

**MÁSTER EN INGENIERÍA
AMBIENTAL**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO
DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS
CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA
DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL**



Universidad de Valladolid

DEISI PAULINA FICA SCHUSTER

JULIO, 2015



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

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

INFORMA:

Que **DEISI PAULINA FICA SCHUSTER** ha realizado bajo su dirección el Trabajo Fin de Máster titulado **EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL**.

RUBÉN IRUSTA MATA

Valladolid, 13 de Julio de 2015



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

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 DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL**, presentado por la alumna **DEISI PAULINA FICA SCHUSTER**, decidió otorgarle la calificación de _____.

El Presidente

El Secretario

Fdo.:

Fdo.:

Vocal

Fdo.:

Valladolid, 13 de Julio de 2015



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

ÍNDICE

1. Introducción.....	6
2. Justificación.....	9
3. Objetivos.....	10
4. Materiales y métodos.....	11
5. Resultados y discusión.....	28
6. Conclusiones.....	42
7. Bibliografía.....	43
8. Anexos.....	47



RESUMEN

El proceso de generación de biogás a partir de los lodos generados en el proceso de depuración de aguas residuales urbanas, objeto de análisis del presente estudio, determina la composición del gas resultante, y en consecuencia, su utilización potencial posterior. Es por esto que los procesos mediante los cuales se genere el mismo, determinará el cumplimiento de los requisitos de pureza.

El presente estudio ha comparado dos procesos de depuración de biogás, el primero corresponde a una tecnología convencional basado en el proceso de adsorción con carbón activo y absorción con agua en un Scrubber. Mientras que el segundo sistema considera una tecnología biológica, basada en la utilización de microalgas, bacterias y un medio acuoso para depurar el biogás. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de estas tecnologías, permite evaluar el impacto ambiental asociado a la aplicación de cada una de ellas y compararlos con el fin de determinar cual presenta menor daño medioambiental.

Para la realización del ACV, se utilizó el programa SimaPro 7, versión 7.2.4 Multi user, el que permite comparar procesos o actividades, analizando las cargas ambientales de los materiales que lo caracterizan, así como también los flujos de energía y materia, en ambos procesos de depuración. Con la información generada, se utilizaron tres métodos de Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EICV), Eco Indicator 99, CML 2000 Baseline y Cumulative Energy Demand.

A través del ACV de estas tecnologías se determinó que la tecnología convencional de depuración de biogás presenta los mayores impactos ambientales negativos, principalmente en lo que se refiere a cambio climático, ecotoxicidad, acidificación y eutrofización, mientras que la tecnología de depuración biológica presenta bajos impactos ambientales al medio biótico o abiótico, como también para la salud humana. Finalmente se estableció que ambos procesos de depuración presentan un balance energético neto favorable, debido a la sustitución de gas natural por biometano.

Palabras Clave: Análisis de Ciclo de Vida; ACV; Depuración de Biogás; Microalgas; Impacto Ambiental.



1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los hidrocarburos son una de las grandes bases energéticas de nuestra sociedad, pero son energías no renovables, es decir una vez que se agoten, no podrán ser repuestas. Por lo tanto, científicos de todo el mundo se han dedicado a investigar la utilización de otros recursos energéticos para seguir moviendo al mundo, por ejemplo la energía solar y la nuclear que son dos grandes áreas de investigación. Pero también hay otras energías, menos conocidas y por lo tanto, menos utilizadas. Estas son conocidas como inagotables, porque existirán siempre que exista nuestro planeta con sus actuales características. Algunas de ellas, además de la energía solar y nuclear son, la energía geotérmica, la eólica y la oceánica y en forma más reciente la utilización de residuos orgánicos a través de un proceso de digestión anaerobia para producir biogás.

La producción de biogás está en continuo crecimiento. De acuerdo a las estimaciones recogidas en diferentes referencias bibliográficas, que tienen en cuenta los residuos urbanos e industriales tratados en la Unión Europea, el potencial de producción de biogás para el 2020 será de aproximadamente $7,56 \times 10^{14}$ kJ. (Llaneza *et al.*, 2010).

El biogás, procedente del proceso de digestión anaerobia de materia orgánica en diferentes condiciones (aguas residuales, vertederos, desechos agrícolas y pecuarios, etc.), es utilizado mundialmente con fines energéticos, debido a la elevada presencia del metano. Una composición tipo de biogás podría ser: (53-70) % CH₄ (g), (30-47)% CO₂ (g), (0-3)% N₂ (g), (0-10.000) ppm_v H₂S (g), (0-1)% O₂ (g), (0-100 ppm_v) trazas de vapor de agua y un poder calorífico entre 18,8 y 23,4 (MJ/m³). (Muñoz *et al.*, 2015).



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

Es importante tener en cuenta que el biogás al que se hará referencia en este documento es el producido por la digestión anaerobia de los lodos generados en el proceso de depuración de aguas residuales urbanas.

El biogás una vez producido, puede ser quemado en calderas tradicionales para producir calor o ser utilizado como combustible para la generación de electricidad o cogeneración de calor y electricidad, incluso en aplicaciones de trigeneración (obtención simultánea de electricidad, calor y frío), utilizando diferentes tecnologías como motores de combustión interna, turbinas de gas y finalmente las innovadoras pilas de combustible o las microturbinas. Otras opciones de aprovechamiento del biogás pueden ser la obtención de productos químicos, combustible en el sector automovilístico o su inyección en la red de gas natural.

Todos los posibles usos dependen de la calidad alcanzada, la cual se deriva del tipo de refinado químico al que se someta el biogás, para eliminar contaminantes tales como nitrógeno, oxígeno, sulfuro de hidrogeno, dióxido de carbono y/o humedad.

No en pocas ocasiones este biogás combustible contiene concentraciones de $H_2S_{(g)}$ que varían entre 0 - 100 ppm dependiendo del residuo original, siendo éste es uno de los contaminantes más problemáticos a la hora de utilizar el biogás del digestor como fuente de energía: es tóxico y corrosivo para la mayor parte de los equipos, además posee olor muy desagradable.

Los niveles máximos permitidos de H_2S en el biogás dependen de cuál sea el uso al que se destine este biogás. Así por ejemplo, el biogás que se utiliza en calderas para la generación de calor sólo requiere la eliminación de H_2S por debajo de 1.000 ppm_v (Muñoz *et al.*, 2015). El uso de biogás en motores de combustión interna de producción combinada de calor y electricidad (CHP) requiere la eliminación de agua, de H_2S , NH_3 , siloxanos y halocarbonos hasta los siguientes valores: 200-1000 ppm_v, 32-50 mg*m⁻³, 5,28 mg*m⁻³ y 65-100 mg*m⁻³, respectivamente (dependiendo del fabricante). Turbinas y microturbinas de cogeneración admiten muy bajos contenidos de siloxanos (0,03-0,1 ppm_v) y agua, pero son capaces de soportar altas concentraciones de H_2S (10000-70000 ppm_v) y halocarbonos (200-1500 ppm_v Cl⁻ / F⁻) (Muñoz *et al.*, 2015).

Sin embargo, los requisitos de calidad más exigentes para el biogás se aplican cuando éste se emplea para obtener biometano para inyección en las redes de gas natural y como biocombustible para vehículos a motor, que a menudo exige concentraciones de $CH_4 > 80-96\%$, $CO_2 < 2-3\%$, $O_2 < 0,2-0,5\%$, $H_2S < 5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $NH_3 < 3-20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ y siloxanos $< 5-10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. (Muñoz *et al.*, 2015)



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

En vista de la importancia del acondicionamiento del biogás, ha cobrado gran relevancia el estudio de las distintas alternativas de depuración de este biocombustible. Las tecnologías de depuración de biogás se conducen en función de dos aspectos fundamentales, maximizar la producción de biogás y cumplir con los requisitos de pureza.

Todas estas tecnologías entregan la ventaja de poder producir biometano cuyo uso puede ayudar a disminuir la dependencia del gas natural, situación que a largo plazo puede producir una ganancia económica importante. También estas tecnologías tienen un efecto positivo sobre el medio ambiente, ya que están generando una fuente de energía renovable, lo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para el desarrollo de este documento se abordarán dos tecnologías de depuración de biogás: a) Una tecnología convencional en una torre de carbón activado mediante el cual se realiza la adsorción del H_2S del biogás y una columna de scrubbing para la absorción de CO_2 . b) Una tecnología biológica de depuración que se basa en la aplicación simbiótica de microalgas y bacterias confinadas en fotobiorreactores donde son capaces de realizar la eliminación simultánea de H_2S y CO_2 en un único proceso (Bahr *et al.*, 2014). De estas tecnologías serán determinados los distintos impactos ambientales presentes, ya sea en su fase inicial de construcción como en su etapa de funcionamiento.



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

2. JUSTIFICACIÓN

El análisis y la comparación de los Ciclos de Vida de estas tecnologías permitirán determinar cuál representa la solución más beneficiosa para el medio ambiente y por lo tanto es un sistema tecnológico razonablemente adecuado a seguir.



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

- Evaluar el impacto ambiental asociado a la aplicación de dos tecnologías (convencional y biológica) de depuración de un biogás procedente de la digestión anaerobia de lodos de una EDAR urbana, para hacerlo apto como biogás de automoción.

3.2 Objetivos Específicos

- Realizar el estudio del Análisis del Ciclo de Vida de la tecnología convencional de depuración de biogás.
- Realizar el estudio del Análisis del Ciclo de Vida de la tecnología biológica de depuración de biogás.
- Determinar y comparar los impactos ambientales más significativos asociados a cada tecnología de depuración de biogás.



4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Descripción de Tecnologías de depuración de biogás consideradas.

Como ya se ha indicado previamente, en este trabajo se han sometido a evaluación ambiental dos tecnologías de depuración de biogás, una convencional basada en procesos físico-químicos y otra emergente basada en procesos biológicos.

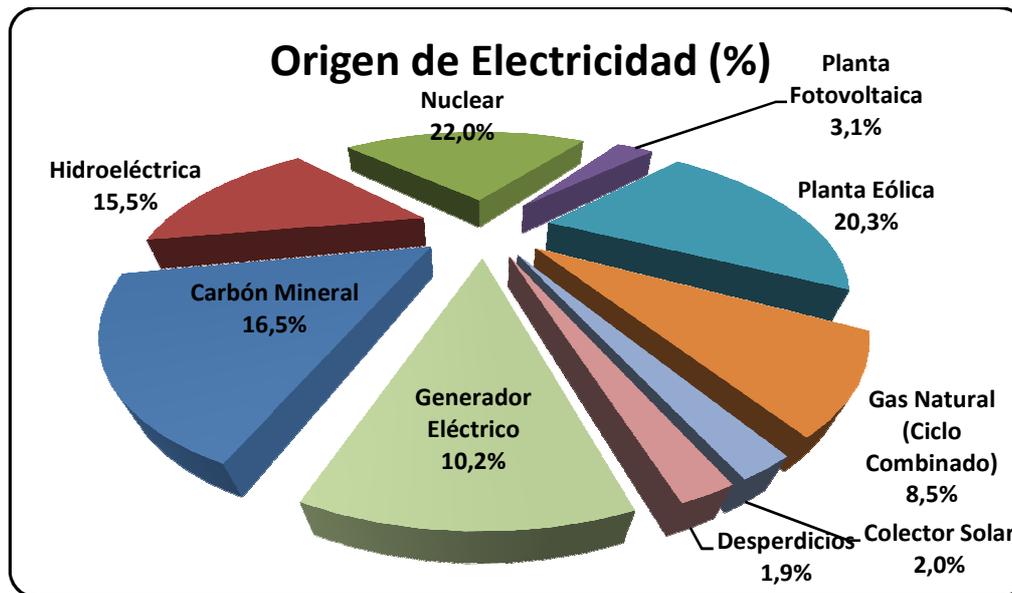
Para ambos procesos de depuración se ha considerado el mismo tipo de biogás a tratar y un biogás tratado que cumpla con los requerimientos mínimos de calidad exigidos para su uso como combustible de automoción. En la tabla 1 se recogen las características del biogás tratado y sin tratar.

El diseño y dimensionamiento de las plantas de tratamiento de biogás, se ha realizado para una capacidad de tratamiento de 504 m³/h de biogás.

Tabla 1. Composición química del biogás tratado y sin tratar.

Biogás	CO ₂ (% vol.)	H ₂ S (% vol.)	O ₂ (% vol.)	N ₂ (% vol.)	CH ₄ (% vol.)	NH ₄ (mg/L)	Benceno (mg/m ³)	Tolueno (mg/m 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

Se ha estimado además un Mix Energético del “Sistema Eléctrico Peninsular” que está dividido, según lo indica la figura 1, en 9 tecnologías productoras de energía eléctrica en España. Este balance eléctrico indica las principales generaciones de electricidad consideradas para este trabajo y es igual para ambas plantas.



Fuentes: Observatorio de la Electricidad, WWF España 2014 y Red Eléctrica España 2014.

Figura 1. Origen de la electricidad por tecnologías.

A continuación se describen detalladamente las dos tecnologías que han sido objeto de evaluación ambiental en el presente trabajo fin de máster.

4.1.1 Tecnología Convencional de Depuración de Biogás.

En la figura 2 se muestra el diagrama de flujo del proceso de depuración convencional de biogás que se ha considerado en el presente trabajo fin de máster. El proceso consta de una etapa de adsorción de H_2S sobre carbón activo **(1)** que se lleva a cabo en 2 unidades (torres de adsorción), seguido de una columna de lavado **(2)** para absorber el CO_2 del biogás. Seguidamente el agua de lavado se descomprime en una torre de flash **(3)** para recuperar los componentes volátiles del biogás y finalmente el agua enriquecida con CO_2 pasa por una torre de desorción **(4)** para recuperar el CO_2 absorbido y recircular el agua a la torre de absorción. El dimensionamiento de cada una de las diferentes operaciones unitarias del proceso previamente descrito se ha realizado en base a los criterios recogidos en el trabajo de (Muñoz *et al.*, 2015).

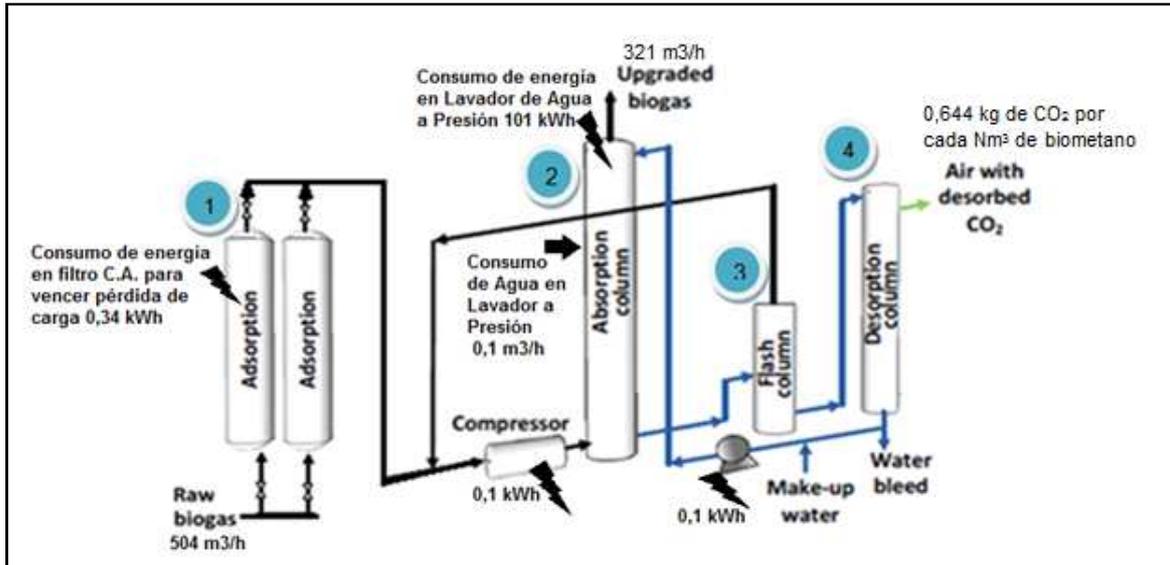


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de tratamiento convencional de biogás.

Los tanques de carbón activo están fabricados con fibra de vidrio y mientras uno funciona el otro permanece cargado de carbón activado pero sin funcionamiento, para que al momento en que el que se encuentra operativo deba vaciarse para realizar el recambio de carbón activado, inmediatamente se inicie el trabajo del segundo tanque y así se permita el funcionamiento en continuo del sistema de depuración de biogás en la planta. En la tabla 2 se resumen las principales variables de diseño que se consideraron para la torre de adsorción.

Tabla 2. Variables de diseño de las torres de adsorción de carbón activo

Volumen de cada tanque (m ³)	201,6
Tiempo de Residencia del gas en el tanque (min)	12
Altura de cada tanque (m)	2
Diámetro de cada tanque (m)	11,3
Superficie de cada tanque (m ²)	271,6
Peso de la fibra de vidrio (g/m ²)	600
Altura del Lecho de Carbón Activo (m)	1
Masa de carbón activo (kg)	45360
Vida Útil del carbón activo (días)	51



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

En la tabla 3 se resumen las principales variables de diseño correspondientes a la columna de lavado con agua o scrubber.

Tabla 3. Variables de diseño de la columna de absorción con agua

Volumen de la Columna de Absorción (m ³)	10,08
Altura de la Columna de Absorción (m)	2
Diámetro de la Columna de Absorción (m)	2,52
Superficie (m ²)	25,8
Tiempo de Residencia (min)	1,2
Consumo de Agua en el lavador (m ³ /h)	0,1
Peso del acero (kg/m ²)	50

De la columna de lavado se obtienen 7705 m³/d de biogás tratado o biometano, con un equivalente energético de 9 kWh/Nm³.

El tanque de lavado contiene 870000 unidades de relleno plástico, tipo anillos Pall, de polietileno de alta densidad de 2 g de peso cada unidad, similares a los que se muestran en la figura 3. El relleno aumenta la superficie de contacto y así incrementa la eficacia de separación del CO₂ del biogás.



Figura 3. Anillos Pall del relleno de la columna de absorción.



La columna flash de descompresión del agua de lavado está fabricada en acero inoxidable, siendo los valores de sus principales variables de diseño los que se recogen en la tabla 4.

Tabla 4. Variables de diseño de la torre flash de descompresión.

Volumen de la Torre de descompresión (m ³)	5,04
Altura de la Torre de descompresión (m)	1
Diámetro de la Torre de Descompresión (m)	2,52
Superficie (m ²)	18
Peso del acero (kg/m ²)	50

Finalmente, la columna de desorción también está fabricada en acero inoxidable, con los valores de las principales variables de diseño que se registran en la tabla 5.

Tabla 5. Variables de diseño de la columna de desorción.

Volumen (m ³)	5,04
Altura (m)	1
Diámetro (m)	2,52
Superficie (m ²)	18
Peso del acero (kg/m ²)	50

Se ha considerado que el CO₂ desorbido se emite a la atmosfera. Este CO₂ se corresponde con la eficacia de eliminación de CO₂ que presenta el sistema; en este caso, un 97% en volumen, como se desprende de los valores de la tabla 1. En una base másica, se eliminan por tanto 0,644 kg de CO₂ por cada Nm³ de biogás que se trata, siendo el contenido másico de CO₂ en el biogás sin tratar de 0,668 kg/Nm³.

4.1.2 Tecnología Biológica de Depuración de Biogás en Base a Microalgas.

En la figura 4 se muestra el diagrama de flujo del proceso de depuración biológica de biogás, basado en la simbiosis entre microalgas y bacterias.

El tanque almacena el biogás **(1)** sin depurar y desde ahí es bombeado a la primera etapa del proceso que es la de absorción de H₂S y CO₂, que se produce simultáneamente en 42 columnas **(2)** donde bacterias y un medio líquido (agua)



lleno de burbujas de aire, sirven para realizar el proceso de eliminación del H_2S y CO_2 del biogás. El agua con CO_2 proveniente de las columnas pasa a los 42 “High Rate Algal Pond” HRAP (3), tanques donde se encuentran las microalgas que por el proceso de fotosíntesis consumen el CO_2 y desprenden O_2 . El agua libre de CO_2 proveniente de los tanques de microalgas, antes de pasar nuevamente a las columnas de absorción, ingresa en partes iguales a dos sedimentadores (4) que permiten eliminar la mayor cantidad de microalgas del agua. Desde los sedimentadores se recircula biomasa hasta el HRAP con el fin de no perder masa algal en el sistema. La biomasa purgada pasa por una bomba centrífuga para eliminar la mayor cantidad de agua posible y es depositada en 8 tanques de sólidos (5).

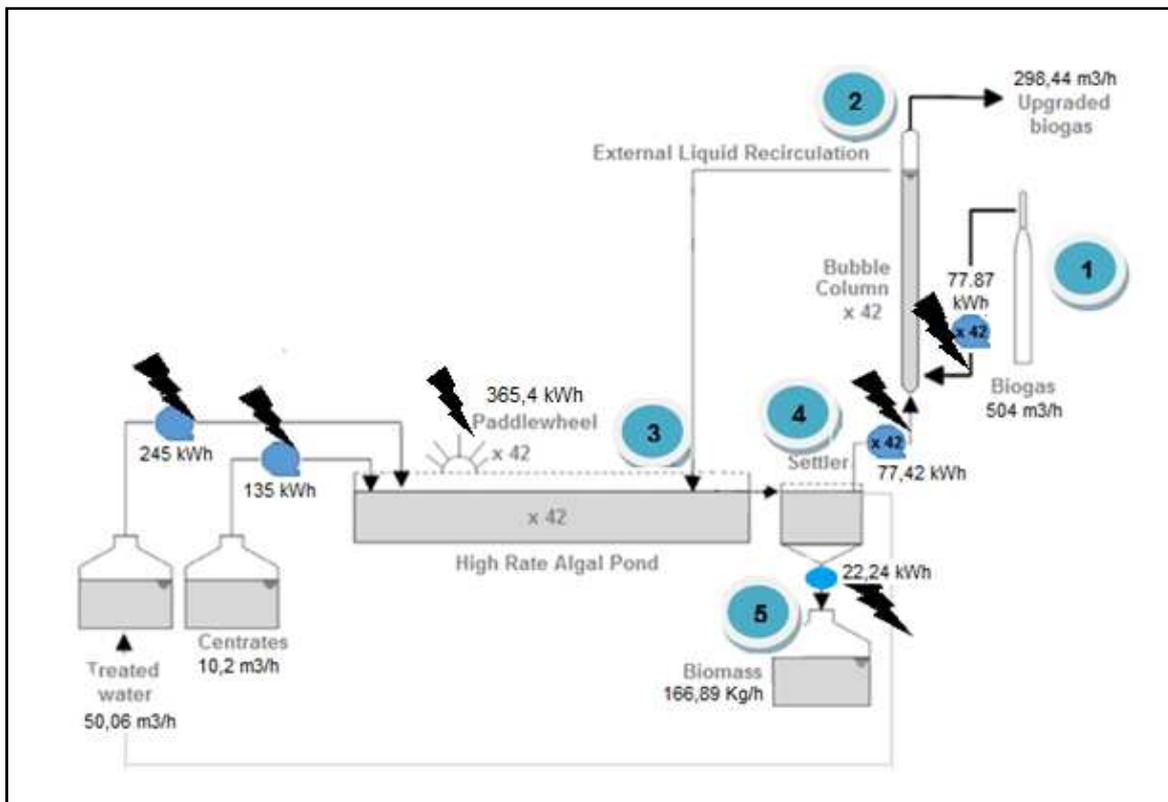


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de tratamiento biológico de depuración de biogás con microalgas.

El tanque de biogás (1) es un depósito esférico de acero inoxidable y en la tabla 6 se resumen las principales variables de diseño que se consideraron para su dimensionamiento.



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

Tabla 6. Variables de diseño del tanque de biogás.

Volumen de Tanque de Biogás (m ³)	1.000
Diámetro del Tanque de Biogás (m)	12,4
Superficie del Tanque de Biogás (m ²)	483
Peso del acero por m ² (kg)	50

La columna de absorción (2) del sistema biológico contiene agua con microburbujas y bacterias que depuran el biogás, eliminando el CO₂ y el H₂S simultáneamente en este proceso. Los parámetros de diseño de las 42 columnas con las que funcionará este sistema se detallan en la tabla 7.

Tabla 7. Variables de diseño de la columna de absorción.

Volumen de cada Columna de Absorción (m ³)	14
Altura de cada Columna de Absorción (m)	1,7
Diámetro de cada Columna de Absorción (m)	3,24
Superficie de cada Columna de Absorción (m ²)	34
Peso del PVC por m ² (kg.)	15

Por la columna de absorción se obtiene el biogás ya depurado. Se estima que la salida de biometano será de 7162 m³/d con un equivalente energético de 9 kWh/Nm³.

Cada columna lleva incorporados cuatro difusores para permitir el burbujeo. Estos difusores son de acero y su peso es de un kilo por unidad. Deben cambiarse cada 3 meses, por lo tanto es necesario contar para cada recambio con 168 unidades. El destino final de estos difusores será el reciclaje. Además se deben considerar 42 bombas para permitir la alimentación de biogás a las Columnas.

Se consideran también 42 válvulas de acero de 4,7 kg cada una, para controlar el paso desde el depósito de biogás hasta las columnas de absorción y 2 km de tuberías de polipropileno cuyo peso es de 1 kg/m.

Los 42 estanques de algas (3) están contruidos con PVC de alta resistencia y se consideraron los parámetros de dimensionamiento que se detallan en la tabla 8, además de un motor con propelas en cada uno con el fin de facilitar el movimiento del agua de los tanques y así evitar la falta de oxígeno.



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

Tabla 8. Variables de diseño de los High Rate Algal Pond

Volumen de cada HRAP (m ³)	3.202,5
Altura de cada HRAP (m)	0,5
Largo de cada HRAP (m)	175
Ancho de cada HRAP (m)	36,6
Superficie de cada HRAP (m ²)	6616,6
Peso del PVC por m ² (kg.)	15

En total a los 42 High Rate Algal Ponds ingresan 245 m³/d de centrates o aguas residuales domésticas y 1201 m³/d de agua tratada, que recircula para compensar el agua evaporada de estos depósitos abiertos.

El centrates es el líquido que se emplea como alimentación de las microalgas. Con la incorporación del centrates al sistema de depuración biológico estamos evitando el vertido de este líquido a cauce, por lo que el ingreso de los datos de la composición del centrates se ingresa como valores negativos en emisiones al agua. Las características de este líquido se indican en la tabla 9.

Tabla 9: Composición de los centrates.

CENTRATES	
TN g/L	PO ₄ g-P/L
1,5	0,101

Al igual que en el caso del centrates la incorporación del Agua Tratada al sistema evita que ésta sea vertida a cauce. La composición básica del agua tratada se indica en la tabla 10.

Tabla 10: Composición Agua Tratada

AGUA TRATADA	
TN g/L	PO ₄ g-P/L
0,03	0,00202

Para el paso de los líquidos se consideran 3896 m de tuberías de hierro galvanizado, cuyo peso es de 3 kg/m.



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

El dimensionamiento de los dos sedimentadores (4) se realizó en base a los datos de la tabla 11 y el material de fabricación será de PVC de alta resistencia.

Tabla 11. Variables de diseño de los sedimentadores.

Volumen de cada Sedimentador (m ³)	471,23
Altura del Sedimentador (m)	1,5
Diámetro del Sedimentador (m)	20
Superficie (m ²)	471,23
Peso del PVC por m ² (kg)	15

En el tanque de sólidos (5) se acumulan los lodos que provienen del sedimentador. Se consideran 8 tanques y se dimensionaron según se detalla en la tabla 12.

Tabla 12. Variables de diseño de los Tanques de Sólidos.

Volumen de cada Tanque de Sólidos (m ³)	630
Altura de cada Tanque de Sólidos (m)	3
Largo de cada Tanque de Sólidos (m)	14
Ancho de cada Tanque de Sólidos (m)	15
Superficie (m ²)	594
Peso del PVC (kg/m ²)	15

Los lodos pasan desde el sedimentador hacia el tanque de sólidos por medio de una bomba centrífuga, que extrae el exceso de agua y permite así poder valorizarlos como enmienda agrícola. La tabla 13 contiene la producción y composición de la biomasa, en base seca, que es recogida en los tanques.

Tabla 13: Producción y composición de la Biomasa (Base Seca).

Biomasa	4005 kg/d
Carbono, C (% wt.)	49
Nitrógeno, N (% wt.)	9
Fosforo, P (% wt)	1



4.2 Metodología de Ingreso de Datos de Construcción y Funcionamiento de Sistemas de Depuración de Biogás a SimaPro.

Las tecnologías de depuración de biogás anteriormente descritas serán ambientalmente evaluadas mediante un Análisis del Ciclo de Vida (ACV), proceso objetivo que permite computar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando tanto el uso de materia y energía como las emisiones al entorno, para determinar el impacto de ese uso de recursos y esas emisiones; para en última instancia, evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental.

El ACV incluye el ciclo completo de estos procesos tecnológicos de depuración de biogás, teniendo en cuenta las etapas de extracción y procesado de materias primas, producción, transporte y distribución, uso, reutilización y mantenimiento, reciclado y disposición final, tal como se ilustra en la figura 5.

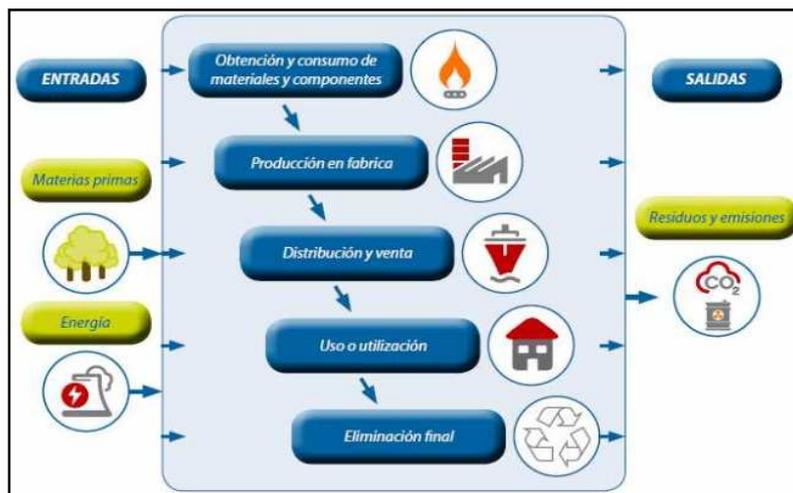


Figura 5: Representación esquematizada del Ciclo de Vida.

Para el Análisis del Ciclo de Vida se utilizó el software SimaPro 7, versión 7.2.4 Multi user, al cual se ingresaron los datos obtenidos en el apartado anterior donde se estimaron los valores de diseños y operación típicos de este tipo de sistemas, según información obtenida en la bibliografía reseñada.

Dentro de la metodología utilizada para el estudio de ACV se definió como “Unidad Funcional”; 1 m³ de biogás tratado, 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). El propósito principal es proporcionar una



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

referencia para todas las entradas y salidas, necesaria para asegurar la comparabilidad de los resultados.

Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios deberán incluirse dentro del ACV. 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 considera la etapa de desmantelamiento.

A continuación se detallan los pasos seguidos en el programa SimaPro que permitieron crear las entradas de los distintos materiales, procesos de transformaciones, fases de montaje y ciclos de vida de los sistemas de depuración de biogás considerados.

El primer paso necesario es crear en el comando "Procesos" las plantas de depuración de biogás (convencional y de microalgas), para esto se crean en apartado "Materiales" todos aquellos elementos con los cuales funcionan estos sistemas, que se encuentran resumidos en las tablas 14 y 15.

Tabla 14: Materiales incluidos en SimaPro para la Construcción de la Planta de Depuración con Tecnología Convencional.

Unidad	Material de Fabricación	Cantidad Total
Tanque de Carbón Activado (2 piezas)	Fibra de Vidrio (Glass Fibre) Ecoinvent	978 kg
Columna de Lavador (Scrubber) (1 Pieza)	Acero (Stainless Steels) Ecoinvent	1,29 ton
Tanque Descompresor (1 Pieza)	Acero (Stainless Steels) Ecoinvent	900 kg
Tanque de Desorción (1 Pieza)	Acero (Stainless Steels) Ecoinvent	900 kg
Carbón Activado (1 pack)	*Anexo	45360 kg
Bomba de Recirculación de Agua (1 Pieza)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	-----



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

Compresor de Aire (1 Pieza)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	-----
Anillos Pall (1 pack de 870.000 unidades)	Polietileno de Alta Densidad (Polyethylene HDPE) Ecoinvent	1740 kg
Transformación de prados y pastizales	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	1000 m ²
Transformación en área industrial construida (50%)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	500 m ²
Transformación en área industrial verde (50%)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	500 m ²
Ocupación de Terreno para Construcción de la Planta de Depuración de Biogás (1 año)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	1000*1 m ² a
Ocupación de área industrial construida (50%) (20 años)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	500*20 m ² a
Ocupación de área industrial verde (50%) (20 años)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	500*20 m ² a

*En Anexo se encuentra el Diagrama de Flujo que corresponde a la fabricación de Carbón Activado.

Tabla 15: Materiales incluidos en SimaPro para la Construcción de la Planta de Depuración de Biogás con Tecnología Biológica (Microalgas/Bacterias).

Unidad	Material de Fabricación	Cantidad Total
Tanque de Almacenamiento de Biogás (1 unidad)	Acero (Stainless Steels) Ecoinvent	24,15 ton
Columna de Absorción (42 unidades)	PVC de Alto Impacto (PVC High Impact ETH) Ecoinvent	21,42 ton
High Rate Algal Pond (HRAP) (42 unidades)	PVC de Alto Impacto (PVC High Impact ETH) Ecoinvent	4168 ton



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

Sedimentador (2 unidades)	PVC de Alto Impacto (PVC High Impact ETH) Ecoinvent	12,25 ton
Tanque de Almacenamiento de Biomasa (8 unidades)	PVC de Alto Impacto (PVC High Impact ETH) Ecoinvent	71 ton
Tuberías Paso de Gases	PVC Ecoinvent	2000 m
Tuberías Paso de Líquidos	Hierro Galvanizado (Ferro: Irons) Ecoinvent	3896 m
Válvulas (42 unidades)	Acero (Stainless Steels) Ecoinvent	197,4 kg
Difusor para Columna de Absorción (168 unidades)	Acero (Stainless Steels) Ecoinvent	168 kg
Bombas de Alimentación de Biogás (42 unidades)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	-----
Bomba Alimentación Concentratos (1 unidades)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	-----
Motores con Propelas (42 unidades)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	-----
Bombas Alimentación Agua Tratada (42 unidades)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	-----
Bomba Recirculación hacia la Columna Adsorción (1 unidad)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	-----
Bomba Centrífuga (1 unidad)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	-----
Transformación de prados y pastizales	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	788100 m ²
Transformación en área industrial construida (50%)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	394050 m ²
Transformación en área industrial verde (50%)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	394050 m ²
Ocupación de Terreno para Construcción de la Planta de Depuración de Biogás (1 año)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	788100*1 m ² a
Ocupación de área industrial construida (50%) (20 años)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	394050*20 m ² a



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

Ocupación de área industrial verde (50%) (20 años)	Base de Datos Ecoinvent de SimaPro	394050*20 m ² a
--	------------------------------------	----------------------------

Luego de ingresados todos los materiales necesarios para la construcción de ambas plantas, es necesario crear en el ítem “transformaciones” de procesos, los distintos flujos de ambos sistemas, es decir, ingresar las entradas y salidas de materias y energías que permiten el funcionamiento de las plantas depuradoras de biogás (Biológica y Convencional).

Las entradas o salidas que se agregan como cargas evitadas son todos aquellos productos que al utilizar o que al producir con el proceso, permiten evitar un impacto ambiental ya sea porque se evita un vertido a cauce, como es el caso de los centrates y el agua tratada, o por la producción del biometano o la biomasa con los que se evita la producción de gas natural y fosfato diamónico respectivamente.

Se detallan a continuación, en las tablas 16 y 17, los valores de todos los flujos másicos y energéticos ingresados a SimaPro.

Tabla 16: Productos ingresados y obtenidos del sistema con sus respectivas cantidades y consumos eléctricos ingresados al Sistema de Depuración de Biogás con Tecnología Convencional.

Entradas	Cantidad
Consumo de energía en filtro de carbón activado para vencer la pérdida de carga (kWh)	0,34
Consumo de energía en lavador de agua a presión, tipo Scrubber (kWh)	0,1
Consumo de agua en lavador a presión, tipo Scrubber (m ³ /h)	0,1
Consumo de energía del compresor de aire (kWh)	0,1
Consumo energético de la bomba de recirculación hacia el lavador de agua presión (kWh)	0,1
Salidas	Cantidad
Carga evitada de gas natural (kWh)	2889,4
CO ² por cada Nm ³ de biometano producido (kg)	0,644



Tabla 17: Productos ingresados y obtenidos del sistema con sus respectivas cantidades y consumos eléctricos ingresados al Sistema de Depuración de Biogás con Tecnología Biológica (Microalgas)

Entradas	Cantidad
Centrates 10,2 m ³ /h (como carga evitada al agua)	
Nitrógeno Total (kg/m ³)	-15,3
PO ₄ (kg/m ³)	-1,03
Agua Tratada 50,06 m ³ /h (como carga evitada al agua)	
Nitrógeno Total (kg/m ³)	-1,5
PO ₄ (kg/m ³)	-0,1
Consumo de energía de bomba para centrates (kWh)	135
Consumo de energía de bomba para agua tratada (kWh)	245
Consumo de energía de los 42 motores con propelas (kWh)	365,4
Consumo de energía de bomba centrifuga (kWh)	22,24
Consumo de energía de las 42 bombas de recirculación hacia la columna de absorción (kWh)	77,42
Consumo de energía de las 42 bombas de alimentación de biogás (kWh)	
Salidas	
Carga evitada de gas natural (kWh)	2685,9
Carga evitada de fosfato diamónico Kg N _{biomasa} /d	360

Con todos los datos que se han expuesto en las tablas 16 y 17, podemos crear el ciclo de vida de ambas plantas de depuración de biogás. Es necesario agregar al ciclo de vida de cada planta un ciclo de vida adicional

En el caso del funcionamiento de la planta de depuración de biogás basada en la tecnología convencional, es necesario crear un ciclo de vida adicional para el carbón activado, el que tiene una vida útil de 51 días, por lo que debe reponerse 143 veces en una cantidad de 45360 kg durante los 20 años de vida de la planta, que es la cantidad de carbón activado que cada tanque de adsorción debe contener. El escenario de residuos que se ha considerado para la gestión final del carbón activado será la incineración.

En el caso del funcionamiento de la planta de depuración de biogás basada en la tecnología biológica (microalgas), se considera el ciclo de vida adicional de los difusores, los que debido a su corta vida útil deberán cambiarse cada 3 meses, lo



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

que significa que 80 veces en un período de 20 años deberán reemplazarse los 168 difusores con los que funcionan las 42 columnas de absorción. El escenario de residuos de los difusores será el reciclaje.

Una vez que han sido ingresadas a SimaPro todas las entradas correspondientes al ítem de materiales, transformaciones, fases del producto y ciclos de vida, es posible realizar el análisis de impacto correspondiente a cada planta de depuración de biogás y la comparativa de éstas.

Los métodos de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV) empleados para obtener los resultados fueron:

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

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

HH Salud Humana (unidad: DALY= Disability adjusted life years = años de vida ajustados por discapacidad, lo que significa diferente discapacidad causada por las enfermedades que son ponderadas)

EQ Calidad del Ecosistema (unidad: PDF * m²yr; PDF = Fracción Potencialmente Desaparecida de especies de plantas)

R Recursos (unidad: MJ Energía Extra. Requisito adicional de energía para compensar la baja ley del mineral)

Método: **CML 2 línea de base 2000**

Las categorías de impacto que se presentan en este método de referencia CML son:

- Agotamiento de la capa de Ozono (PAO)
- Toxicidad - humanos
- Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce
- Ecotoxicidad Acuática de Agua Marina
- Ecotoxicidad Terrestre
- Oxidación Fotoquímica



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

- Calentamiento Global (GWP100)
- Acidificación
- Agotamiento Abiótico
- Eutrofización

Método: **Cumulative Energy Demand**

Método para calcular la Demanda de Energía Acumulada (CED), en el que se consideran las siguientes Categorías de impacto:

- Energías Fósiles, No Renovables
- Energía Nuclear, No renovables
- Biomasa, Renovable
- Solar, Geotérmica, Eólica, Renovable
- Hidráulica, Renovable



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

Para el análisis de resultados, como ya se mencionó se utilizarán tres métodos de evaluación **CML 2 baseline 2000, Cumulative Energy Demand y Eco-indicador 99 (H)**, todos elegidos debido a las categorías de impacto que considera para evaluar los diferentes procesos. De esta manera es posible observar el impacto ambiental producido por el consumo de energía que se produce en los distintos procesos de funcionamiento de la planta. También obtenemos los impactos ambientales producidos por el uso del suelo o el impacto en la salud humana por la emisión de CO₂, entre otras.

5.1 Evaluación de Impacto del Ciclo de vida de la tecnología convencional de depuración de biogás.

La figura 6 muestra el análisis del ciclo de vida de la planta de depuración de biogás basado en el sistema convencional. Se observa que el ciclo de vida adicional del carbón activado presenta los mayores impactos ambientales dentro del sistema, principalmente en las categorías Acidificación, Eutrofización, Agotamiento de la Capa de Ozono, Toxicidad Humana, Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce, Ecotoxicidad Acuática de Agua Marina, Ecotoxicidad Terrestre y Oxidación Fotoquímica. El mayor impacto del ciclo de vida adicional del carbón activado por sobre el resto de los subsistemas que forman parte de la planta, es debido a que el carbón activado es un producto que debe desecharse en reiteradas ocasiones a lo largo de todo el periodo de funcionamiento que se ha estimado para la planta. Como hemos mencionado, el carbón activado se gestionará como residuo peligroso y su escenario de disposición final será la incineración.

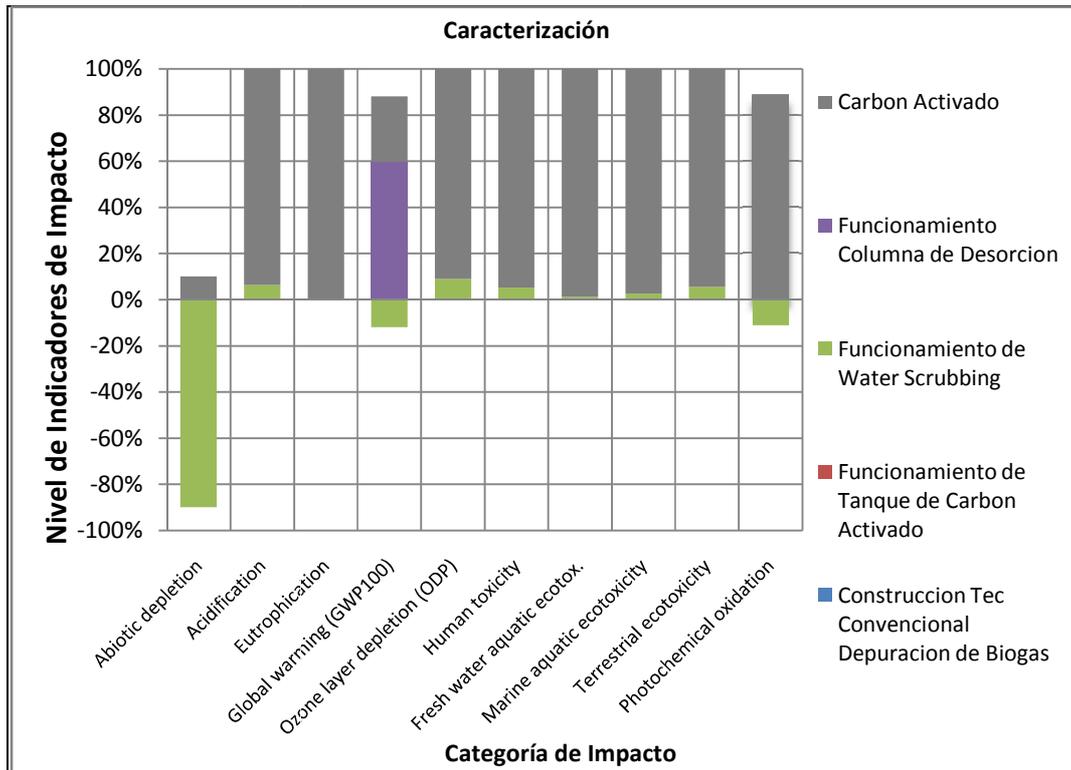


Figura 6. Evaluación del Impacto Ambiental del Ciclo de Vida de la Tecnología Convencional de Depuración de Biogás (Método: CML 2 baseline 2000 V2.04)

El funcionamiento de la columna de desorción presenta un marcado impacto negativo en la categoría de Calentamiento Global, ya que es en este proceso donde el CO₂ separado del biogás es eliminado como carga a la atmosfera.

También se puede observar que el funcionamiento del Scrubber presenta un impacto positivo en la categoría Agotamiento del Medio Abiótico, Calentamiento Global y Oxidación Fotoquímica, esto se debe claramente a que en este proceso hemos considerado como carga evitada la producción de gas natural.

Las fases de funcionamiento del tanque de carbón activado y la fase de construcción de la planta no presentan impactos ambientales considerables, por lo que es posible considerarlas despreciables para este método de análisis.

Se puede realizar un estudio más exhaustivo del balance energético asociado al ciclo de vida de los procesos de depuración del biogás utilizando el método de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida de la Demanda Acumulada de Energía.



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

En la figura 7 se muestra cómo se distribuye la Demanda de Energía Acumulada del proceso convencional de depuración de biogás para las cinco categorías que considera este método: Energías Fósiles (No Renovables), Energía Nuclear (No renovables), Biomasa (Renovable), Solar, Geotérmica, Eólica (Renovable), Hidráulica (Renovable). Se observa claramente que la utilización de carbón activado tiene un alto impacto ambiental energético, ya que debido a las grandes cantidades de carbón activado requeridos durante todo el período de funcionamiento de la planta, es necesario utilizar grandes cantidades de materias primas para fabricarlo. Más específicamente, son la producción de Acido Fosfórico y los requerimientos energéticos de la disposición final de las sustancias residuales que se generan en la producción de este ácido fosfórico los principales responsables de la Demanda Acumulada de Energía del carbón activo.

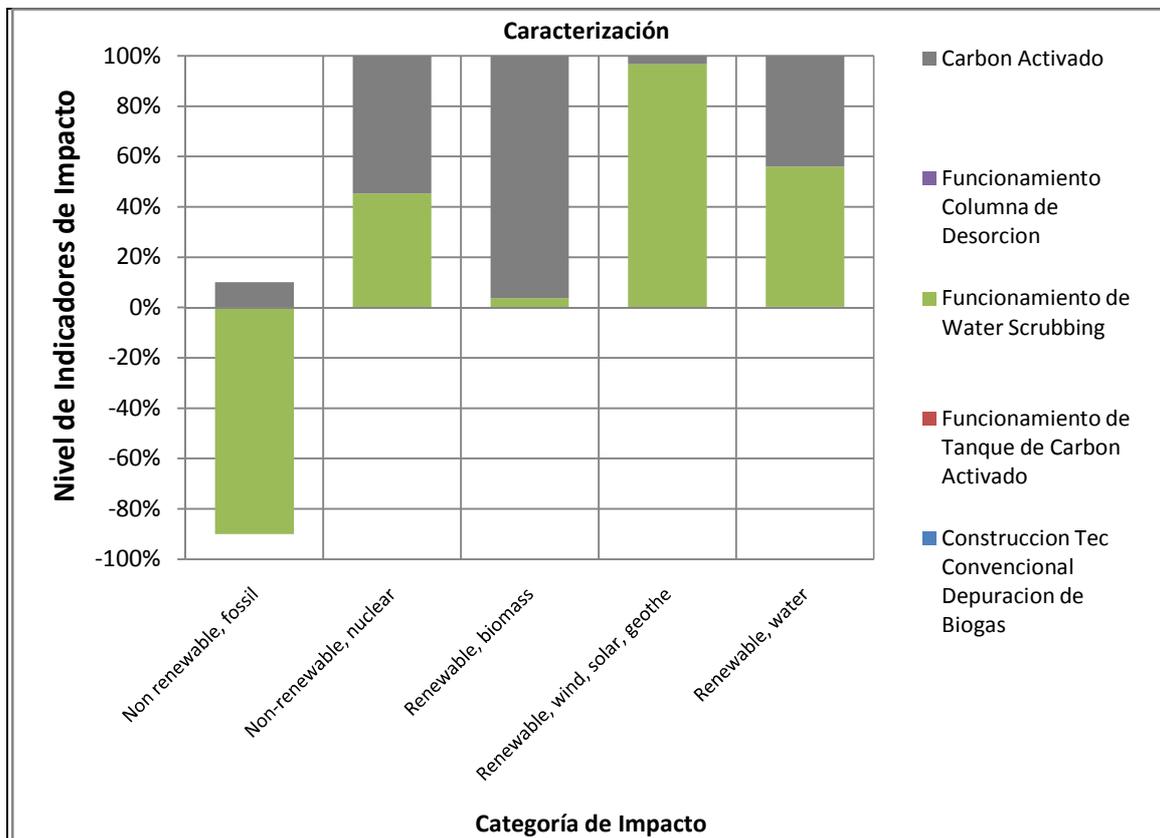


Figura 7. Evaluación del Impacto Ambiental del Ciclo de Vida de la Tecnología Convencional de Depuración de Biogás (Método: Cumulative Energy Demand V1.05)

El uso del Scrubber tiene un marcado impacto ambiental negativo en 3 de las 5 categorías: Energía Nuclear (No renovables), Solar, Geotérmica, Eólica (Renovable) e Hidráulica (Renovable). Esto es debido a que durante el



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

funcionamiento del lavador se produce el consumo de estos tres tipos de energía (que componen el mix energético español) necesarias para realizar el lavado con agua a presión, para operar la bomba de recirculación de agua al lavador y para el compresor de aire. Pero en el caso de la categoría Energías Fósiles (No Renovables), el uso del Lavador presenta un impacto neto positivo, que es debido a la carga evitada de gas natural por producción de biometano.

La demanda de energía acumulada debida a la construcción de la planta de depuración de biogás al funcionamiento de la torre de adsorción de carbón activado y al funcionamiento de la columna de desorción, presentan un impacto ambiental despreciable frente a los ya descritos.

Cuando se aplica un método de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida basado en un modelo de daños como es el caso del Ecoindicador'99 se observan resultados similares al método CML para las categorías impacto comunes.

Según el método del Eco-Indicador 99, tal como lo muestra la figura 8, es el carbón activado el que presenta mayor impacto ambiental en 9 de las 11 categorías de impacto evaluadas.

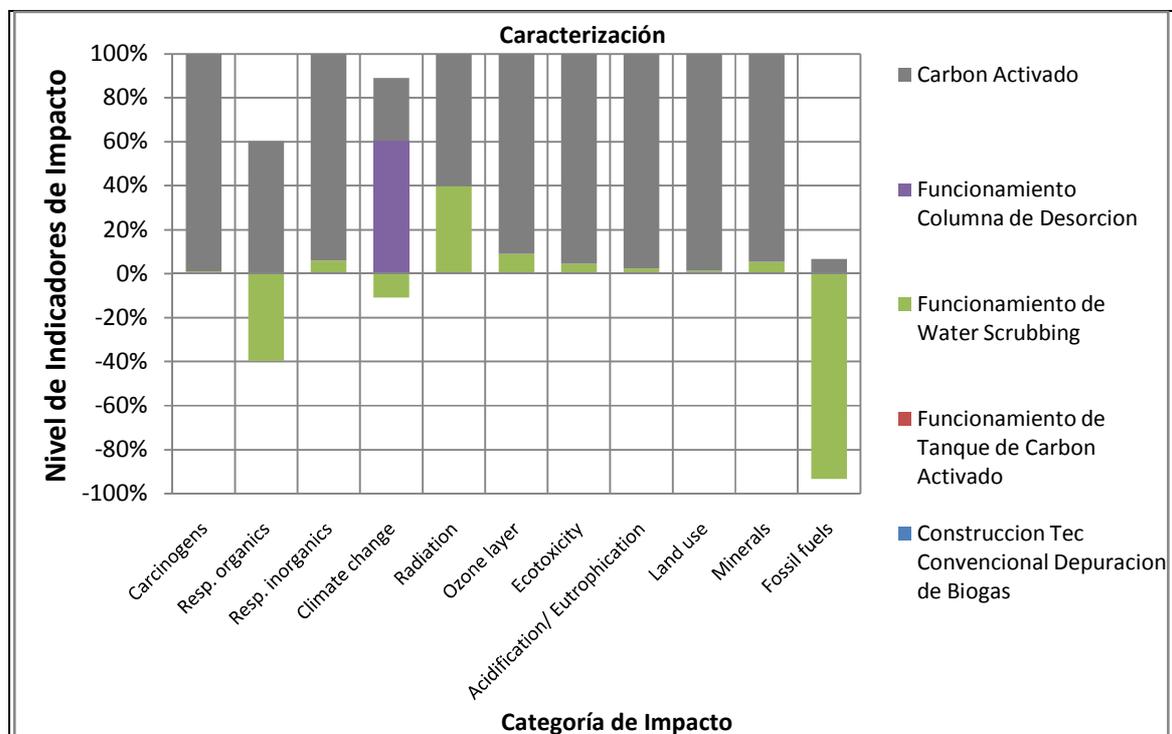


Figura 8. Evaluación del Impacto Ambiental del Ciclo de Vida de la Tecnología Convencional de Depuración de Biogás (Método:Eco-indicador 99 (H) V2.06 / Europe EI 99 H/A)



Las cargas evitadas corresponden a la etapa de funcionamiento del scrubber y se deben a que con la generación de biometano consideramos evitar la producción de gas natural. Por esto la categoría de impacto de combustibles fósiles es la que presenta un mayor impacto positivo, lo que refleja claramente que se evita el consumo de este tipo de combustibles.

Nuevamente el funcionamiento de la columna de desorción también presenta un gran impacto ambiental negativo, ya que es en este proceso donde se emite a la atmosfera el CO₂ que es separado el biogás y luego separado del agua. La categoría de impacto donde más afecta este proceso es en la de cambio climático, debido a que el CO₂ es considerado un gas de efecto invernadero. La construcción de la planta de depuración y el funcionamiento de la torre de adsorción de carbón activado tienen bajos impactos en las diferentes categorías, por lo que se consideran despreciables en el análisis.

5.2 Evaluación de Impacto del Ciclo de vida de la tecnología emergente de depuración de biogás.

Según el método CML 2 baseline 2000, el análisis del impacto ambiental causado por la construcción de la planta de depuración de biogás y su funcionamiento se puede ver en el figura 9.

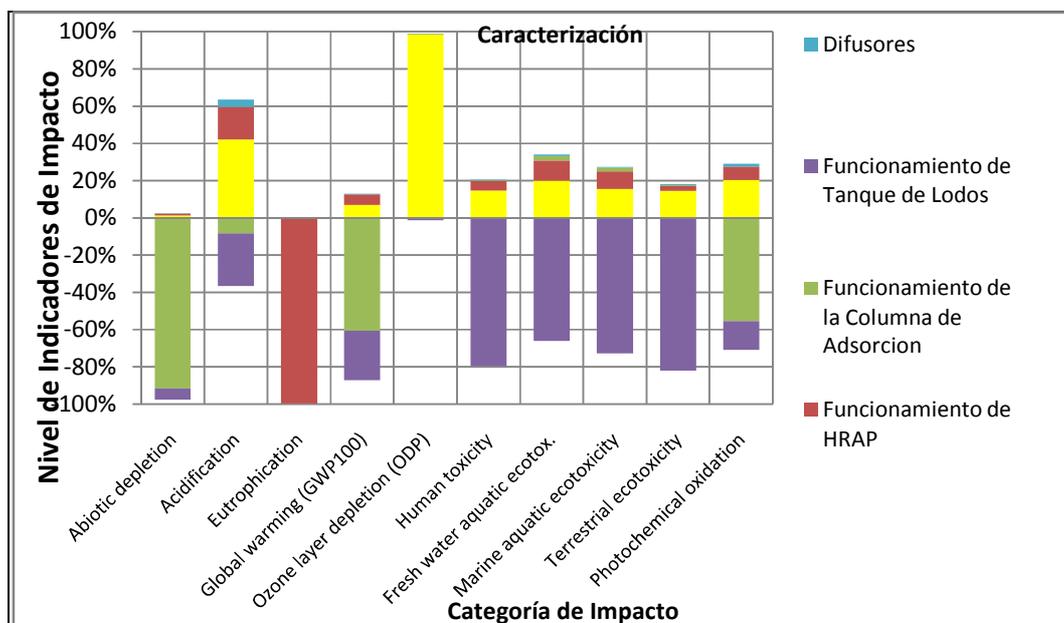


Figura 9. Evaluación del Impacto Ambiental del Ciclo de Vida de la Tecnología Biológica (Microalgas/Bacterias) de Depuración de Biogás (Método: CML 2 baseline 2000 V2.04 / world, 1990)



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

Existen tres impactos ambientales positivos asociados al funcionamiento de esta planta. Uno de ellos está asociado al funcionamiento del Tanque de Sólidos, esto porque la biomasa decantada en el sedimentador pasa al Tanque de Sólidos como un lodo que se valorará como enmienda agrícola, evitando la fabricación de Fosfato Diamónico. Es por esto que en categorías de impacto como acidificación, calentamiento global, toxicidad humana, Ecotoxicidad acuática en agua dulce, Ecotoxicidad acuática en agua marina, Ecotoxicidad terrestre y oxidación fotoquímica, se produce un efecto positivo por evitar la producción de esta carga de fertilizante sintético.

Además de esta carga evitada, tenemos la que está asociada al funcionamiento de la columna de absorción, ya que es en este proceso donde se ha considerado que se evitará la producción de gas natural gracias a la producción de biometano en la planta. En las categorías de impacto donde se observa mayor impacto positivo son; Debilitamiento Abiótico, Calentamiento Global y Oxidación Fotoquímica.

El tercer impacto positivo producido por la planta, es en la categoría de impacto de eutrofización y está asociado al funcionamiento del High Rate Algal Pond. Esto se debe a que al tanque de algas se incorporan dos cargas evitadas; Agua Tratada y "Centrates", es decir que al ingresar estas dos entradas al sistema de depuración de biogás, conseguimos evitar que sean vertidas como emisiones negativas al agua.

En el caso de la fase de construcción de la planta de depuración de biogás, existe un gran impacto negativo en las categorías de daño de acidificación y debilitamiento de la capa de ozono. Debido claramente a la ocupación de terreno para construcción que presenta esta planta de depuración que son casi 80 ha, que significa eliminar toda capa vegetal para poder realizar la instalación de los diferentes sistemas de la planta.

Según el método de análisis de Demanda Energética Acumulada (figura 10), en la categoría de daño Energía Fósil (No Renovable) es posible observar un gran impacto ambiental positivo que está asociado al funcionamiento de la columna de absorción, ya que es en este proceso donde se produce el biometano e ingresado como carga evitada la producción de gas natural, que permite prescindir de la utilización de energías fósiles.

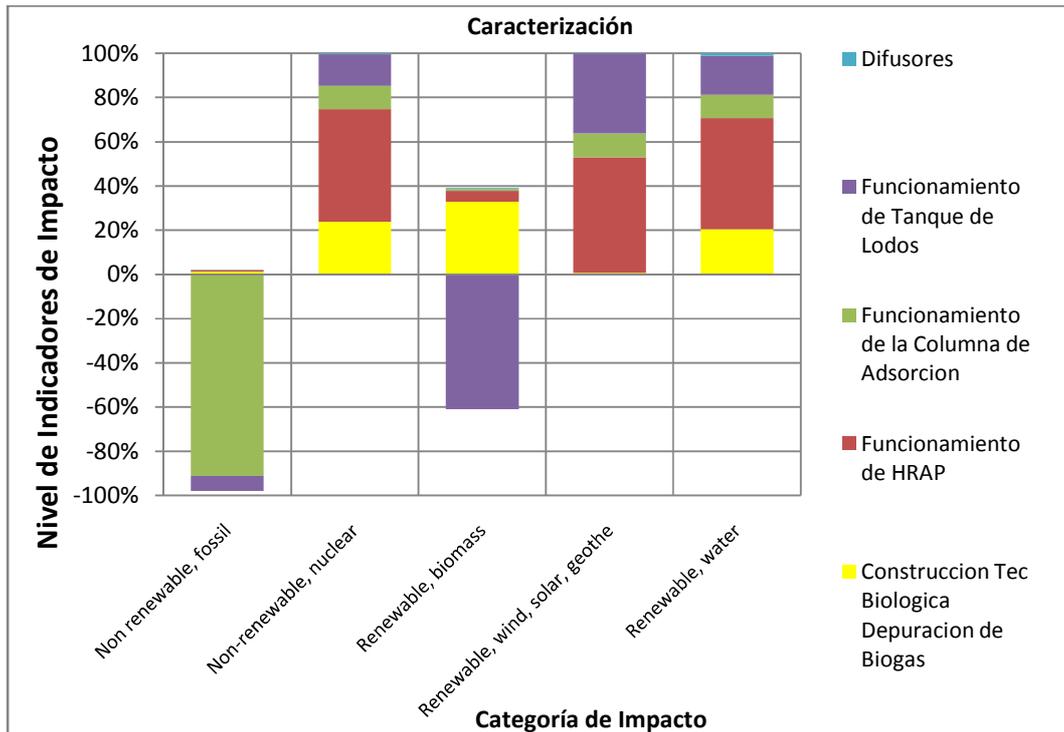


Figura 10. Evaluación del Impacto Ambiental del Ciclo de Vida de la Tecnología Biológica (Microalgas/Bacterias) de Depuración de Biogás (Método: Cumulative Energy Demand V1.05)

Otro impacto positivo es el que se genera por el funcionamiento del tanque de lodos, que permite evitar la carga ambiental de producir un fertilizante sintético, producción que estaría relacionada directamente con el alto consumo energético generado con biomasa.

Los altos impactos ambientales asociados al funcionamiento del HRAP, se deben a los consumos eléctricos que están asociados a ese proceso. Así como también en el caso del funcionamiento del tanque de lodos en las categorías de Energía Nuclear (No renovables), Solar, Geotérmica, Eólica (Renovable), Hidráulica (Renovable). Lo que debe asociarse al mix energético utilizado cuyos mayores porcentajes corresponden a energía nuclear, hidráulica, eólica y fotovoltaica.

El proceso de construcción de la planta también presenta un gran impacto ambiental lo que estaría asociado con la fabricación de los materiales necesarios para fabricar los equipos de la planta y el consumo energético que está involucrado en el proceso de habilitación del terreno para la instalación de los equipos.



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

En la figura 11 se observan los impactos ambientales positivos asociados al funcionamiento del tanque de lodos y al funcionamiento de la columna de absorción.

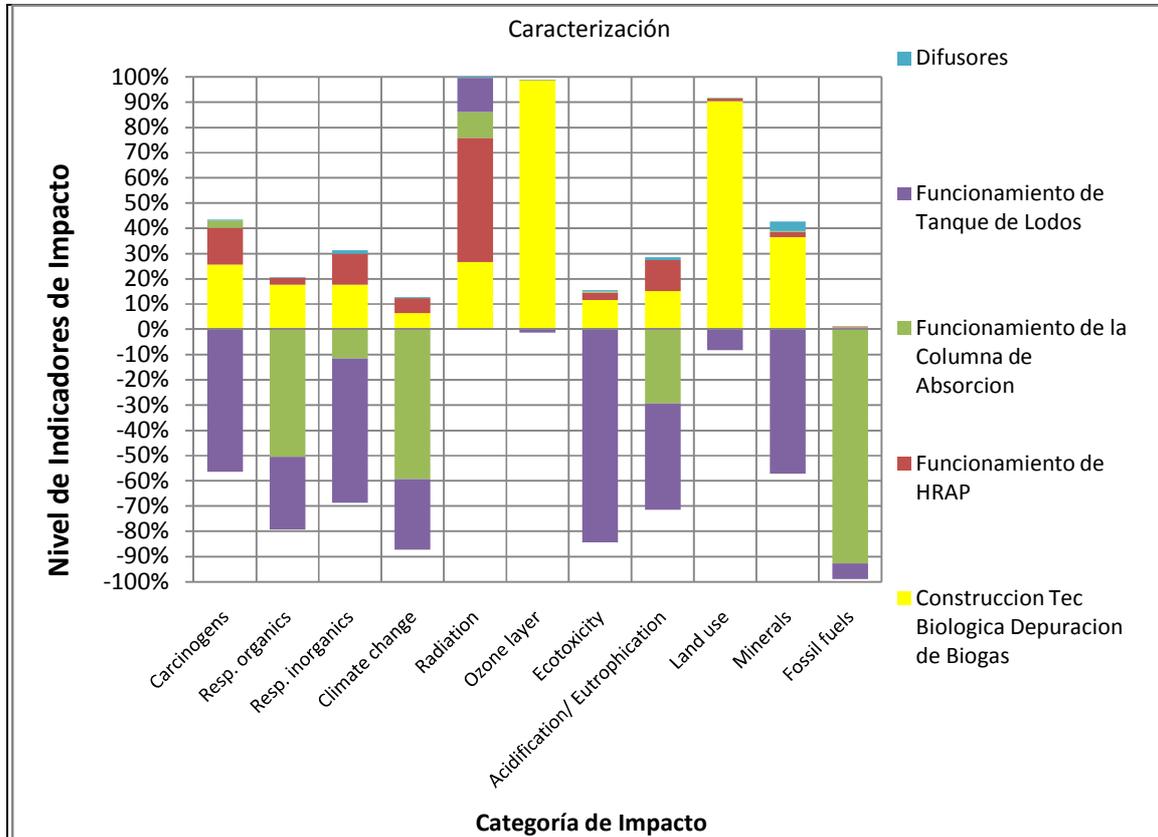


Figura 11. Evaluación del Impacto Ambiental del Ciclo de Vida de la Tecnología Biológica (Microalgas/Bacterias) de Depuración de Biogás (Método: Eco-indicador 99 (H) V2.06 / Europe El 99 H/A))

En las categorías de impacto ambiental como Carcinógenos, Respiratorios Orgánicos, Respiratorios Inorgánicos, Cambio Climático, Ecotoxicidad, Acidificación/Eutrofización, Minerales, Uso del Suelo, existe un claro impacto ambiental positivo asociado al funcionamiento del tanque de lodos, debido a la carga evitada de este proceso que es la generación de lodos valorados como enmienda agrícola y así evitar el uso de fertilizante sintético.

Así también en el caso del funcionamiento de la columna de absorción existe un impacto positivo en las categorías Respiratorios Orgánicos, Respiratorios Inorgánicos, Cambio Climático, Acidificación/Eutrofización, Combustibles Fósiles, debido a la carga evitada de producir gas natural.



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

En cuanto a los impactos negativos, la fase de construcción presenta un gran impacto en las categorías de daño; Capa de Ozono, Minerales, Uso del Suelo debido a la elevada ocupación de terreno para la construcción de la planta. En una menor medida presenta un impacto negativo en las categorías de Carcinógenos, Respiratorios Orgánicos, Respiratorios Inorgánicos, Cambio Climático, Radiación, Ecotoxicidad, Acidificación/Eutrofización.

Según el método CML 2 baseline 2000, al comparar los sistemas de depuración de biogás analizados, es posible observar en la figura 12 que el sistema que utiliza el Tratamiento Convencional, posee en la mayoría de las categorías impactos ambientales negativos, generando efectos dañinos en las categorías; Acidificación, Eutrofización, Calentamiento Global, Toxicidad Humana, Ecotoxicidad Acuática y Terrestre, y Oxidación Fotoquímica, presentando impactos positivos sólo en lo que tiene relación con el agotamiento de los recursos abióticos.

Los mayores impactos positivos del sistema de microalgas, se refieren a los impactos sobre el Agotamiento Abiótico, la Ecotoxicidad Terrestre, los impactos sobre el Calentamiento Global, los impactos sobre la Toxicidad Humana y sobre la Oxidación Fotoquímica.

Bajo el análisis del método CML 2 baseline 2000, es el sistema biológico de depuración de biogás con microalgas el que presenta mayores impactos positivos y el sistema convencional de depuración de biogás el que presenta marcados impactos ambientales negativos en muchas de las categorías de impacto analizadas.

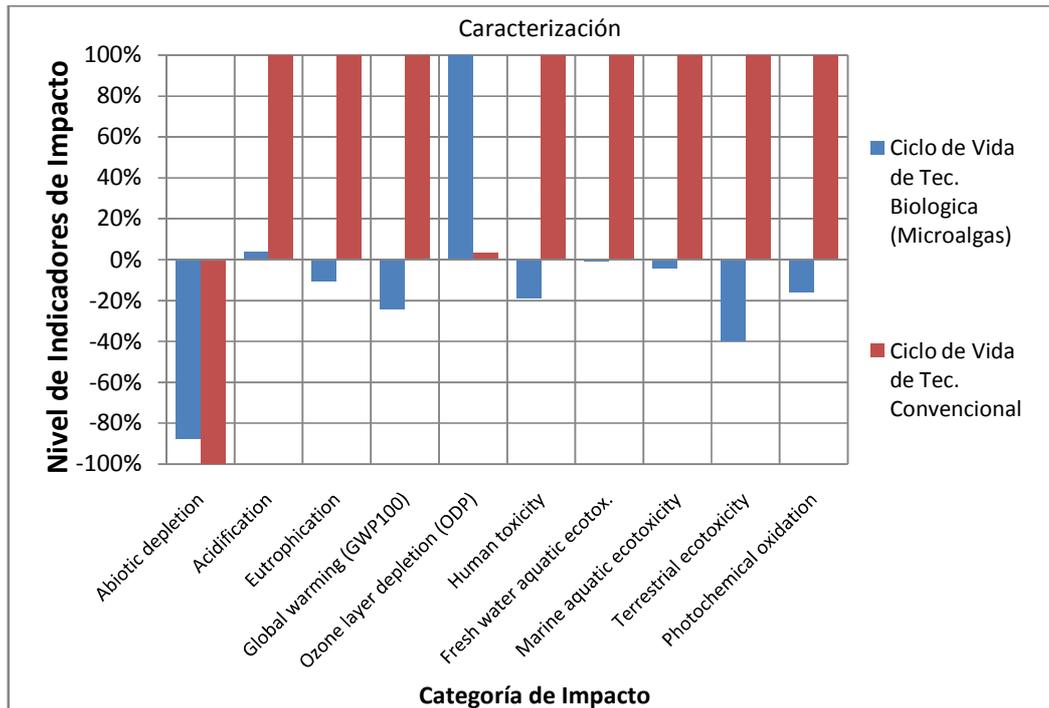


Figura 12. Comparación Ciclo de Vida Tecnología Biológica de Depuración de Biogás y Tecnología Convencional de Depuración de Biogás. (Método: CML 2 baseline 2000 V2.04 / world, 1990).

Según el método de Demanda Energética Acumulada, es el sistema de depuración de biogás con tecnología convencional el que presenta mayores impactos negativos en el uso energético, tal como se observa en la figura 13. Sólo se observan impactos positivos de ambas tecnologías en el uso de energías fósiles, ya que ambas tecnologías presentan asociado a sus procesos la carga evitada de producir gas natural.

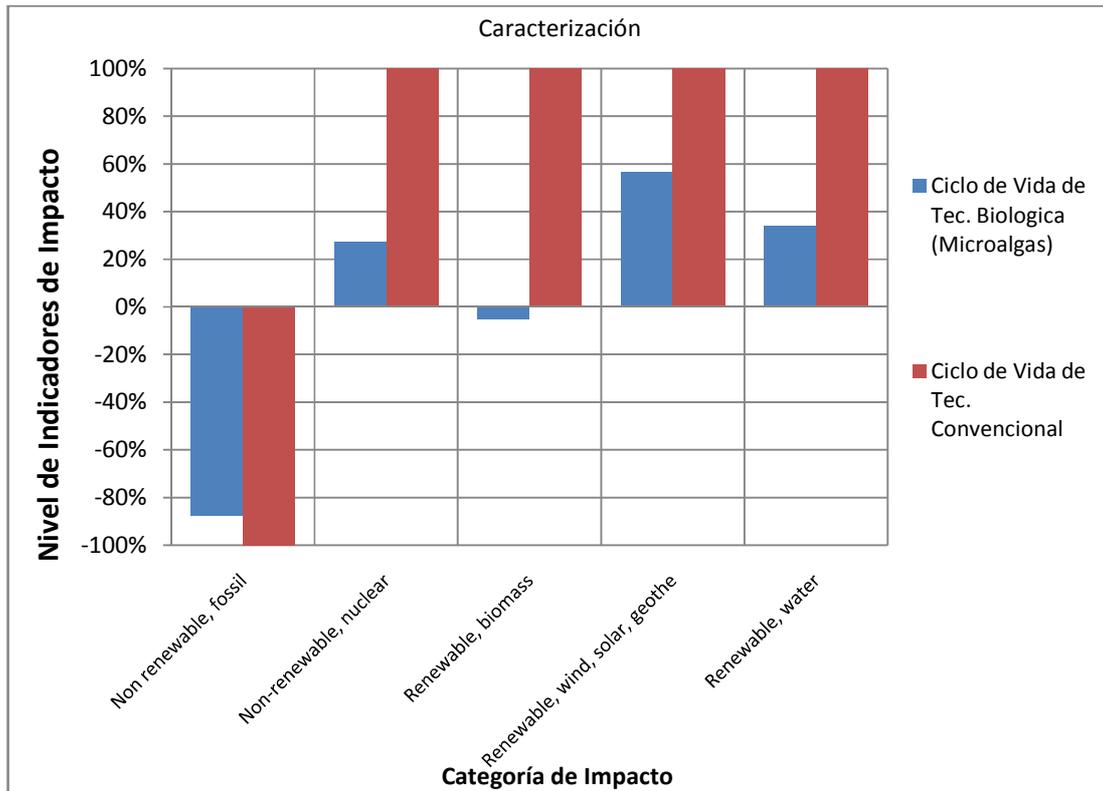


Figura 13. Comparación Ciclo de Vida Tecnología Biológica de Depuración de Biogás y Tecnología Convencional de Depuración de Biogás. (Método: Cumulative Energy Demand V1.05).

Según el método Eco-indicador 99 (H) al igual que con los anteriores análisis, los mayores impactos ambientales negativos los presenta el sistema de depuración de biogás basado en tecnología convencional (figura 14). Categorías de impacto como Carcinógenos, Respiratorios Inorgánicos, Cambio Climático, Radiación, Ecotoxicidad, Acidificación y Eutrofización, además del Uso del Suelo, son en las que más se incrementa el impacto causado por la construcción y funcionamiento de la planta de depuración con tecnología convencional.

A diferencia de lo anterior, la tecnología de depuración biológica de microalgas, presenta bajísimos impactos ambientales en algunas categorías y en otras presenta impactos positivos genera, siendo los únicos impactos negativos los generados en la categoría de Uso del Suelo y Capa de Ozono, que claramente se deben en gran medida a la gran ocupación de terreno que debe hacerse para instalar este tipo de sistemas.



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

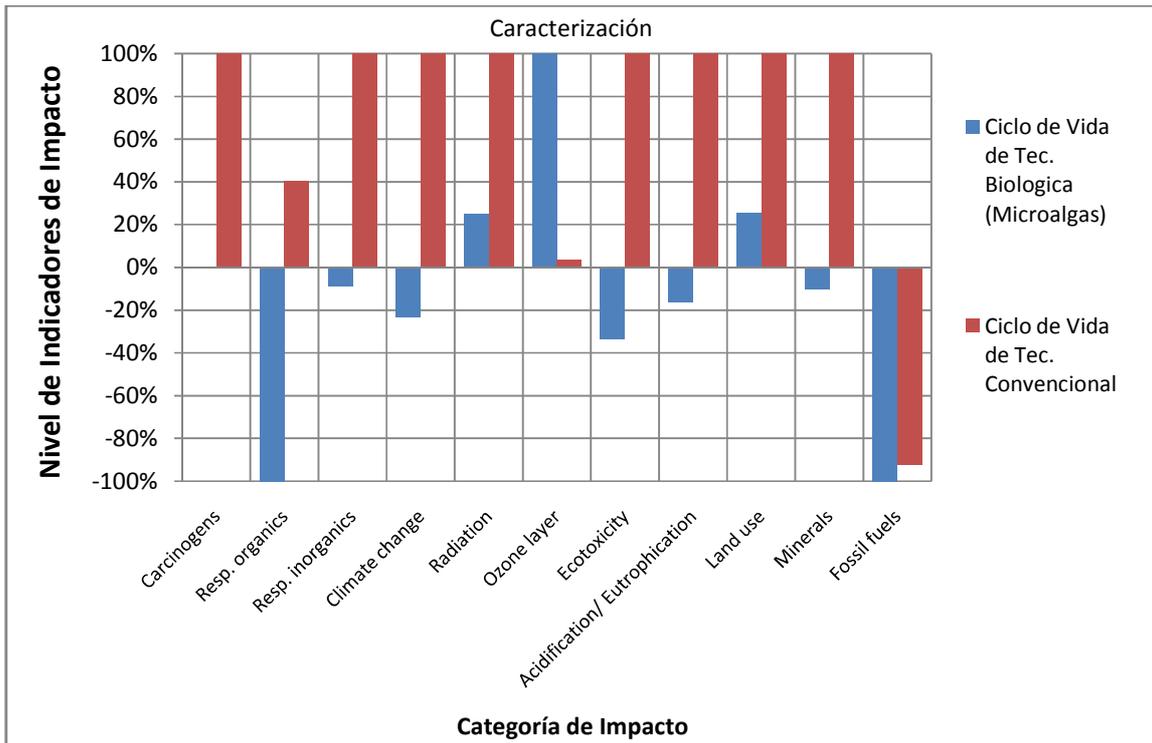


Figura 14. Comparación Ciclo de Vida Tecnología Biológica de Depuración de Biogás y Tecnología Convencional de Depuración de Biogás. (Método: Eco-indicador 99 (H) V2.06 / Europe EI 99 H/A).



6. CONCLUSIONES

- La tecnología convencional de depuración de biogás presentó mayores impactos ambientales negativos que la tecnología biológica de microalgas/bacterias.
- La tecnología convencional de depuración de biogás impacta ambientalmente en mayor medida en aquellas categorías asociadas al cambio climático, ecotoxicidad, acidificación, eutrofización.
- A diferencia de la tecnología convencional, tecnología de depuración biológica de microalgas y bacterias, presenta nulos impactos ambientales en categorías de daño a la salud humana o de impacto al medio biótico o abiótico.
- Ambas tecnologías de depuración de biogás presentan impactos ambientales negativos debido a sus consumos energéticos, tanto de los procesos directos de operación, como de los procesos de fabricación de los materiales que forman parte de estas plantas. Finalmente, el balance energético neto es favorable debido a la sustitución de gas natural por biometano.



7. BIBLIOGRAFIA

- Abatzoglou, N., Boivin, S. A review of biogas purification processes. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining. Society of Chemical Industry.* **2009.** 3: 42-71.
- Ación, F.G., Fernández J. M., Magán, J. J., Molina, M. Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. *Biotechnology Advances.* **2012.** 30:1344-1353.
- Alfonsín, C. Lebrero, R., Estrada, J. M., Muñoz, R., Kraakman, B., Feijoo, G., Moreira, M. T. Selection of odour removal technologies in wastewater treatment plants: A guideline based on Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management.* **2015.** 149:77-84
- Andriani, D., Wresta, A., Dwi Atmaja, T., Saepudin, A., A Review on Optimization Production and Upgrading Biogas Through CO₂ Removal Using Various Techniques. *Applied Biochemistry and Biotechnology.* **2014.** 172:1909-1928
- Bahr, M., Díaz, I., Dominguez, A., González, A., Muñoz, R. Microalgal-Biotechnology As a Platform for an Integral Biogas Upgrading and Nutrient Removal from Anaerobic Effluents. *Environmental Science and Technology.* **2014.** 48: 573-581.
- Bauer, F., Hulteberg, C., Persson, T., Tamm, D. Biogas upgrading – Review of commercial technologies. *SGC Rapport.* 2013:270.
- Clarens, A., Eleazer R., White, M. and Colosi, L. Environmental Life Cycle Comparison of Algae to Other Bioenergy Feedstocks. *Environmental & Science Technology.* **2010.** 44, (5): 1813- 1819.
- Danish Technological Institute. Report; Biogas and bio-syngas upgrading. **2012.** 97 p.
- Diaz, I., Ramos, I., Fernández-Polanco, M., Economic analysis of Microaerobic removal of H₂S from biogas in full-scale sludge digesters (Manuscript Draft). Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Ambiental, Universidad de Valladolid. **s/f.** 30 p.
- Hahn, H., Hartmann, K., Bühle, L., Wachendorf, M. Comparative life cycle assessment of biogas plant configurations for a demand oriented biogas supply for flexible power generation. *Bioresource Technology.* **2015.** 179: 348-358.



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

- Herout, M., Malaťák, J., Kučera, L., Dlabaja, T. Biogas composition depending on the type of plant biomass used. *Research in Agricultural Engineering*. **2011**. (57), 4:137-143.
- 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. *Journal of Environmental Management*. **2013**. 130:242-247.
- Hjaila, K., Baccar, R., Sarrà, M., Gasol, C., Blánquez, P. Environmental impact associated with activated carbon preparation from olive-waste cake via life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*. **2013**. 130: 242-247.
- Llaneza, H., Moría, M.A., González, L., González, E. Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás. Capítulo 1: Caracterización, purificación y control del Biogás. *PSE Probiogas*. **2010**. 29 p.
- Ministerio de Industria, Energía y Turismo. *Boletín Oficial del Estado*. **2013**. Num. 6, Sección I: 889-892.
- Morero, B., Rodriguez, M., Campanella, E., Environmental impact assessment as a complement of life cycle assessment. Case study: Upgrading of biogas *Bioresource Technology*. **2015**. 190: 402-407.
- Muñoz, R., Meier, L., Diaz, I., Jeison, D. A critical review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for an integral biogas upgrading (Manuscript Draft). Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Ambiental, Universidad de Valladolid. **s/f**. 97 p.
- Naskeo Environment (**28 de febrero de 2015**). The Biogas. Recuperado de :http://www.biogasrenewableenergy.info/biogas_composition.html.
- Patterson, T., Esteves S., Dinsdale R., Guwy A. Life cycle assessment of biogas infrastructure options on a regional scale. *Bioresource Technology*. **2011**. 102: 7313-7323.
- Pedraz, C. (**3 de julio de 2009**). La biotecnología de microalgas, eficaz para el tratamiento de aguas residuales. Recuperado de: <http://www.dicyt.com/imprimir/labiotecnologiademicroalgaseficazparaeltreatmentodeaguasresiduales>
- Persson, M., Jonsson, O., Wellinger, A., Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection. *Serie IEA Bioenergy*. **2006**. 19 p.



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

- Petersson, A., Wellinger, A., Biogas upgrading technologies-developments and innovations. *Serie IEA Bioenergy*. **Octubre de 2009**. 20 p.
- Poeschi, M., Ward, S., Owende, P. Environmental impacts of biogas deployment - Part I: life cycle inventory for evaluation of production process emissions to air. *Journal of Cleaner Production*. **2012**. 24:168-183.
- Posadas, E., García-Encina, P. A., Soltau, A., Domínguez, A., Ignacio Díaz, I., Muñoz, R. Carbon and nutrient removal from centrates and domestic wastewater using algal–bacterial biofilm bioreactors. *Bioresource Technology*. **2013**. 139:50-58.
- Ramaraj, R., , Dussadee, N., Biological purification processes for biogas using algae cultures: A review. *International Journal of Sustainable and Green Energy*. **2015**. 4, (1-1): 20-32.
- Red Eléctrica de España (**31 de diciembre de 2014**). Estadística Diaria del Sistema Eléctrico Español. Recuperado de: www.ree.es.
- Ryckebosch, E., Drouillon, M., Vervaeren, H., Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy*. **2011**. 35:1633-1645.
- Saija Rasi. Biogas Composition and Upgrading Biomethane. Jyvaskyla: Jyvaskyla Studies in Biological And Environmental Science 202. **2009**. Editorial Board. 79 p.
- Scott, S., Davey, M., Dennis, J., Horst, I., Howe, C., Lea-Smith, D., Smith, A. Biodiesel from algae: challenges and prospects. *Current opinion in Biotechnology*. **2010**. 21: 277-286.
- Serejo, M., Posadas E., Boncz, M., Blanco, S and Muñoz, R. Influence of Biogas Flow Rate on Biomass Composition During the Optimization of Biogas Upgrading in Microalgal-Bacterial Processes. *Environmental & Science Technology* **2015** .49: 3228-3236.
- Slade, R., Bauen, A. Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects. *Biomass and Bioenergy*. **2013**. 53: 29-38.
- Smith, J. Treatise on Efficient Biogas Purification. **s/f**. 2 p.
- Starr, K., Gabarrell, X, Villalba, G., Talens, L. and Lombardi, L. Life cycle assessment of biogas upgrading technologies *Waste Management* **2012**. 32:991-999.



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

- Staudt, R.,. Carbon and nutrient removal from centrates and domestic wastewater using algal–bacterial biofilm bioreactors. **2006**. Presentación realizada en Simposio INNOGAS en Oct. de 2006 (presentación con Diapositivas).
- Van Ewijk, H. Environmental impact analysis PVC: For priority streams in Dutch lifecycle-based waste policy. *IVAM Research and Consultancy on Sustainability*. **2010**. 63 p.
- Varnero, M. T., Carú, M., Galleguillos, K., Achondo, P. Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. *Información Tecnológica*. **2012**. (23), 2: 31-40
- WWF España. Observatorio de la Electricidad Enero 2014. *Boletín Mensual*. **2014**. 7 p.
- Yajing X., Ying H., Bin W., Xiangping Z., Suojiang Z.. Biogas upgrading technologies: Energetic analysis and environmental impact assessment. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. **2015**. 23: 247-254.



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

8. ANEXOS



Cálculos de dimensiones de los equipos utilizados para ambas tecnologías de depuración de gases. Las características de los materiales de construcción fueron obtenidas en páginas web de empresas especializadas en la distribución o fabricación de estos materiales.

Tecnología convencional de depuración de biogás

- **Tanque de Adsorción de Carbón Activo**

Se ha considerado una torre cilíndrica. El volumen del lecho de carbón activado en el tanque de adsorción se estimó utilizando un caudal de biogás de entrada de 504 m³/h y un tiempo de residencia del gas en el tanque de 12 min, el tiempo de residencia y el tiempo de vida útil del carbón activo fueron calculados en base a la capacidad de adsorción específica de H₂S que posee que es de 0,1 g H₂S / g carbón activo (Muñoz *et al.* 2015).

$$V = TRH \cdot Q \quad [1]$$

Donde:

V es el volumen de la torre de adsorción

TRH es el tiempo de retención hidráulico del gas

Q es el caudal de gas a tratar

$$V = (12 \text{ min} \cdot 504 \text{ Nm}^3/\text{h})/60 \text{ min/h}$$

$$V = 100,8 \text{ m}^3$$

El volumen del lecho de carbón activo es la mitad del volumen total del tanque, por lo tanto el tanque completo tiene un volumen de 201,6 m³ ≈ 200 m³.

La altura del lecho se ha fijado en 1 metro y la altura total del tanque (h) en 2 metros. Con esto obtenemos el área que nos permitirá estimar la masa de fibra de vidrio que deberá tener el tanque para poder contener el carbón activo.

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

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

$$D = 11,3 \text{ m}$$



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

Donde:

V es el volumen de la torre de adsorción

r es el radio de la base de la torre

h es la altura del tanque

La superficie de la torre de adsorción será:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r^2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot (r + h) \quad [3]$$

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

$$S = 271,6 \text{ m}^2$$

Donde

S es la Superficie de la torre de Adsorción

r es el radio de la base de la torre

h es la altura del tanque

Los tanques estarán cubiertos por láminas de fibra de vidrio que tienen un peso específico de $p_{FV}=600 \text{ g/m}^2$. Si tenemos una superficie de $271,6 \text{ m}^2$ por cada tanque y debemos considerar que deben estar reforzados con 3 láminas para tener un espesor adecuado. Necesitamos 326 kg de fibra de vidrio para fabricar ambos tanques de adsorción de carbón activado.

$$M_{FV} = S \cdot p_{FB} \cdot NI \quad [4]$$

$$M_{FV} = 271,6 \cdot 2 \cdot 0,6 \cdot 3$$

$$M_{FV} = 978 \text{ kg}$$

Donde

M_{FV} es la masa del material (Fibra de Vidrio)

S es la Superficie del tanque

NI Número de láminas de fibra de vidrio

p_{FB} es el peso específico de la fibra de vidrio

Por tanto, la cantidad de carbón activo que contiene cada tanque, teniendo en cuenta que la densidad del carbón activo es de $\rho_{CA}=450 \text{ kg/m}^3$, será:

$$M_{CA} = V_{CA} \cdot \rho_{CA} \quad [5]$$



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

$$M_{CA} = 100,8 \cdot 450$$

$$M_{CA} = 45360 \text{ kg}$$

Donde

M_{CA} es la masa del Carbón Activo

V_{CA} es el Volumen del Carbón Activo

p_{CA} es el Peso Específico del Carbón Activo

- **Columna de Absorción con Agua (Scrubber).**

Se ha considerado una columna de absorción cilíndrica fabricada en acero. El volumen de la columna de absorción se estimó utilizando un caudal de biogás de entrada de $504 \text{ m}^3/\text{h}$ y un tiempo de residencia del gas en el tanque de $1,2 \text{ min}$ (Muñoz *et al.* 2015).

$$V = \text{TRH} \cdot Q \quad [6]$$

$$V = 1,2 \cdot \frac{504}{60} = 10 \text{ m}^3$$

Donde

V es el Volumen de la Columna de Absorción

TRH es el tiempo de retención hidráulico del gas

Q es el caudal de gas a tratar

Se ha fijado una altura de la columna (h) de 2 metros. De este modo, el diámetro de la columna será:

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot h}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{10}{\pi \cdot 2}} = 2,52 \text{ m} \quad [7]$$

Donde:

V es el volumen de la columna de adsorción

r es el radio de la base de la columna

h es la altura del columna

Con esto obtenemos el área que nos permitirá estimar la masa de acero necesaria para su fabricación.

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r^2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot (r + h) \quad [8]$$



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

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

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

Donde

S es la Superficie de la Columna de Absorción

r es el radio de la base de la Columna

h es la altura de la Columna

Tomando un peso específico para el acero de $p_A=50 \text{ kg/m}^2$ para un espesor es de 10 mm, tenemos que la cantidad total de acero para poder fabricar la columna de absorción es de 1290 kg.

$$M_A = S \cdot p_A \quad [9]$$

$$M_A = 25,8 \cdot 50$$

$$M_A = 1290 \text{ kg}$$

M_A es la masa del material (Acero)

S es la Superficie de la Columna

p_A es el peso específico del Acero

- **Torre flash de descompresión.**

Se ha considerado una cámara de flash cilíndrica fabricada en acero. Se fijó, según información bibliográfica (Muñoz *et al.*, 2015), que el volumen de la torre flash de descompresión debía ser la mitad del volumen de la columna del lavador, es decir 5 m^3 . La altura de la torre (h) se ha fijado en 1 metro- A partir de estos datos de diseño, se obtiene que el diámetro y la superficie es:

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot h}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{5}{\pi \cdot 1}} = 2,52 \text{ m} \quad [10]$$

Donde

D es el Diámetro de la base de la torre

V es el Volumen de la Torre Flash de descompresión

h es la altura de la torre

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r^2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot (r + h) \quad [11]$$



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

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

$$S = 18 \text{ m}^2$$

Donde

S es la superficie de la Torre Flash de descompresión

r es el radio de la base de la torre

h es la altura de la torre

El acero necesario para la fabricación de la torre es de 900 kg.

$$M_A = S \cdot p_A \quad [12]$$

$$M_A = 18 \cdot 50$$

$$M_A = 900 \text{ kg}$$

Donde

M_A es la masa del Material (Acero)

S es la Superficie del Torre Flash

p_A es el Peso Específico del Acero

- **Columna de Desorción.**

Las características y dimensiones de la columna de desorción son idénticas que la cámara de flash (Muñoz *et al.*, 2015). Por tanto:

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot h}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{5}{\pi \cdot 1}} = 2,52 \text{ m}$$

Donde

D es el Diámetro de la base de la Columna

V es el Volumen de la Columna de desorción

h es la altura de la Columna

$$S = 18 \text{ m}^2$$

$$M_A = 18 \cdot 50 = 900 \text{ kg}$$

Donde

S es la superficie de la Columna de Desorción

M_A es la Masa del Material (Acero)



Tecnología biológica de depuración de biogás (microalgas-bacterias)

Para la estimación de las dimensiones de los equipos del sistema de depuración biológico con microalgas, se utilizaron los datos facilitados por el grupo de investigación del profesor Raúl Muñoz Torre del Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente de la Universidad de Valladolid. Sólo para el tanque de biogás se han utilizado datos de capacidad y materialidad encontrados en las páginas web de comercializadores de este tipo de equipos.

- **Tanque de biogás**

El tanque de biogás, es un contenedor esférico de acero que tiene una capacidad de $V=1000 \text{ m}^3$. Por tanto, el área del tanque y la masa de acero necesario para la fabricación de este contenedor es:

$$D = 2 \cdot \left(\frac{3 \cdot V}{4 \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{3}} = 2 \cdot \left(\frac{3 \cdot 1000}{4 \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{3}} = 12,4 \text{ m} \quad [13]$$

Donde

D es el Diámetro del tanque de Biogás

V es el volumen del tanque de Biogás

$$S = 4 \cdot \pi \cdot r^2 = 4 \cdot \pi \cdot 6,2^2 = 483 \text{ m}^2 \quad [14]$$

Donde

S es la Superficie del Tanque de Biogás

r es el Radio del Tanque de Biogás

Considerando un peso específico para el acero de $p_A=50 \text{ kg/m}^2$, para la fabricación del tanque de biogás son necesarios 24,15 t de acero.

$$M_A = S \cdot p_A \quad [15]$$

$$M_A = 483 \cdot 50$$

$$M_A = 24150 \text{ kg} = 24,15 \text{ t}$$

Donde

M_A es la masa del Material (Acero)

S es la Superficie del Torre Flash

p_A es el Peso Específico del Acero



- **Columna de absorción**

Las 42 Columnas de absorción son cilíndricas, fabricadas con PVC de alta resistencia. Se fijó para cada una un volumen de 14 m^3 y una altura de 1,7 m. Por tanto, su diámetro y superficie es:

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot h}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{14}{\pi \cdot 1,7}} = 3,24 \text{ m} \quad [16]$$

Donde

D es el Diámetro de la base de la Columna de Absorción

V es el Volumen de la Columna de Absorción

h es la altura de la Columna de Absorción

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r^2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot (r + h) \quad [17]$$
$$S = 2 \cdot \pi \cdot 1,62 \cdot (1,62 + 1,7) = 34 \text{ m}^2$$

Donde

S es la superficie de la Columna de Absorción

r es el radio de la base de la Columna de Absorción

h es la altura de la Columna de Absorción

Si consideramos que el PVC de alta resistencia tiene un peso específico de 15 kg/m^2 , la cantidad de este material que necesitamos para fabricar las 42 columnas de absorción es de 21,42 t.

$$M_{PVC} = S \cdot p_{PVC} \cdot n \quad [18]$$
$$M_{PVC} = 34 \cdot 15 \cdot 42$$
$$M_{PVC} = 21420 \text{ kg} = 21,42 \text{ t}$$

Donde

M_{PVC} es la masa del Material (PVC)

S es la Superficie de la Columna

P_{PVC} es el Peso Especifico del PVC

n es la cantidad requerida



- **High Rate Algal Pond (HRAP)**

Los tanques para contener las algas estarán fabricados de PVC de alta resistencia y sus dimensiones son:

Largo (a): 175 m

Ancho (b): 36,6 m

Altura (c): 0,5 m

Por lo tanto, el Volumen de este tipo de tanque, queda definido según la siguiente fórmula:

$$V = a \cdot b \cdot c$$

$$V = 3202,5 \text{ m}^3 \quad [19]$$

Donde

V es el Volumen total del tanque de algas

a es el largo del tanque

b es el ancho del tanque

c es la altura del tanque

$$A = ab + 2ac + 2bc \quad \rightarrow \quad A = 6616,6 \text{ m}^2 \quad [20]$$

Donde

A es el Área del Tanque, sin considerar una cara (Tapa)

a es el largo del tanque

b es el ancho del tanque

c es la altura del tanque

Si el peso específico que posee el PVC para fabricar los contenedores de algas es de 15 kg/m^2 , es necesario contar con **4168 ton para los 42 HRAP**.

$$M_{PVC} = S \cdot p_{PVC} \cdot n \quad [21]$$

$$M_{PVC} = 6616,6 \cdot 15 \cdot 42$$

$$M_{PVC} = 4168458 \text{ kg} = 4168 \text{ t}$$



Donde

M_{PVC} es la masa del Material (PVC)

S es la Superficie de la Columna

P_{PVC} es el Peso Específico del PVC

n es la cantidad requerida

- **Sedimentadores**

Los sedimentadores también están fabricados de un PVC de alto impacto, con la misma resistencia que el de los anteriores equipos y su peso es de 15 kg/m².

El diámetro de los sedimentadores es 20 m y la altura es de 1,5 m, por lo tanto el volumen y el área para el cálculo de material es:

$$V_{cilindro} = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

$$V = 471,23 \text{ m}^3 \quad [22]$$

Donde

V es el Volumen del Sedimentador

r es el radio del Sedimentador

h es la altura del Sedimentador

$$S = (2 \cdot \pi \cdot r \cdot h) + (\pi \cdot r^2) \rightarrow A = 408,40 \text{ m}^2 \quad [23]$$

Donde

S es la Superficie del sedimentador, sin considerar la tapa

r es el radio del Sedimentador

h es la altura del sedimentador

Para la construcción de estos sedimentadores se emplearán **12,25 ton de PVC.**

$$M_{PVC} = S \cdot p_{PVC} \cdot n \quad [24]$$

$$M_{PVC} = 408,4 \cdot 15 \cdot 2$$

$$M_{PVC} = 12252 \text{ kg} = 12,25 \text{ t}$$



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

Donde

M_{PVC} es la masa del Material (PVC)

S es la Superficie de la Columna

P_{PVC} es el Peso Específico del PVC

n es la cantidad requerida

- **Tanques de Sólidos.**

Los tanques de sólidos también están fabricados de PVC de alto impacto, con la misma resistencia que el de los sedimentadores y su peso es de 15 kg/m^2 .

Largo(a): 14 m

Ancho(b): 15 m

Altura(c): 3 m

$$V = a \cdot b \cdot c \rightarrow V = 630 \text{ m}^3 \quad [25]$$

Donde

V es el Volumen total del tanque de sólidos

a es el largo del tanque

b es el ancho del tanque

c es la altura del tanque

$$\text{Área} = 2ab + 2ac + 2bc$$

$$A = 594 \text{ m}^2 \quad [26]$$

Donde

A es el Área del Tanque

a es el largo del tanque

b es el ancho del tanque

c es la altura del tanque

Para la construcción de estos 8 tanques que contendrán la biomasa de salida, se emplearán **71 ton de PVC**.

$$M_{PVC} = S \cdot p_{PVC} \cdot n \quad [27]$$

$$M_{PVC} = 594 \cdot 15 \cdot 8$$



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

$$M_{PVC} = 71280 \text{ kg} = 71t$$

Donde

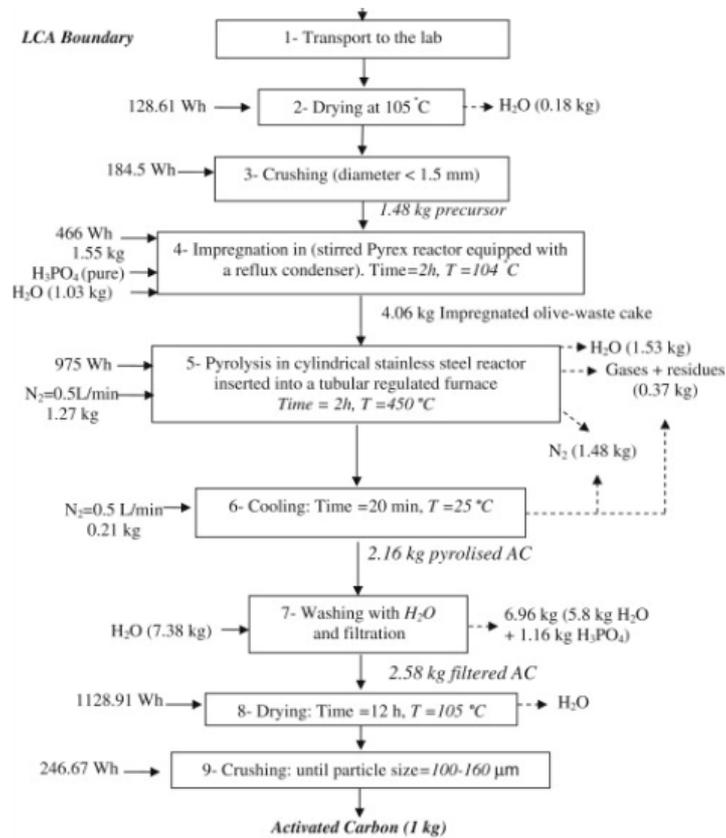
M_{PVC} es la masa del Material (PVC)

S es la Superficie de la Columna

P_{PVC} es el Peso Especifico del PVC

n es la cantidad de tanques de sólidos

Figura 1: Diagrama de Flujo de la Fabricación de Carbón Activado.





MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

Tabla 1: Ciclo de Vida Tecnología Convencional de Depuración de Biogás
Método CML 2 baseline 2000 V2.04 / world, 1990

Categoría de impacto	Unidad	Total	Construcción Tec Convencional Depuración de Biogás	Funcionamiento de Tanque de Carbón Activado	Funcionamiento de Water Scrubbing	Funcionamiento Columna de Desorción	Carbón Activado
Abiotic depletion	kg Sb eq	-0,00991	2,11E-06	6,83E-07	-0,01117	0	0,00125
Acidification	kg SO2 eq	0,00499	6,34E-06	6,74E-07	0,000312	0	0,00467
Eutrophication	kg PO4--- eq	0,00217	9,15E-08	3,67E-08	-1,1E-06	0	0,00217
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	0,84682	0,000244	8,71E-05	-0,13167	0,66255	0,31562
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	2,85E-08	5,41E-12	4,33E-12	2,57E-09	0	2,6E-08
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	0,21354	0,000116	1,95E-05	0,011016	0	0,20239
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	0,29440	3,24E-05	6,24E-06	0,003705	0	0,29066
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	309,506	0,027319	0,013891	8,252661	0	301,212
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,00144	1,01E-06	1,34E-07	7,91E-05	0	0,00136
Photochemical oxidation	kg C2H4	0,00017	2,85E-07	2,57E-08	-2,5E-05	0	0,00019

Tabla 2: Ciclo de Vida Tecnología Convencional de Depuración de Biogás
Método: Cumulative Energy Demand V1.05

Categoría de impacto	Unidad	Total	Construcción Tec Convencional Depuración de Biogás	Funcionamiento de Tanque de Carbón Activado	Funcionamiento de Water Scrubbing	Funcionamiento Columna de Desorción	Carbón Activado
Non renewable, fossil	MJ eq	-18,6903	0,004012	0,001105	-21,0145	0	2,319038
Non-renewable, nuclear	MJ eq	1,246642	0,000455	0,000949	0,563572	0	0,681666
Renewable, biomass	MJ eq	0,060404	1,65E-05	3,74E-06	0,002221	0	0,058162
Renewable, wind, solar, geoth	MJ eq	0,188022	5,77E-06	0,000306	0,18151	0	0,0062
Renewable, water	MJ eq	0,215845	0,00021	0,000203	0,120403	0	0,095029

Tabla 3: Ciclo de Vida Tecnología Convencional de Depuración de Biogás
Método: Eco-indicador 99 (H) V2.06 / Europe EI 99 H/A

Categoría de impacto	Unidad	Total	Construcción Tec Convencional Depuración de Biogás	Funcionamiento de Tanque de Carbón Activado	Funcionamiento de Water Scrubbing	Funcionamiento Columna de Desorción	Carbón Activado
Carcinogens	DALY	3,52E-07	5E-11	6,02E-12	3,57E-09	0	3,48E-07
Resp. organics	DALY	3,99E-11	2,19E-13	2,6E-14	-7,7E-11	0	1,16E-10
Resp.	DALY	4,5E-07	3,68E-10	7,14E-11	2,65E-08	0	4,23E-07



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

inorganics							
Climate change	DALY	1,8E-07	5,1E-11	1,82E-11	-2,5E-08	1,39E-07	6,62E-08
Radiation	DALY	2,88E-09	5,57E-13	1,92E-12	1,14E-09	0	1,73E-09
Ozone layer	DALY	3,01E-11	5,7E-15	4,58E-15	2,72E-12	0	2,73E-11
Ecotoxicity	PAF*m2yr	0,089214	8,06E-05	6,75E-06	0,004013	0	0,085114
Acidification/ Eutrophication	PDF*m2yr	0,008	8,41E-06	1,99E-06	0,000174	0	0,007816
Land use	PDF*m2yr	0,03973	0,000117	6,98E-07	0,000414	0	0,039198
Minerals	MJ surplus	0,016564	0,000114	1,31E-06	0,000775	0	0,015673
Fossil fuels	MJ surplus	-2,97873	0,000404	7,03E-05	-3,20885	0	0,229648

Tabla 4: Ciclo de Vida Tecnología Biológica (Microalgas)

Método: CML 2 baseline 2000 V2.04 / world, 1990

Categoría de impacto	Unidad	Total	Construcción Tec Biológica Depuración de Biogas	Funcionamiento de HRAP	Funcionamiento de la Columna de Adsorción	Funcionamiento de Tanque de Lodos	Difusores
Abiotic depletion	kg Sb eq	-0,01131	0,000145	0,000125	-0,01087	-0,00072	5,56E-06
Acidification	kg SO2 eq	0,00018	0,000295	0,000123	-5,8E-05	-0,0002	2,65E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	-0,02055	6,05E-06	-0,0205	-2E-05	-3,4E-05	3,3E-07
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	-0,20761	0,019304	0,015911	-0,16945	-0,07422	0,000847
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	8,82E-07	8,92E-07	7,9E-10	1,64E-10	-1,1E-08	2,12E-11
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	-0,04021	0,009862	0,003561	0,000209	-0,05406	0,00022
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	-0,00334	0,00208	0,00114	0,000235	-0,00689	0,000102
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-12,3795	4,255457	2,537765	0,527627	-19,7931	0,092764
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-0,00058	0,00013	2,44E-05	4,85E-06	-0,00074	3,57E-06
Photochemical oxidation	kg C2H4	-2,7E-05	1,34E-05	4,7E-06	-3,7E-05	-1E-05	1,16E-06

Tabla 5: Ciclo de Vida Tecnología Biológica (Microalgas)

Método: Cumulative Energy Demand V1.05

Categoría de impacto	Unidad	Total	Construcción Tec Biológica Depuración de Biogas	Funcionamiento de HRAP	Funcionamiento de la Columna de Adsorción	Funcionamiento de Tanque de Lodos	Difusores
Non renewable, fossil	MJ eq	-21,3938	0,267017	0,201802	-20,37	-1,50301	0,010422
Non-renewable, nuclear	MJ eq	0,3415	0,081568	0,173303	0,036032	0,048994	0,001602
Renewable, biomass	MJ eq	-0,00307	0,004632	0,000683	0,000142	-0,00859	5,49E-05
Renewable, wind, solar, geoth	MJ eq	0,106723	0,00063	0,055816	0,011605	0,038652	1,98E-05
Renewable, water	MJ eq	0,073519	0,015007	0,037025	0,007698	0,012968	0,000821



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

Tabla 6: Ciclo de Vida Tecnología Biológica (Microalgas)

Método: Eco-indicador 99 (H) V2.06 / Europe EI 99 H/A

Categoría de impacto	Unidad	Total	Construcción Tec Biologica Depuracion de Biogas	Funcionamiento de HRAP	Funcionamiento de la Columna de Adsorción	Funcionamiento de Tanque de Lodos	Difusores
Carcinogens	DALY	-9,8E-10	1,95E-09	1,1E-09	2,21E-10	-4,3E-09	2,92E-11
Resp. organics	DALY	-9,9E-11	2,99E-11	4,75E-12	-8,6E-11	-4,9E-11	4,3E-13
Resp. inorganics	DALY	-4E-08	1,88E-08	1,3E-08	-1,2E-08	-6,1E-08	1,47E-09
Climate change	DALY	-4,2E-08	3,57E-09	3,32E-09	-3,3E-08	-1,6E-08	1,78E-10
Radiation	DALY	7,13E-10	1,9E-10	3,51E-10	7,3E-11	9,68E-11	2,21E-12
Ozone layer	DALY	9,27E-10	9,37E-10	8,37E-13	1,74E-13	-1,2E-11	2,23E-14
Ecotoxicity	PAF*m2yr	-0,0299	0,005098	0,001234	0,000257	-0,03681	0,000223
Acidification/ Eutrophication	PDF*m2yr	-0,00128	0,000455	0,000364	-0,00087	-0,00126	3,33E-05
Land use	PDF*m2yr	0,00996	0,010772	0,000127	2,65E-05	-0,00098	1,63E-05
Minerals	MJ surplus	-0,00168	0,004276	0,000238	4,96E-05	-0,00669	0,00045
Fossil fuels	MJ surplus	-3,2206	0,024628	0,012842	-3,05913	-0,19977	0,000792

Tabla 7: Comparación Ciclo de Vida Tecnología Biológica de Depuración de Biogás y Tecnología Convencional de Depuración de Biogás.

Método: CML 2 baseline 2000 V2.04 / world, 1990

Categoría de impacto	Unidad	Magnitud		Porcentaje	
		Ciclo de Vida de Tec. Biologica (Microalgas)	Ciclo de Vida de Tec. Convencional	Ciclo de Vida de Tec. Biologica (Microalgas)	Ciclo de Vida de Tec. Convencional
Abiotic depletion	kg Sb eq	-0,01131	-0,00991	-87,6%	-100%
Acidification	kg SO2 eq	0,000188	0,004998	3,8%	100%
Eutrophication	kg PO4--- eq	-0,02055	0,002171	-10,6%	100%
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	-0,20761	0,846827	-24,5%	100%
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	8,82E-07	2,85E-08	100,0%	3%
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	-0,04021	0,213547	-18,8%	100%
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	-0,00334	0,294405	-1,1%	100%
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-12,3795	309,506	-4,0%	100%
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-0,00058	0,001441	-39,9%	100%
Photochemical oxidation	kg C2H4	-2,7E-05	0,000172	-15,9%	100%



MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

EVALUACIÓN AMBIENTAL MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CON MICROALGAS Y SU COMPARATIVA CON UN SISTEMA DE DEPURACIÓN DE BIOGÁS CONVENCIONAL

Tabla 8: Comparación Ciclo de Vida Tecnología Biológica de Depuración de Biogás y Tecnología Convencional de Depuración de Biogás.

Método: Cumulative Energy Demand V1.05

Categoría de impacto	Unidad	Magnitud		Porcentaje	
		Ciclo de Vida de Tec. Biologica (Microalgas)	Ciclo de Vida de Tec. Convencional	Ciclo de Vida de Tec. Biologica (Microalgas)	Ciclo de Vida de Tec. Convencional
Non renewable, fossil	MJ eq	-21,3938	-18,6903	-87%	-100%
Non-renewable, nuclear	MJ eq	0,3415	1,246642	27%	100%
Renewable, biomass	MJ eq	-0,00307	0,060404	-5%	100%
Renewable, wind, solar, geothe	MJ eq	0,106723	0,188022	57%	100%
Renewable, water	MJ eq	0,073519	0,215845	34%	100%

Tabla 9: Comparación Ciclo de Vida Tecnología Biológica de Depuración de Biogás y Tecnología Convencional de Depuración de Biogás.

Método: Eco-indicador 99 (H) V2.06 / Europe EI 99 H/A

Categoría de impacto	Unidad	Magnitud		Porcentaje	
		Ciclo de Vida de Tec. Biologica (Microalgas)	Ciclo de Vida de Tec. Convencional	Ciclo de Vida de Tec. Biologica (Microalgas)	Ciclo de Vida de Tec. Convencional
Carcinogens	DALY	-9,8E-10	3,52E-07	0%	100%
Resp. organics	DALY	-9,9E-11	3,99E-11	-100%	40%
Resp. inorganics	DALY	-4E-08	4,5E-07	-9%	100%
Climate change	DALY	-4,2E-08	1,8E-07	-23%	100%
Radiation	DALY	7,13E-10	2,88E-09	25%	100%
Ozone layer	DALY	9,27E-10	3,01E-11	100%	3%
Ecotoxicity	PAF*m2yr	-0,02999	0,089214	-34%	100%
Acidification/ Eutrophication	PDF*m2yr	-0,00128	0,008	-16%	100%
Land use	PDF*m2yr	0,009961	0,03973	25%	100%
Minerals	MJ surplus	-0,00168	0,016564	-10%	100%
Fossil fuels	MJ surplus	-3,22064	-2,97873	-100%	-92%