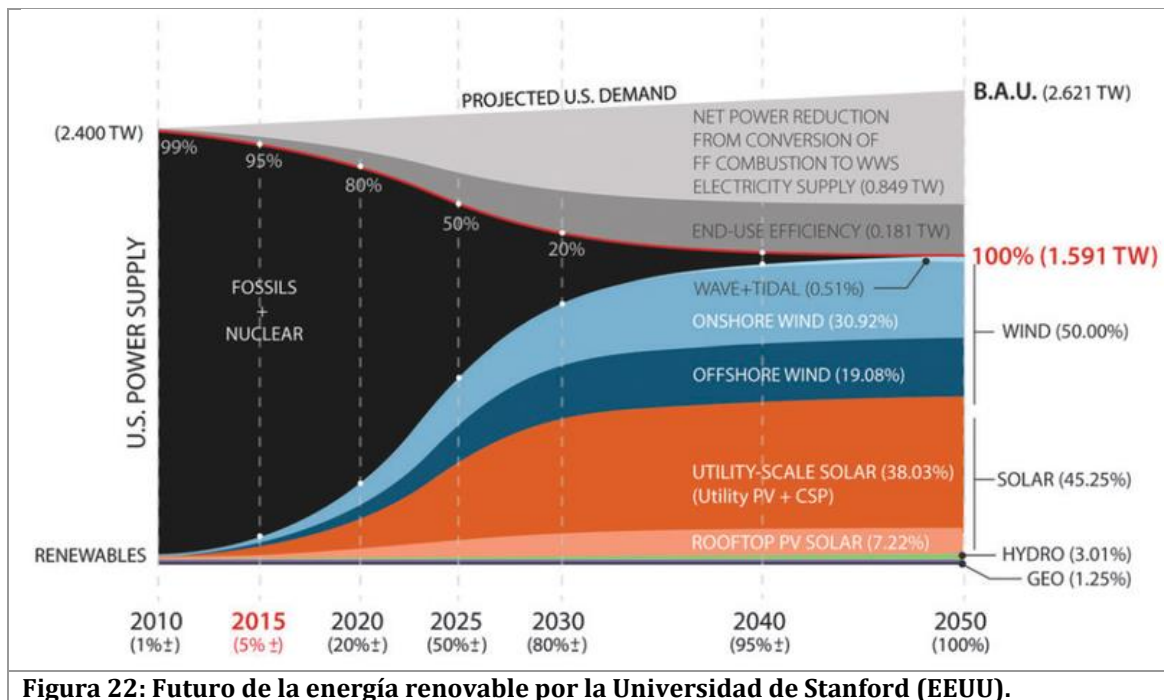


Figura 22: Futuro de la energía renovable por la Universidad de Stanford (EEUU).

Por lo tanto, si se supusiera que en año 2050 al menos el 70% de la energía consumida en España fuera de origen renovable, los impactos que generarían las tecnologías que hemos estudiado serían los que se indican a continuación:

En la figura 23 se pueden ver las diferencias de impacto ambiental que existe para la tecnología biológica con el mix energético de 2014 y el que se ha supuesto para el 2050. Obviamente, se observa cómo han descendido los impactos asociados a las fuentes de energía no renovables, es el caso de la categoría de impacto de la radiación por la energía nuclear, y del cambio climático, respiración de sustancias orgánicas y acidificación/eutrofización por el consumo de combustibles fósiles. Sin embargo también se aprecia que en algunas categorías, el impacto aumenta como es el caso de los minerales principalmente por su consumo en la fabricación de paneles solares.

Por otra parte, en la figura 24 se puede apreciar la escasa diferencia que hay entre los impactos ambientales generados por la tecnología convencional en la actualidad en el futuro 2050. Esto es debido a que, como se ha dicho anteriormente y este gráfico confirma,



principalmente el impacto ambiental de la tecnología convencional sin regeneración del carbón activo está asociado al ciclo de vida adicional del carbón activo. Sin embargo, en la figura 25, se muestra la misma comparación pero para la tecnología convencional con un escenario de regeneración del carbón activo. En este caso se puede ver cómo, al igual que sucedía para la tecnología biológica, hay un importante descenso de impacto en las categorías asociadas con las fuentes de energía no renovables.

Por último, en la figura 26, se puede ver más claramente cómo descienden los impactos negativos (valores positivos en el gráfico) asociados con las energías no renovables en el año 2050 (la categoría de impacto de fuentes de energía no renovable asociada a combustibles fósiles no desciende ya que la cantidad de gas natural, y por lo tanto las cargas evitadas, serían las mismas), mientras que, en el caso de las energías renovables, los impactos negativos aumentan ya que éstas estarían mucho más extendidas.

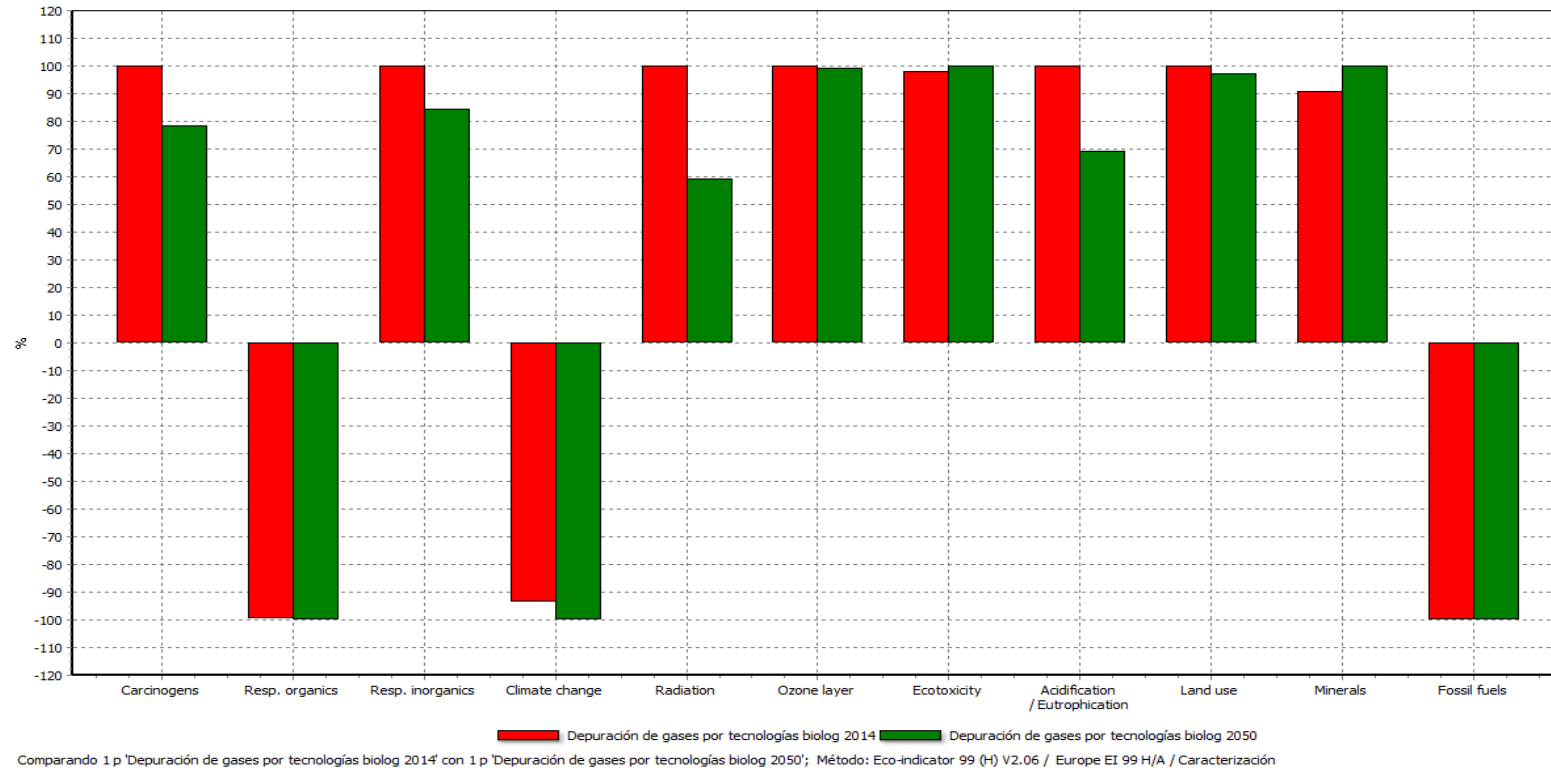


Figura 23: Comparación de la caracterización de los resultados de la tecnología biológica en 2014 y en 2050 mediante el método eco indicador 99

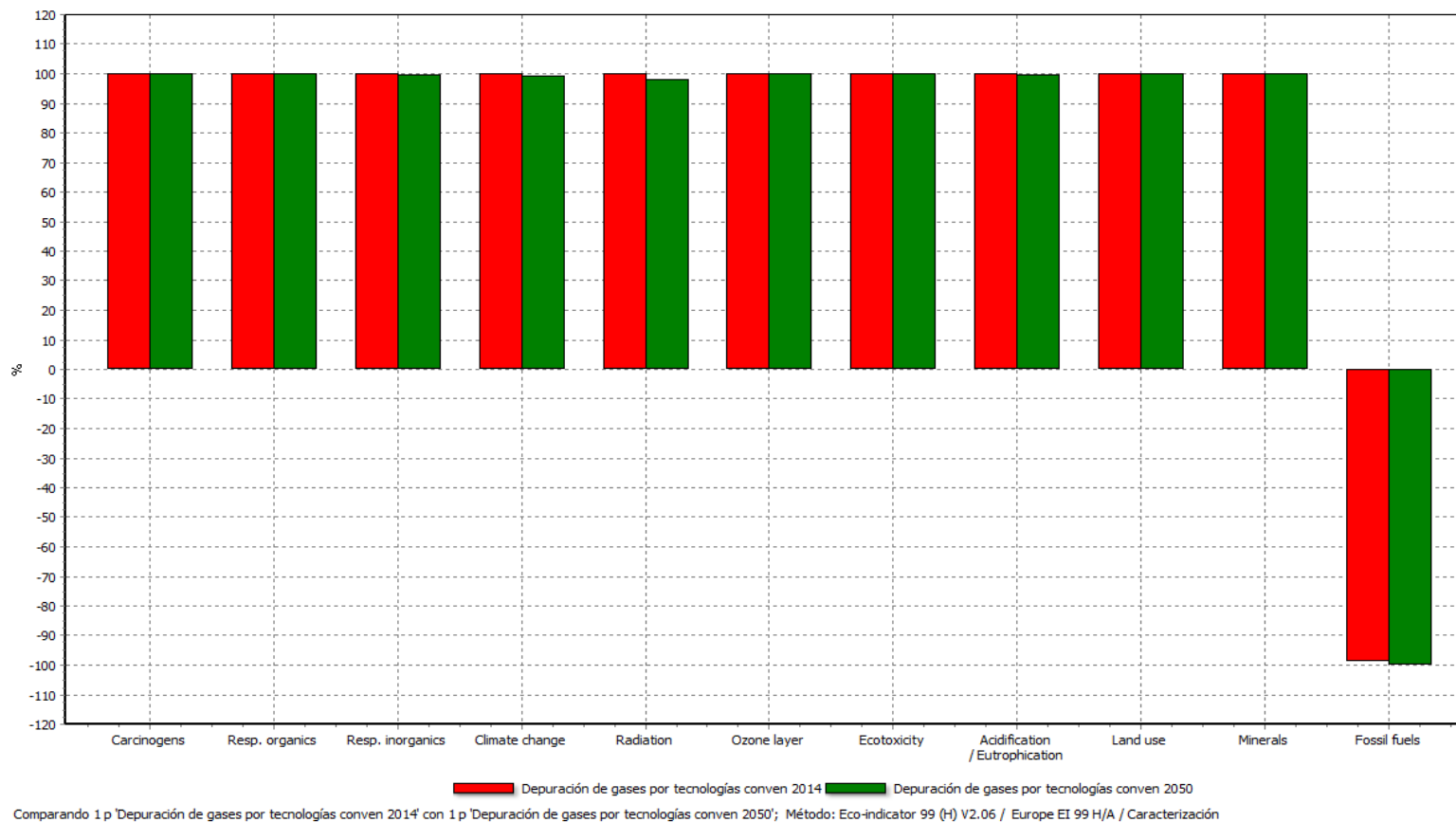


Figura 24: Comparación de la caracterización de los resultados de la tecnología convencional en 2014 y en 2050 mediante el método eco indicador 99

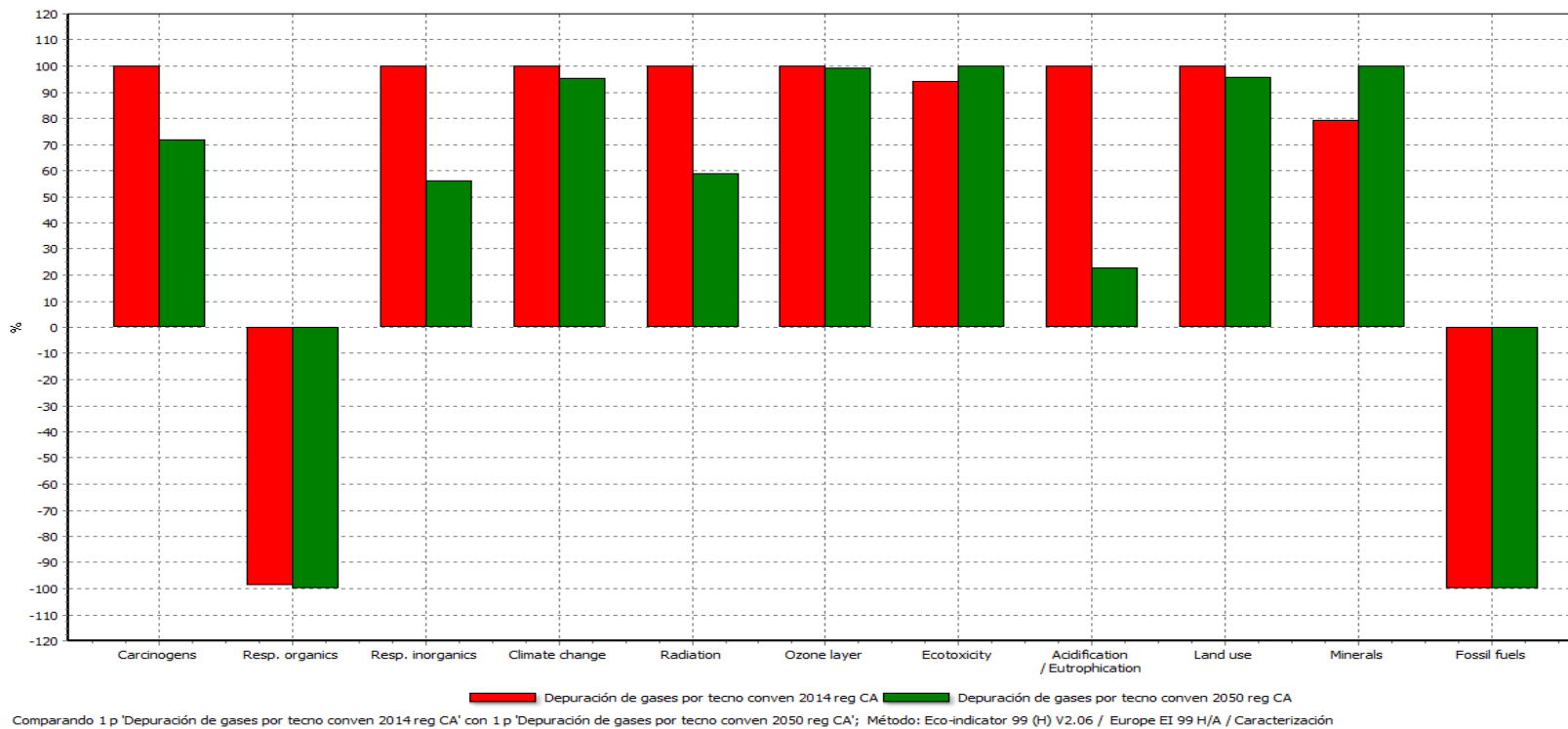


Figura 25: Comparación de la caracterización de los resultados de la tecnología convencional con regeneración del carbón activo en 2014 y en 2050 mediante el método eco indicador 99

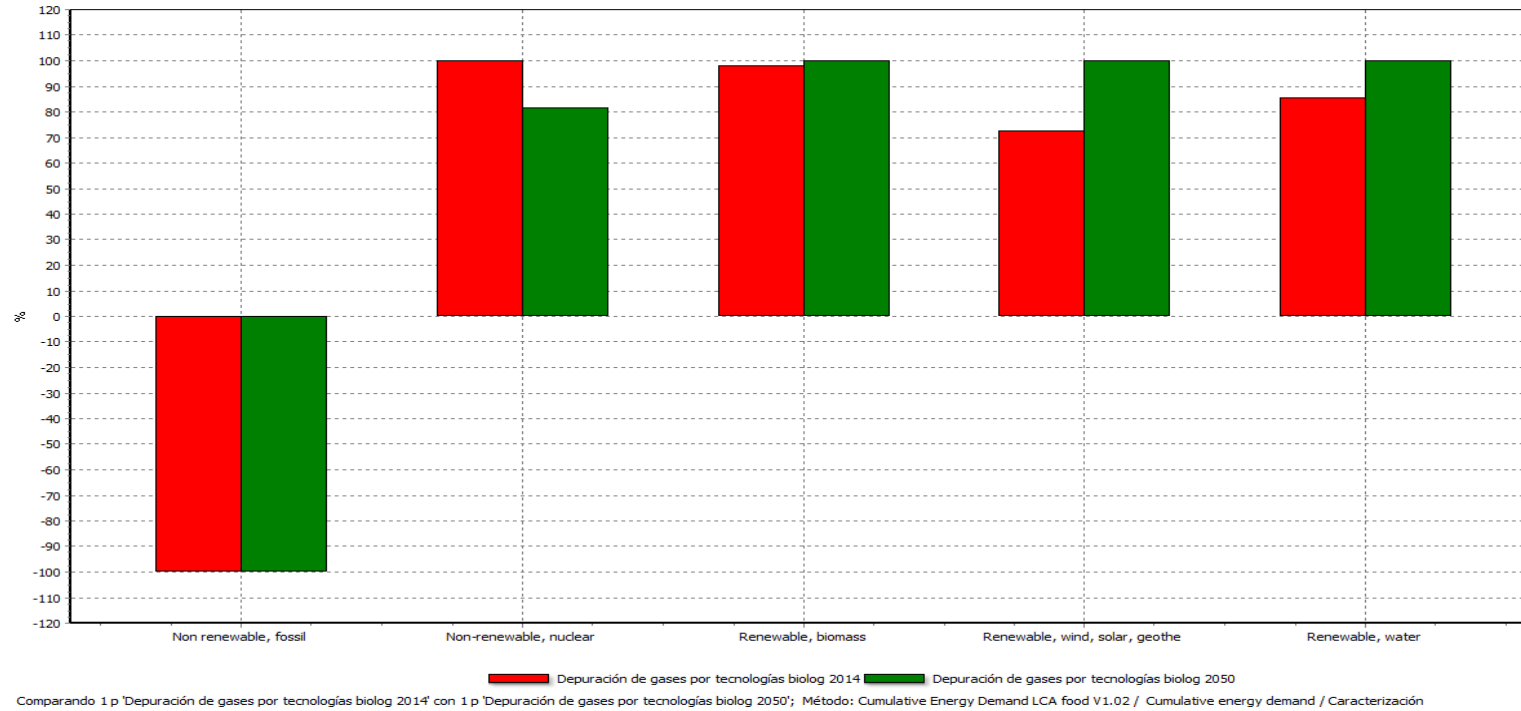


Figura 26: Comparación de la caracterización de los resultados de la tecnología biológica en 2014 y en 2050 mediante el método CED



6. Conclusiones

- La tecnología convencional es la que más impactos negativos tiene con los tres métodos con los que se ha analizado.
- El impacto negativo en el caso de la tecnología convencional está originado principalmente por el carbón activo que se usa para adsorber el H_2S del biogás cuando no se regenera.
- Llevando a cabo la regeneración del carbón activo de la tecnología convencional, los impactos se reducen de forma considerable siendo las operaciones que más carga ambiental tienen las asociadas a la energía necesaria para llevar a cabo el proceso de depuración.
- En el caso de la tecnología biológica, los mayores impactos ambientales están asociados a la energía necesaria para el proceso de depuración, en especial para el proceso del enriquecimiento en metano del biogás. Aún así, la energía consumida es menor en la tecnología biológica que en la convencional.
- Si en el país se apuesta por las energías limpias o renovables que contaminan menos modificando el mix energético, los impactos ambientales de ambas tecnologías se ven sensiblemente reducidos.
- Gracias al proceso de enriquecimiento en metano del biogás en la tecnología biológica se obtiene mucho más biometano por m^3 de biogás bruto a depurar que por la tecnología convencional. Esto conlleva que las cargas evitadas o los impactos positivos son mucho mayores con la tecnología biológica. No obstante, los dos procesos son generadores de energía ya que producen más energía de la que consumen.



7. Bibliografía

1. Bauer, F., Hulteberg, C., Persson, T., Tamm, D., Biogas upgrading – Review of commercial technologies.2013. 2: 36-47.
2. Boletín Oficial del Estado. 2013. Núm. 6, Sección I: 889-892.
3. CTA Refrigeración, generadores Oxymat, [Web en línea] <> <http://www.ctarefrigeracion.com/productos/gas/oxymat.html>>. [Consulta: 21/06/2015].
4. Demanda de energía acumulada (CED), [Web en línea] <> <http://www.earthshift.com/software/simapro/ced>>. [Consulta: 26/08/2015].
5. Demanda de energía acumulada (CED) 2, [Web en línea] <> <http://www.ecolaningenieria.com/ingenieria-ambiental/analisis-ambiental>>. [Consulta: 26/08/2015].
6. Díaz, I., Pérez, C., Alfaro, N., Fdz-Polanco, F. A feasibility study on the bioconversion of CO₂ and H₂ to biomethane by gas sparging through polymeric membranes. 2015. 1: 2-7.
7. Díaz, I., Pérez, S. I., Ferrero, E. M., Fdz-Polanco, M. Effect of oxygen dosing point and mixing on the microaerobic removal of hydrogen sulphide in sludge digesters. 2010. 1: 2-6.
8. Díaz, I., Ramos, I., Fdz-Polanco, M. Economic analysis of microaerobic removal of H₂S from biogas in full-scale sludge digesters. 2015. 1: 3-4.
9. Directiva 2009/28/CE [Web en línea] <> <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2009-81013> >. [Consulta: 03/09/2015].
10. Eco-Indicador 99, [Web en línea] <> <http://www.copperalliance.es/docs/librariesprovider13/resources/analisis-ciclo-vida-tubos-cobre-pdf.pdf?sfvrsn=0> >. [Consulta: 25/08/2015].
11. El biogás, la energía renovable con mayor potencia en España y en Europa, [Web en línea] <> <http://twenergy.com/a/el-biogas-la-energia-renovable-con-mayor-potencial-en-espana-y-en-europa-1131/> >. [Consulta: 11/08/2015].
12. European Biogas Association (EBA), Informe 2012 sobre la producción de biogás en Europa, [Web en línea] <> <http://european-biogas.eu/biogas> >. [Consulta: 29/06/2015].
13. Explicación de la ponderación, [Web en línea] <> <http://www.construction21.org/espana/community/pg/pages/view/549/>>. [Consulta: 01/09/2015].



14. Filtros ABAC, [Web en línea] <>
<http://www.abacaircompressors.com/es/ourproducts/airsolutions/filtersandaccessories/>. [Consulta: 10/08/2015].
15. K. Hjaila, K., Baccar R., Sarrà M., Gasol C.M., Blánquez P. Environmental impact associated with activated carbon preparation from olive-waste cake via life cycle assessment. 2013. 3: 4 p.
16. Módulos de membrana, [Web en línea] <>
<http://www.kochmembrane.com/PDFs/Data-Sheets/Hollow-Fiber/UF/puron-mbr-modules-psh330-660-1800-datasheet.aspx>. [Consulta: 23/06/2015].
17. Oficina Catalana del Cambio Climático, balance eléctrico diario 2014 de Red Eléctrica de España [Web en línea] <>
http://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/home/redueix_emissions/factors_emissio_associats_energia/2014-REE_Balance-diario-a-31diciembre_v29_01_15.pdf >. [Consulta: 24/08/2015].
18. Perez, F., Análisis del ciclo de vida comparativo de una mermalada de naranja ecológica y no ecológica. 2013. 2: 27-28.
19. Plan sobre el futuro de las energías renovables de la Universidad de Stanford (EEUU), [Web en línea] <> <http://thesolutionsproject.org/> >. [Consulta: 03/09/2015].
20. SimaPro, [Web en línea] <> <http://www.simapro.es/> >. [Consulta: 11/06/2015].



8. Anexos

1. Cálculos

A. Cálculos sobre la tecnología alternativa

Basándose en la siguiente tabla de corrientes (tabla 21), se ha llevado a cabo muchos de los cálculos necesarios para obtener los datos necesarios para introducir al programa.

Tabla 21: Tabla de corrientes tecnología biológica.

CORRIENTES GASEOSAS									
Corriente	1	2	3	4	5	6	7	10	11
Caudal	Q (Nm3/h)	Q (Nm3/h)	Q (Nm3/h)	Q (Nm3/h)	Q (Nm3/h)	Q (Nm3/h)	Q (Nm3/h)	Q (Nm3/h)	Q (Nm3/h)
CH4	0,00000	0,00000	108,33333	325,00000	0,00000	325,00000	2241,69854	2566,69854	474,60000
CO2	0,00000	0,00000	56,66667	170,00000	0,00000	170,00000	19,73885	189,73885	4,17900
H2S	0,00000	0,00000	0,00520	0,01560	0,00000	0,01560	0,02475	0,04035	0,00524
O2	0,74041	0,74041	0,49863	1,49590	0,00000	1,49590	7,06563	8,56152	1,49590
N2	2,78534	0,03897	0,68711	2,06133	0,00000	2,06133	9,73637	11,79770	2,06133
H2	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	680,00000	680,00000	78,95540	758,95540	16,71600
NH3	0,00000	0,00000	0,01244	0,03731	0,00000	0,03731	0,00000	0,03731	0,00000
Benceno	0,00000	0,00000	0,00001	0,00004	0,00000	0,00004	0,00000	0,00004	0,00000
Tolueno	0,00000	0,00000	0,00020	0,00061	0,00000	0,00061	0,00000	0,00061	0,00000
Siloxanos	0,00000	0,00000	0,00025	0,00075	0,00000	0,00075	0,00353	0,00427	0,00075
Total	3,52575	0,77938	166,20384	498,61153	680,00000	1178,61153	2357,22307	3535,83460	499,05821

- Consumo de energía del generador de oxígeno:

$$\text{Consumo de energía dada por el fabricante Oximat (Oximat, 2015)} = 1,1 \frac{kW}{Nm^3 \text{ oxígeno de salida}}$$

$$\text{Caudal de oxígeno} = \frac{2,22 \frac{Nm^3 \text{ oxígeno}}{h}}{500 \frac{Nm^3 \text{ biogás}}{h}} \quad [1]$$

$$\text{Consumo del generador de oxígeno / UF} = 4,44 * 10^{-3} \frac{Nm^3 \text{ de oxígeno}}{UF} *$$

$$1,1 \frac{kW}{Nm^3 \text{ oxígeno de salida}} = 4,88 * 10^{-3} \frac{kW}{UF} \quad [2]$$

- Emisiones de nitrógeno por el generador de oxígeno: son las emisiones de nitrógeno que genera el generador de oxígeno al enriquecer el aire hasta el 95% de O₂.

$$\text{Emisiones de nitrógeno por hora} = \frac{8,23 \frac{Nm^3 \text{ nitrógeno}}{h}}{500 \frac{Nm^3 \text{ biogás}}{h}} \quad [3]$$

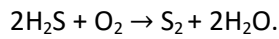
$$\text{Cantidad de N}_2 \text{ vertido a la atmósfera} = \frac{\text{Volumen N}_2}{\text{Volumen de un mol en CN}} \cdot \text{Peso molecular del N}_2 \quad [4]$$

$$\text{Cantidad de N}_2 \text{ vertido a la atmósfera} = \frac{0,01 \frac{l}{mol \text{ en CN}}}{22,4 \frac{l}{mol \text{ en CN}}} * 28 \frac{gr}{mol N_2}$$



$$\text{Emisiones de nitrógeno / UF} = 0,02 \frac{\text{Kg N}^2}{\text{UF}}$$

- Hidrógeno necesario a introducir en el reactor: necesario para que se produzca la siguiente reacción:



$$\text{Caudal de hidrógeno} = \frac{680 \frac{\text{Nm}^3 \text{ hidrógeno}}{\text{h}}}{500 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{\text{h}}}$$

$$\text{Caudal de H}_2 = \frac{\text{Volumen H}_2}{\text{Volumen de un mol en CN}} * \text{Peso molecular del H}_2 \quad [5]$$

$$\text{Caudal de H}_2 = \frac{1,36 \text{ l}}{22,4 \frac{\text{l}}{\text{mol en CN}}} \cdot 2 \frac{\text{gr}}{\text{mol H}_2}$$

$$\text{Caudal de hidrógeno / UF} = 0,12 \frac{\text{kg H}_2}{\text{UF}}$$

- Energía producida por el biogás: basándose en la tabla de corrientes, se ha calculado el poder calorífico generado por el biogás que se va a producir con los poderes caloríficos de las sustancias del biogás que son combustibles:

$$\text{Caudal de metano producido} = 474,60 \frac{\text{Nm}^3 \text{ CH}_4}{\text{h}}$$

$$\text{Poder calorífico del metano por mol} = \Delta H_c = -890,95 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\text{Energía generada por el CH}_4 = \frac{\text{Volumen CH}_4}{\text{Volumen de un mol en CN}} * \text{Poder calorífico del CH}_4 \quad [6]$$

$$\text{Energía generada por el CH}_4 = \frac{474600 \text{ l}}{22,4 \frac{\text{l}}{\text{mol en CN}}} * (-890,95 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}})$$

$$\text{Energía generada por el CH}_4 = -18877025,20 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$\text{Caudal de hidrógeno producido} = 16,71 \frac{\text{Nm}^3 \text{ H}_2}{\text{h}}$$

$$\text{Poder calorífico del hidrógeno por mol} = \Delta H_c = -286 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\text{Energía generada por el hidrógeno} = \frac{\text{Volumen H}_2}{\text{Volumen de un mol en CN}} * \text{Poder calorífico del H}_2 \quad [7]$$

$$\text{Energía generada por el hidrógeno} = \frac{16716 \text{ l}}{22,4 \frac{\text{l}}{\text{mol en CN}}} * (-286 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}})$$

$$\text{Energía generada por el hidrógeno} = -213427,5 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$\text{Energía generada total} = \frac{\text{Energía generada por el CH}_4 + \text{Energía generada por el H}_2}{\text{Caudal de biogás en un hora}} \quad [8]$$



$$\text{Energía generada total} = -18877025,20 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} + (-213427,5 \frac{\text{kJ}}{\text{h}})$$

$$\text{Energía generada total} = \frac{-19090452,7 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}{500 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{\text{h}}} \quad [9]$$

$$\text{Energía generada / UF} = -38180,90 \frac{\text{kJ}}{\text{UF}}$$

- Consumo eléctrico del equipo metanogénico (según las indicaciones de I. Díaz): consumo eléctrico de los equipos asociados al reactor metanogénico.

$$\text{Consumo de la soplante} = 1,51 \frac{\text{kWh}}{\text{h}}$$

$$\text{Consumo del cambiador de calor} = 45 \frac{\text{kWh}}{\text{h}}$$

$$\text{Equipo de compresión} = 14,93 \frac{\text{kWh}}{\text{h}}$$

$$\text{Bomba de recirculación} = 2,15 \frac{\text{kWh}}{\text{h}}$$

$$\text{Bomba de introducción de centrate} = 0,15 \frac{\text{kWh}}{\text{h}}$$

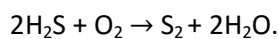
$$\text{Bomba de salida de centrate} = 0,35 \frac{\text{kWh}}{\text{h}}$$

$$\text{Caudal tratado} = 500 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{\text{h}}$$

$$\text{Total de consumo del reactor metanogénico} = \frac{\text{Consumo total en una hora}}{\text{UF}} \quad [10]$$

$$\text{Total de consumo del reactor metanogénico} = \frac{64,05 \text{ kWh}}{500 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{\text{h}}} = 0,12 \frac{\text{kWh}}{\text{UF}}$$

- Acumulación de azufre en el reactor (según las indicaciones de I. Díaz): acumulación de azufre elemental depositado en el reactor procedente de la siguiente reacción:



$$\text{Acumulación de azufre en el reactor en 10 años} = \frac{15000 \frac{\text{kg S}}{10 \text{ años}}}{43800000 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{10 \text{ años}}} \quad [11]$$

$$\text{Acumulación de azufre en el reactor / UF} = 3,42 * 10^{-5} \frac{\text{kg S}_2}{\text{UF}}$$

- Nitrógeno necesario para inertizar el reactor (según las indicaciones de I. Díaz): a consecuencia de la acumulación de azufre en el reactor, cuando se ejecuta el mantenimiento del mismo, es necesario utilizar nitrógeno para inertizar dicho reactor.



$$\text{Nitrógeno necesario en 10 años} = \frac{62000 \frac{\text{kg N}_2}{10 \text{ años}}}{43800000 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{10 \text{ años}}} \quad [12]$$

$$\text{Nitrógeno necesario / UF} = 1,41 * 10^{-4} \frac{\text{kg N}_2}{\text{UF}}$$

- Consumo energético necesario para inertizar el reactor (según las indicaciones de I. Díaz): gastos energéticos asociados a la operación descrita en el apartado anterior.

$$\text{Energía necesaria por cada limpieza del reactor} = \frac{60000 \frac{\text{kWh}}{10 \text{ años}}}{43800000 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{10 \text{ años}}} \quad [13]$$

$$\text{Energía necesaria / UF} = 1,36 * 10^{-3} \frac{\text{kWh}}{\text{UF}}$$

- Membrana del reactor metanogénico (según las indicaciones de I. Díaz): la membrana necesaria para que se pueda llevar a cabo este proceso está compuesta principalmente por polifluoruro de vinilideno (PVDF), PET y un soporte de acero inoxidable. Habiendo indicado I Díaz la superficie de membrana necesaria y con los datos técnicos necesarios obtenidos de la página web de la empresa, se pueden obtener los siguientes datos para introducirlos al programa.

$$\text{Superficie de membrana necesaria} = 12600 \text{ m}^2 (7 \text{ módulos de } 1800 \text{ m}^2)$$

$$\text{Peso por módulo de membrana [Kochmembrane, 2015]} = 1570 \frac{\text{kg}}{\text{módulo}}$$

$$\text{Peso total de las membranas} = 1570 \frac{\text{kg}}{\text{módulo}} * 7 \text{ módulos} = 10990 \frac{\text{kg}}{\text{Total membrana}}$$

Se ha estimado que el 70% del peso del módulo de membrana es el soporte de acero inoxidable (que no hay que sustituir) y el resto son el soporte de PET y el PVDF que tienen una vida útil de 3 años.

$$\text{Total acero inoxidable} = 10990 \text{ kg} * 70\% = 7693 \text{ kg de acero inoxidable.} \quad [14]$$

$$\text{Total acero inoxidable / UF} = \frac{7693 \text{ kg}}{87600000 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{20 \text{ años}}} = 8,78 * 10^{-5} \frac{\text{kg acero inoxidable}}{\text{UF}} \quad [15]$$

$$\text{Total acero inoxidable / UF} = 8,78 * 10^{-5} \frac{\text{kg acero inoxidable}}{\text{UF}}$$

El resto del peso de la membrana, 3297 kg, se divide, en:

- PVDF:

$$\text{Espesor de la membrana [Kochmembrane, 2015]} = 125 \mu\text{m}$$

$$\text{Peso específico del PVDF} = 1,78 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$



$$\text{Total PVDF} = \text{Peso}_{\text{PVDF}} \cdot \text{Superficie de membrana} \cdot \text{espesor de membrana} \quad [15]$$

$$\text{Total PVDF} = 1780 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 12600 \text{ m}^2 \cdot 1,25 \mu\text{m} \cdot 10^{-4} \text{ m} = 2803,5 \frac{\text{kg PVDF}}{3 \text{ años}}$$

$$\text{PVDF necesario cada 3 años (vida útil)} = \frac{2803,5 \frac{\text{kg PVDF}}{3 \text{ años}}}{13140000 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{3 \text{ años}}} \quad [16]$$

$$\text{PVDF necesario / UF} = 2,13 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg PVDF}}{\text{UF}}$$

○ PET:

Total PET = Peso total del resto – peso total del PVDF

$$\text{Total PET} = 3297 \text{ kg resto} - 2803,5 \text{ kg PVDF} = 4493,5 \frac{\text{kg PET}}{3 \text{ años}}$$

$$\text{PET necesario cada 3 años (vida útil)} = \frac{4493,5 \frac{\text{kg PET}}{3 \text{ años}}}{13140000 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{3 \text{ años}}} \quad [17]$$

$$\text{PET necesario / UF} = 3,75 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg PET}}{\text{UF}}$$

➤ Diseño del digester metanogénico:

Se ha diseñado una torre cilíndrica para poder hacer frente al caudal (C) que hemos fijado (500 $\frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{\text{h}}$) y un tiempo de residencia (TRH) de 50 minutos.

$$V = \text{TRH} \cdot C \quad [18]$$

$$V = 0,83 \text{ h} \cdot 500 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{\text{h}}$$

$$\text{Volumen del digester} = 415 \text{ m}^3.$$

Donde:

Volumen = Volumen del digester.

TRH = Tiempo hidráulico de residencia.

C = Caudal

Se ha fijado la altura del digester en 6 metros (h). Con estos datos se podrá estimar la cantidad de cemento necesario para la fabricación de dicho digester.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad [19]$$



$$r = \sqrt{\frac{V}{r \cdot h}} = \sqrt{\frac{415 \text{ m}^3}{\pi \cdot 6 \text{ m}}} = 4,69 \text{ m}$$

$$D = 2 \cdot r = 9,38 \text{ m} \approx 10 \text{ m}$$

Donde:

V = volumen del digestor.

r = radio de la base del digestor.

D = diámetro del digestor.

h = altura del digestor.

Dicho digestor se va a llevar a cabo con cemento. Para saber la cantidad de cemento necesario se va a necesitar la superficie del digestor. Con ello, se podrá saber el volumen de cemento que va a ser empleado:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r^2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \quad [20]$$

$$S = 2 \cdot \pi \cdot 5 \text{ m} \cdot (5 \text{ m} + 6 \text{ m})$$

$$S = 345,57 \text{ m}^2$$

Donde:

S = Superficie del digestor.

r = Radio del digestor.

h = Altura del digestor.

El digestor está formado por cemento de 1,5 metros de espesor, por lo tanto, el volumen de cemento que vamos a necesitar para la construcción del reactor es el siguiente:

$$\text{Volumen de cemento necesario} = \text{Área de cemento necesario} \cdot \text{espesor} \quad [21]$$

$$\text{Volumen de cemento necesario} = 345,57 \text{ m}^2 \cdot 1,5 \text{ m} = 518,36 \text{ m}^3.$$

➤ Pack de tuberías y válvulas:

$$\text{Tubería de acero inoxidable de diámetro } \frac{3'}{4}: 3\text{m} \cdot 1,03 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 3,09 \text{ kg}.$$



Tubería de acero inoxidable de diámetro 1': $30m * 0.80 \frac{kg}{m} = 24 \text{ kg}$.

Tubería de acero inoxidable de diámetro 3': $130m * 4.51 \frac{kg}{m} = 586.3 \text{ kg}$.

Tubería de acero inoxidable de diámetro 15': $20m * 20 \frac{kg}{m} = 400 \text{ kg}$.

Total de válvulas de acero inoxidable= 25 uds. * $38 \frac{Kg \text{ acero inoxidable}}{uds} = 950 \text{ kg}$.

Total tuberías y válvulas= 1963,39 kg de acero inoxidable.

B. Cálculos tecnología convencional

➤ Diseño de la torre de adsorción de carbón activo:

Se ha diseñado una torre cilíndrica para poder hacer frente al caudal (C) que hemos fijado ($500 \frac{Nm^3 \text{ biogás}}{h}$) y un tiempo de residencia (TRH) de 12 minutos. Dicho TRH y la vida útil del carbón fueron determinados en base a la capacidad de adsorción específica de H₂S (0,1 g H₂S / g carbón activo) (Muñoz et al. 2015).

$$V = TRH * C \quad [22]$$

$$V = 0,2 \text{ h} * 500 \frac{Nm^3 \text{ biogás}}{h}$$

Volumen de lecho de carbón activo (CA)= 100 m³.

Donde:

Volumen= Volumen de lecho de CA.

TRH= Tiempo hidráulico de residencia.

C = Caudal

El volumen del lecho de carbón activo debe ser la mitad del volumen total del tanque, por lo tanto, el volumen total del tanque tiene que ser de 200 m³.

Se ha fijado la altura del lecho de CA en 1 metro y la altura del tanque (h) será de 2 metros. Con estos datos se podrá estimar la cantidad de fibra de vidrio necesaria para la fabricación del tanque de CA.

$$V = \pi * r^2 * h \quad [23]$$

$$r = \sqrt{\frac{V}{\pi * h}} = \sqrt{\frac{200 \text{ m}^3}{\pi * 2 \text{ m}}} = 5,65 \text{ m}$$

$$D = 2 * r = 11,3 \text{ m}$$



Donde:

V = Volumen de la torre de adsorción.

r = Radio de la base de la torre.

D = Diámetro de la torre.

h = Altura de la torre.

La superficie de la torre y la fibra de vidrio necesaria serán:

$$S = 2 * \pi * r^2 + 2 * \pi * r * h \quad [24]$$

$$S = 2 * \pi * 5,65 m * (5,65 m + 2 m)$$

$$S = 271,6 m^2$$

Donde:

S = Superficie de la torre de adsorción

r = Radio de la base de la torre.

h = Altura de la torre.

Las torres están formadas por láminas de fibra de vidrio con un peso específico de $600 \frac{g}{m^2}$. (Revista Iberoamericana de Polímeros, 2011). Para conseguir el espesor necesario se deben superponer 3 láminas necesitándose 978 kg de fibra de vidrio para fabricar las torres de CA.

Cantidad de fibra de vidrio = S * p_{FB} * Número de láminas

$$\text{Cantidad de fibra de vidrio} = 271,6 m^2 * 2 \frac{g}{m^2} * 0,6 \frac{g}{m^2} * 3$$

$$\text{Cantidad de fibra de vidrio} = 977,76 \text{ kg} \approx 978 \text{ kg.}$$

Donde:

S = Superficie de la torre.

p_{FB} = Peso específico de la fibra de vidrio.

➤ Consumo de carbón activo:

$$\text{Vida útil del CA} = \frac{\text{volumen de lecho} * \text{Densidad de CA} * \text{Capacidad de adsorción de CA}}{\text{Caudal} * \left(\frac{g_S}{Pm_S} * Pm_{H_2S} \right) * \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}}} \quad [25]$$



$$\text{Vida útil del CA} = \frac{100 \text{ m}^3 * 450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,1 \frac{\text{gr H}_2\text{S}}{\text{gr carbón activo}}}{500 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{\text{h}} * \left(\frac{0,006 \text{ gr}}{32 \frac{\text{gr}}{\text{mol S}}} * 34 \frac{\text{gr}}{\text{mol H}_2\text{S}} \right) * \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}}}$$

Vida útil del lecho de CA hasta saturación = 50,8 días ≈ 51 días.

$$\text{Cantidad de carbón activo / recambio del lecho cada 51 días} = 450000 \frac{\text{kg de carbón activo}}{\text{recambio de lecho de CA}}$$

➤ Residuos de carbón del carbón activo:

$$\text{Consumo de CA / UF} = 0,0738 \frac{\text{kg CA}}{\text{UF}} * 95\% \text{ es carbón puro.} \quad [26]$$

$$\text{Residuos de carbón del carbón activo} = 0,070 \frac{\text{kg carbón}}{\text{UF}}$$

➤ Consumo energético del compresor del proceso de adsorción por carbón activo:

$$\text{Consumo compresor CA} = \frac{\frac{\text{Caudal}}{3600 \text{ seg}} * \left(\frac{\text{h} * \text{Pca}}{1000 \text{ m}} \right)}{\frac{\text{Rendimiento} * 24\text{h} * 365\text{d} * 3600 \text{ seg}}{3600 \text{ seg}}} \quad [27]$$

$$\text{Consumo compresor CA} = 2955 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

Donde:

kWh CA = Consumo de energía del compresor de CA.

h = Altura de lecho = 1m.

$$\text{Pca} = \text{Pérdida de carga por unidad de longitud del lecho} = 1700 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$$

$$\text{Consumo anual de compresor de CA} = \frac{2955 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}}{4380000 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{\text{año}}}$$

$$\text{Consumo de energía / UF} = 6,74 * 10^{-3} \frac{\text{kWh}}{\text{UF}}$$

➤ Diseño columna de absorción con agua (Scrubber):

Al igual que en el caso de carbón activo, se ha diseñado una torre cilíndrica, esta vez de acero, para poder hacer frente al caudal que hemos fijado ($500 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{\text{h}}$) y un tiempo de residencia (TRH) de 1,2 minutos (Muñoz et al. 2015).

$$V = \text{TRH} * C \quad [28]$$



$V = \text{Tiempo de residencia en el lecho de CA} = 1,2 \text{ min}$ y caudal = $500 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{\text{h}}$.

Volumen de la torre de absorción = 10 m^3 .

Se ha fijado una altura de columna (h) de 2 metros. Por lo tanto, el diámetro de la columna debe ser el siguiente:

$$V = \pi * r^2 * h \quad [29]$$

$$r = \sqrt{\frac{V}{\pi * h}} = \sqrt{\frac{10 \text{ m}^3}{\pi * 2 \text{ m}}} = 1,26 \text{ m}$$

$$D = 2 * r = 2,52 \text{ m}$$

Donde:

V = Volumen de la columna de adsorción.

r = Radio de la base de la columna.

D = Diámetro de la columna.

h = Altura de la columna.

La columna de absorción está formada por acero de 10 mm de espesor con un peso específico de $50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. La superficie de la columna de absorción y, por lo tanto, la cantidad de acero necesario, son las siguientes:

$$S = 2 * \pi * r^2 + 2 * \pi * r * h \quad [30]$$

$$S = 2 * \pi * 1,26 \text{ m} * (1,26 \text{ m} + 2 \text{ m})$$

$$S = 25,8 \text{ m}^2$$

Donde:

S = Superficie de la torre de adsorción

r = Radio de la base de la torre.

h = Altura de la torre.

$$\text{Cantidad de acero} = S * \rho_{\text{Acero}} \quad [31]$$

$$\text{Cantidad de acero} = 25,8 \text{ m}^2 * 50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$



Cantidad de acero = 1290 kg

Donde:

S = Superficie de la torre.

ρ_{Acero} = Peso específico del acero.

➤ Diseño flash de descompresión:

Al igual que la columna de absorción, la columna flash se va a fabricar con acero de 10 mm de espesor con un peso específico de $50 \frac{kg}{m^3}$. Se determinó, según las referencias bibliográficas (Muñoz et al. 2015), que el volumen de esta torre debe ser la mitad del volumen de la columna de absorción, es decir, $5 m^3$. La altura de la torre se ha establecido en 1 metro. Por lo tanto, la superficie y el acero necesario para la fabricación de la torre son los siguientes:

$$V = \pi * r^2 * h \quad [32]$$

$$r = \sqrt{\frac{V}{\pi * h}} = \sqrt{\frac{5 m^3}{\pi * 1 m}} = 1,26 m$$

$$D = 2 * r = 2,52 m$$

Donde:

V = Volumen de la columna de adsorción.

r = Radio de la base de la columna.

D = Diámetro de la columna.

h = Altura de la columna.

$$S = 2 * \pi * r^2 + 2 * \pi * r * h \quad [33]$$

$$S = 2 * \pi * 1,26 m * (1,26 m + 1 m)$$

$$S = 17,89 m^2 \approx 18 m^2$$

Donde:

S = Superficie de la torre de adsorción

r = Radio de la base de la torre.

h = Altura de la torre.



$$\text{Cantidad de acero} = S * p_{\text{Acero}} \quad [34]$$

$$\text{Cantidad de acero} = 18 \text{ m}^2 * 50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Cantidad de acero} = 900 \text{ kg}$$

Donde:

S = Superficie de la torre.

p_{Acero} = Peso específico del acero.

➤ Columna de desorción:

Al igual que la columna flash, la columna de desorción se va a fabricar con acero de 10 mm de espesor con un peso específico de $50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$. Además las dimensiones y las características van a ser idénticas que la columna flash (Muñoz et al. 2015). La superficie y el acero necesario para la fabricación de la torre son los siguientes:

$$V = \pi * r^2 * h \quad [35]$$

$$r = \sqrt{\frac{V}{r * h}} = \sqrt{\frac{5 \text{ m}^3}{\pi * 1 \text{ m}}} = 1,26 \text{ m}$$

$$D = 2 * r = 2,52 \text{ m}$$

Donde:

V = Volumen de la columna de adsorción.

r = Radio de la base de la columna.

D = Diámetro de la columna.

h = Altura de la columna.

$$S = 2 * \pi * r^2 + 2 * \pi * r * h \quad [36]$$

$$S = 2 * \pi * 1,26 \text{ m} * (1,26 \text{ m} + 1 \text{ m})$$

$$S = 17,89 \text{ m}^2 \approx 18 \text{ m}^2$$

Donde:

S = Superficie de la torre de adsorción



r = Radio de la base de la torre.

h = Altura de la torre.

$$\text{Cantidad de acero} = S \cdot \rho_{\text{Acero}} \quad [37]$$

$$\text{Cantidad de acero} = 18 \text{ m}^2 \cdot 50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Cantidad de acero} = 900 \text{ kg}$$

Donde:

S = Superficie de la torre.

ρ_{Acero} = Peso específico del acero.

- Energía producida por el biogás: Basándose en la producción de biogás de una planta de depuración de gases por tecnologías convencionales, se ha calculado el poder calorífico generado por el biogás que se va a producir con los poderes caloríficos de las sustancias del biogás que son combustibles:

$$\text{Caudal de metano producido} = 325,00 \frac{\text{Nm}^3 \text{CH}_4}{\text{h}}$$

$$\text{Poder calorífico del metano por mol} = \Delta H_c = -890,95 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\text{Energía generada por el metano} = \frac{\text{Volumen CH}_4}{\text{Volumen de un mol en CN}} \cdot \text{Poder calorífico del CH}_4 \quad [38]$$

$$\text{Energía generada por el metano} = \frac{325000 \text{ l}}{22,4 \frac{\text{l}}{\text{mol en CN}}} \cdot (-890,95 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}})$$

$$\text{Energía generada por el metano} = -12926729,91 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$\text{Energía generada por el total} = \frac{\text{Poder calorífico del CH}_4}{\text{Caudal de biogás en una hora}} \quad [39]$$

$$\text{Energía generada por el total} = \frac{-12926729,91 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}{500 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{\text{h}}} \quad [40]$$

$$\text{Energía generada / UF} = -25853,45 \frac{\text{kJ}}{\text{UF}}$$

- Consumo de agua por el proceso de absorción de water scrubbing:

$$\text{Consumo de agua por el proceso de absorción del water scrubbing} = \frac{0,1 \frac{\text{m}^3 \text{ agua}}{\text{h}}}{500 \frac{\text{Nm}^3 \text{ biogás}}{\text{h}}}$$

[41]



Consumo de agua por el proceso de absorción del water scrubbing / UF = $2 * 10^{-4} \frac{m^3 \text{ de agua}}{UF}$.

- Consumo de energía por el proceso de absorción de water scrubbing:

Consumo energético por el proceso de absorción del water scrubbing / UF = $0,2 \frac{kw/h}{UF}$.

- PVC para membrana de la columna de absorción del water scrubbing:

Volumen de membrana de plástico = $8,3 m^3$ a sustituir cada 10 años.

Densidad del PVC = $1,38 \frac{gr}{cm^3}$

Cantidad de PVC / recambio de membrana cada 10 años = $11454 \frac{kg \text{ de PVC}}{\text{recambio de membra (10 años)}}$.

- Emisión de agua residual por el proceso de absorción del water scrubbing:

Emisión de agua residual / UF = $2 * 10^{-4} \frac{m^3 \text{ de agua residual}}{UF}$.

- Emisión de CO₂ el proceso de absorción del del water scrubbing:

Emisión de CO₂ por tecnología convencional = $\frac{170 \frac{Nm^3 CO_2}{hora}}{500 \frac{Nm^3}{hora}}$ [42]

Cantidad de CO₂ vertido a la atmósfera = $\frac{\text{Volumen } CO_2}{\text{Volumen de un mol en CN}} * \text{Peso molecular del } CO_2$ [43]

Cantidad de CO₂ vertido a la atmósfera = $\frac{340 l}{22,4 \frac{l}{mol \text{ en CN}}} * 44 \frac{gr}{mol CO_2}$

Emisión de CO₂ / UF = $0,66 \frac{kgCO_2}{UF}$.

- Pack de tuberías y válvulas:

Tubería de acero inoxidable de diámetro $\frac{3}{4}$ = $3m * 1.03 \frac{kg}{m} = 3,09 \text{ kg}$.

Tubería de acero inoxidable de diámetro $\frac{1}{2}$ = $30m * 0.80 \frac{kg}{m} = 24 \text{ kg}$

Tubería de acero inoxidable de diámetro 3' = $146m * 4.51 \frac{kg}{m} = 658,46 \text{ kg}$

Tubería de acero inoxidable de diámetro 15' = $25m * 20 \frac{kg}{m} = 500 \text{ kg}$



Total de válvulas de acero inoxidable= 25 uds. * $38 \frac{\text{kg acero inoxidable}}{\text{uds}}$ = 950 kg

Total tuberías y válvulas= 2135,55 kg de acero inoxidable.

➤ Cálculos para la regeneración del carbón activo:

$$\text{Cantidad de vapor} = V_{H_2S} * M_{H_2S} * T_o \quad [43]$$

$$\text{Cantidad de vapor} = 4 \frac{\text{kg agua}}{\text{g } H_2S} * 7,89 \frac{\text{gr } H_2S}{\text{h}} * 1224 \frac{\text{h}}{\text{Recambio}}$$

$$\text{Cantidad de vapor necesario} = 37,81 \frac{\text{kg agua}}{\text{Recambio}}$$

Donde:

V_{H_2S} = Cantidad de vapor de agua necesario / cantidad de H_2S en el carbón activo a regenerar.

M_{H_2S} = Flujo volumétrico de H_2S contenido en el carbón activo a regenerar.

T_o = Tiempo de operación del sistema de regeneración.

$$\text{Energía necesaria para calentar agua de } 20^\circ\text{C a } 100^\circ\text{C} = M * C_{e_{liq}} * (T_f - T_i) \quad [44]$$

$$\text{Energía necesaria para calentar agua de } 20^\circ\text{C a } 100^\circ\text{C} = 37 \frac{\text{kg}}{\text{Recambio}} 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 80^\circ\text{C} = 12384 \frac{\text{kJ}}{\text{Recambio}}$$

$$\text{Energía necesaria para pasar el agua a vapor} = M * C_{vap} \quad [45]$$

$$\text{Energía necesaria para pasar el agua a vapor} = 37 \frac{\text{kg}}{\text{Recambio}} 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 83620 \frac{\text{kJ}}{\text{Recambio}}$$

$$\text{Energía necesaria para calentar agua de } 100^\circ\text{C a } 180^\circ\text{C} = M * C_{e_{vap}} * (T_f - T_i) \quad [46]$$

$$\text{Energía necesaria para calentar agua de } 100^\circ\text{C a } 180^\circ\text{C} = 37 \frac{\text{kg}}{\text{Recambio}} 2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 80^\circ\text{C} = 5920 \frac{\text{kJ}}{\text{Recambio}}$$

Donde:

M = Cantidad de agua en kg.

$C_{e_{liq}}$ = Calor específico del agua en estado líquido.

C_{vap} = Calor de vaporización del agua.



Ce vap = Calor específico del agua en estado gaseoso.

Tf = Temperatura final.

Ti = Temperatura inicial.

$$\text{Caudal tratado en los 51 días entre cada recambio} = 500 \frac{\text{m}^3 \text{ agua}}{\text{h}} * 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} * 51 \text{ días} \quad [47]$$

$$\text{Caudal tratado en los 51 días entre cada recambio} = 612000 \text{ Nm}^3.$$

$$\text{Energía necesaria para calentar el agua / UF} = \frac{101924 \frac{\text{kJ}}{\text{recambio}}}{612000 \frac{\text{Nm}^3}{\text{recambio}}} \quad [48]$$

$$\text{Energía necesaria para calentar el agua / UF} = 0,16 \frac{\text{kJ}}{\text{UF}}$$

Para el diseño de los tanques donde se produce la regeneración del carbón activo, se ha fijado el mismo volumen que los depósitos ya diseñados, construidos en fibra de vidrio. Sin embargo, éstos se van a construir en acero inoxidable para evitar problemas con la presión y corrosión. Para estimar la cantidad de acero necesario se ha establecido como referencia el acero utilizado para la columna de absorción del water scrubbing (1290 kg), que tiene un volumen de 10 m³, por lo tanto, como se necesita un volumen de al menos 100 m³ y dos unidades, se emplearán:

$$\text{Cantidad de acero necesario} = 1290 \text{ kg} * 10 * 2 \text{ unidades} = 25800 \text{ kg de acero.}$$