



Universidad de Valladolid

Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal, Agronómica y de la Bioenergía

Campus Duques de Soria

**MÁSTER EN INGENIERÍA DE LA BIOENERGÍA Y SOSTENIBILIDAD
ENERGÉTICA**

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

**TÍTULO: "ESTUDIO DE TECNOLOGÍAS DE UPGRADING DE BIOGÁS A
PEQUEÑA ESCALA"**

AUTOR: ANA MARÍA GARCÍA GARCÍA

Tutor: Israel Díaz Villalobos

Cotutor: Ignacio de Godos Crespo

Soria, 20 de junio de 2024



Universidad de Valladolid

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER *

con DNI/pasaporte y estudiante del Máster en

de la

de la Universidad de Valladolid, del curso como autor/a del TFM titulado:

DECLARO QUE:

El trabajo que presento para su exposición y defensa es original y no he utilizado fuentes de información, sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía.

Asimismo, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos términos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

Firma:

***Reglamento sobre la elaboración y evaluación del trabajo de fin de máster**, artículo 2.1: El TFM ha de ser original e inédito y debe ser realizado por el estudiante bajo la supervisión y la orientación de su correspondiente tutor académico.

ESTUDIO DE TECNOLOGÍAS DE UPGRADING DE BIOGÁS A PEQUEÑA ESCALA – RESUMEN

El biogás es una energía renovable producida a partir del proceso de digestión anaerobia. Está compuesto principalmente por 45-65% de metano (CH_4), 50-35% de dióxido de carbono (CO_2), 2-3% de nitrógeno (N_2) y 1,5-2% de ácido sulfhídrico (H_2S). La digestión anaerobia es un proceso importante para producir biometano con más del 90% de CH_4 después de realizar un proceso de upgrading biogás. El CO_2 , el H_2S y otras impurezas no son deseadas, ya que reducen el poder calorífico del biogás y, si no se eliminan, ocasionan diversos problemas operativos (es decir, corrosión de las tuberías y máquinas).

El biogás se puede utilizar para calefacción, producción de electricidad, combustible para automóviles y producción de productos químicos. En comparación con el gas natural, que tiene un poder calorífico de 37,7 a 39,8 MJ/m^3 , el biogás tiene un poder calorífico menor con 20,7 a 27,8 MJ/m^3 . Sin embargo, el biogás debe utilizarse en el mismo lugar donde se genera, no puede trasladarse, y en ocasiones no hay suficientes necesidades de energía térmica y eléctrica, lo que reduce su rentabilidad. [5].

Se han desarrollado varias tecnologías para llevar a cabo el upgrading de biogás como: procesos de absorción, adsorción, procesos criogénicos, independientes e híbridos y de membrana. La absorción utiliza una mezcla de agua y productos químicos para absorber el CO_2 presente en el biogás. Por otro lado, la adsorción utiliza un adsorbente para capturar el CO_2 . La técnica criogénica elimina H_2S y CO_2 del biogás licuándolos a bajas presiones y temperaturas, mientras que la técnica criogénica híbrida combina la adsorción y la membrana con la tecnología criogénica. La tecnología de membranas utiliza el tamaño molecular para realizar la separación de CO_2 y CH_4 del biogás. Esta última técnica se aplica cada vez más a diferentes escalas, es decir, a escala de laboratorio o piloto con fines de investigación, pero también a escala real para la purificación de biogás en grandes plantas e instalaciones de tratamiento de biogás, así como para el tratamiento de pequeños caudales de gas, gracias a una serie de ventajas [5]

Existen numerosas alternativas de upgrading de biogás para tratar caudales de gas superiores a 500 m^3/h . Sin embargo, existen muy pocas cuando los caudales son menores. En España, donde se generan residuos agropecuarios en zonas muy diversas, se podría dar la situación en la que transportarlos a una planta de biogás para codigerirlos y después someterlos a un proceso de upgrading no sea rentable económicamente y mucho menos sostenible. Por ello, es necesario el desarrollo de tecnologías de upgrading de biogás que permitan tratar pequeños caudales de biogás, siendo una opción viable.

Recientemente, la tecnología de membranas ha ganado un interés significativo en el upgrading de biogás, debido a su fabricación sencilla, fácil manejo, no implica productos químicos tóxicos y su prometedora viabilidad económica, ya que presenta unos costes de inversión y de operación muy bajos en comparación con otras tecnologías, sobre todo para el tratamiento de pequeños caudales de biogás en comparación con otras tecnologías [4].

Por estas razones, la tecnología de membranas se considera la más adecuada para el tratamiento de biogás a pequeña escala, ya que ofrece una combinación óptima de sencillez de fabricación, facilidad de manejo y costos de inversión y operación significativamente más bajos en comparación con otras tecnologías, lo que la hace especialmente viable y rentable para el tratamiento de pequeños caudales de biogás.

ÍNDICE

1.	<i>INTRODUCCIÓN</i>	10
1.1.	Objetivo	12
1.1.	Alcance.....	12
2.	<i>UPGRADING FÍSICOQUÍMICO DE BIOGÁS</i>	13
2.1.	Lavado con agua	15
2.2.	Lavado con aminas.....	16
2.3.	Adsorción PSA	18
2.4.	Separación por membranas.....	19
2.5.	Selección de tecnología	21
3.	<i>UPGRADING DE BIOGÁS MEDIANTE SEPARACIÓN POR MEMBRANAS</i>	27
3.1.	Tipos de membranas.....	28
4.	<i>UPGRADING DE BIOGÁS Y LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030</i>	31
5.	<i>CONCLUSIONES</i>	34
6.	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	36

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Esquema de las distintas tecnologías de upgrading de biogás disponibles hoy en día.</i>	14
<i>Figura 2. Esquema del proceso de upgrading de lavado con agua.</i>	16
<i>Figura 3. Esquema del proceso de upgrading de lavado con aminas.</i>	17
<i>Figura 4. Esquema del proceso de upgrading de biogás de adsorción PSA.</i>	19
<i>Figura 5. Esquema del proceso de upgrading de separación por membranas.</i>	20
<i>Figura 6. Costes de inversión específicos en función del caudal de biogás a tratar.</i>	23
<i>Figura 7. Costes de inversión para pequeños caudales de biogás a tratar.</i>	24
<i>Figura 8. Costes de operación para pequeños caudales de biogás a tratar.</i>	25

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Evaluación de características de las distintas tecnologías de upgrading de biogás [3].22

ABREVIATURAS

AC: acetato de celulosa

aMDEA: metildietanolamina activada

CH₄: metano

CHP: producción combinada de calor y electricidad

CN: nanotubos de carbono

CO: monóxido de carbono

CO₂: dióxido de carbono

DEA: dietanolamina

EBA: European Biogas Association

FORSU: fracción orgánica de residuos sólidos urbanos

GEI: gas de efecto invernadero

H₂O: agua

H₂S: ácido sulfhídrico

HC: hidrocarburos

MDEA: metildietanolamina

MEA: monoetanolamina

MMM: membrana de matriz mixta

MMCM: membrana compuesta de matriz mixta

N₂: nitrógeno

NH₃: amoníaco

O₂: oxígeno

ODS: objetivos de desarrollo sostenible

PC: policarbonato

PDMS: polidimetilsiloxano

PI: poliimida

PSA: adsorción por cambio de presión

PSU: polisulfona

PZ: piperazina

RSU: residuos sólidos urbanos

TFC: membrana compuesta de película delgada

TFN: membrana nanocompuesta de película delgada

UE: Unión Europea

1. INTRODUCCIÓN

El biogás, como su propio nombre indica, es un gas de origen biológico. Se genera mediante la degradación de la biomasa por la acción bacteriana en ausencia de aire, en un proceso bioquímico de digestión anaerobia, donde se convierte la materia orgánica en condiciones de ausencia de oxígeno bajo temperaturas adecuadas. La generación de biogás puede ocurrir espontáneamente en la naturaleza o en condiciones controladas, en plantas diseñadas específicamente para ello.

Cuando la generación de biogás tiene lugar en condiciones controladas se lleva a cabo en recipientes herméticos llamados digestores [1].

Una composición típica para el biogás puede ser la siguiente: 45-65% de metano (CH_4), 50-35% de dióxido de carbono (CO_2), 2-3% de nitrógeno (N_2) y 1,5-2% de ácido sulfhídrico (H_2S). La composición del biogás dependerá del tipo de residuo utilizado para producirlo: residuos agropecuarios, lodos de depuradora, residuos agroindustriales, fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU)...

El biogás producido en procesos de digestión anaerobia puede tener diferentes usos: en una caldera para generación de calor o electricidad, motores o turbinas para generar electricidad, en pilas de combustible, previa realización de una limpieza de H_2S y otros contaminantes, purificarlo y añadir los aditivos necesarios para introducirlo en una red de transporte de gas natural, uso como material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido como es el metanol o el gas natural licuado, uso como material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido como es el metanol o el gas natural licuado, combustible de automoción...

Por otro lado, el biogás es un subproducto de digestión anaerobia con gran potencial de revalorización.

Además, el biogás está cobrando importancia debido a la situación medioambiental actual: elevado precio del petróleo y su carácter no renovable, sensibilización sobre la contaminación, alta generación de residuos orgánicos... Como consecuencia de ello, la aplicación que se comentaba anteriormente sobre la inyección de biometano en la red de transporte como sustituto del gas natural (no renovable y a elevado precio) tiene un interés creciente.

Sin embargo, el biogás bruto contiene una gran proporción de dióxido de carbono que debe eliminarse antes de su utilización en muchas aplicaciones [4].

Por ello, para poder ser utilizado como sustituto al gas natural tiene que ser sometido a un proceso de depuración para eliminar compuestos como el CO_2 , H_2S , principalmente,

garantizando que el gas tiene una elevada pureza en CH₄. Este proceso de depuración es más conocido como upgrading de biogás, que se lleva a cabo a través de tecnologías físicas, químicas, fisicoquímicas y biológicas.

Recientemente, la tecnología de membranas ha despertado un interés notable en el campo del upgrading del biogás. Este interés creciente se debe a diversas ventajas que ofrece esta tecnología. En primer lugar, la fabricación de las membranas es relativamente sencilla, lo que facilita su producción y disponibilidad en el mercado. Además, su manejo es simple, lo que las convierte en una opción práctica para diferentes aplicaciones.

Otra ventaja importante es que el uso de la tecnología de membranas no requiere el empleo de productos químicos tóxicos. Esto no solo contribuye a un proceso más seguro para los operadores y el medio ambiente, sino que también simplifica el cumplimiento de las normativas ambientales.

Desde el punto de vista económico, la tecnología de membranas muestra una viabilidad prometedora. Los costos asociados tanto a la inversión inicial como a la operación continua son considerablemente bajos en comparación con otras tecnologías disponibles para el tratamiento de biogás. Esto es particularmente relevante cuando se trata de gestionar pequeños caudales de biogás, donde la tecnología de membranas se destaca por su eficiencia y rentabilidad [4].

En resumen, las ventajas de la tecnología de membranas en el upgrading de biogás incluyen su fácil fabricación y manejo, la ausencia de productos químicos tóxicos y su atractiva viabilidad económica. Estas características hacen que esta tecnología sea una opción preferida para el tratamiento de biogás, especialmente en aplicaciones de pequeña escala.

La valorización del biogás a través de procedimientos de upgrading conduce a biometano, que puede utilizarse en múltiples aplicaciones. Una de ellas y de gran importancia es el uso de biometano como sustituto al gas natural, como se ha mencionado anteriormente [5].

En España hay aproximadamente 250 plantas de biogás activas, con una producción total de biogás de 8.079 GWh. A finales de 2022, había 5 plantas de biometano activas en España, 1 nueva planta con respecto a 2021. Este número está aumentando rápidamente, con al menos 6 nuevas plantas más instaladas en septiembre de 2023. Además, se espera un importante desarrollo en el sector del biometano en España en los próximos años, ya que, según datos de 2023, tiene el cuarto mayor potencial de biometano en Europa.

Los principales sustratos utilizados para la producción de biometano provienen de residuos sólidos municipales orgánicos (73%), materias primas agrícolas (22%) y vertederos (5%). De las once plantas españolas de biometano activas, nueve plantas inyectan a la red de distribución y

una planta a la red de transporte; el estado de inyección de la planta restante no se registra en la base de datos de la European Biogas Association (EBA). También hay varios proyectos de demostración de biometano en España; se trata principalmente de proyectos piloto asociados con iniciativas de I+D financiadas por la Unión Europea (UE), como los programas LIFE, H2020 y MCE185.

Como España es un país con una industria alimentaria, agrícola y ganadera muy importante, el potencial sin explotar para la producción de biometano es significativo. Considerando todos los tipos de materias primas disponibles, se estima que la producción potencial de biometano en España podría ser de más de 100 TWh al año. España tiene así el cuarto potencial de biometano de Europa. Los próximos años serán importantes para el desarrollo del sector español del biometano [2].

1.1. Objetivo

El objetivo de este Trabajo de Fin de Máster es el estudio de las tecnologías de upgrading de biogás a pequeña escala, puesto que existen numerosas alternativas para tratar elevados caudales de biogás ($> 500 \text{ m}^3/\text{h}$), pero muy pocas cuando los caudales son menores.

En España existen varias regiones donde la generación de residuos agropecuarios es muy dispersa y se puede dar la situación de que transportarlos a largas distancias para llevarlos a una planta de biogás para codigerirlos y tener una alta producción no sea rentable o sostenible (por el consumo de combustible durante el transporte de los residuos). De ahí el creciente interés en ver las posibilidades que existen a pequeña escala.

1.1. Alcance

Para conseguir los objetivos propuestos, el plan de trabajo comenzó con la revisión bibliográfica de una serie de artículos científicos relacionados con diferentes técnicas de upgrading de biogás, teniendo en cuenta la eliminación en el biogás del CO, H₂S y otros compuestos que reducen su pureza. De esta forma, se pudo conocer las tecnologías más habituales disponibles en el mercado, así como otras tecnologías emergentes. Dentro de las tecnologías de upgrading de biogás disponibles se realizó un estudio para determinar cuáles eran más viables a pequeña escala. De las tecnologías económicamente viables se ha seleccionado el upgrading de biogás de separación por membranas, y se ha realizado un análisis en profundidad de dicha tecnología.

2. UPGRADING FISICOQUÍMICO DE BIOGÁS

El biogás tiene presente un número de contaminantes elevado: CO₂, H₂S, H₂O, N₂, O₂, siloxanos, hidrocarburos halogenados..., entre otros. Esto se traduce en procesos complejos de upgrading basados en tecnologías químicas y físicas capaces de producir un biogás con purezas de CH₄ desde 88% al 98% dependiendo de la tecnología y eliminar más del 99% de CO₂, H₂S...

Sin embargo, los procesos de upgrading de biogás se ven limitados medioambientalmente por el alto consumo de energía que requieren.

El CO₂ y el N₂ son uno de los mayores contaminantes del biogás, que reduce el poder calorífico de este y el índice de Wobbe. Concentraciones altas de O₂ en el biogás podrían producir explosiones peligrosas, mientras que altos niveles de H₂S combinado con H₂O condensada pueden causar corrosión en distintas partes de los equipos de upgrading, que conlleva a un mayor deterioro de estos. El NH₃ y los compuestos halogenados generan productos corrosivos durante la combustión, lo que puede dañar equipos, motores y tuberías. El H₂ y el CO disminuyen la concentración de CH₄. Por último, la combustión de siloxanos genera óxidos de silicio que se depositan en los motores de combustión y en tuberías, causando abrasión, sobrecalentamiento y mal funcionamiento consecuentemente [4].

El uso final de biogás determina su composición y el proceso de upgrading requerido. Por ejemplo, el biogás que se usa en calderas para producción de calor solo requiere la eliminación de H₂S por debajo de 1000 ppmv y agua antes de la combustión. El uso de biogás en motores de combustión para producir calor y energía combinado (CHP) requiere eliminar el agua, H₂S, NH₃, siloxanos e hidrocarburos (HC) halogenados. Las turbinas y microturbinas para CHP requieren bajos contenidos de siloxano y agua, pero son capaces de aguantar altas concentraciones de H₂S y HC halogenados. Sin embargo, los requisitos de calidad más estrictos se encuentran en el biometano para inyección en redes de gas natural y como combustible para vehículos.

Las tecnologías fisicoquímicas de upgrading de biogás son las tecnologías más maduras y disponibles del mercado. En general, la recuperación de metano de procesos fisicoquímicos puede alcanzar valores superiores al 96%.

El lavado con agua, disolventes orgánicos o soluciones químicas, la separación por membranas, la adsorción por cambio de presión y la separación criogénica de CO₂ dominan el mercado de upgrading de biogás hoy en día. Algunas tecnologías se analizan a continuación [3].

En la Figura 1, se muestra un esquema de las diferentes tecnologías de upgrading de biogás:

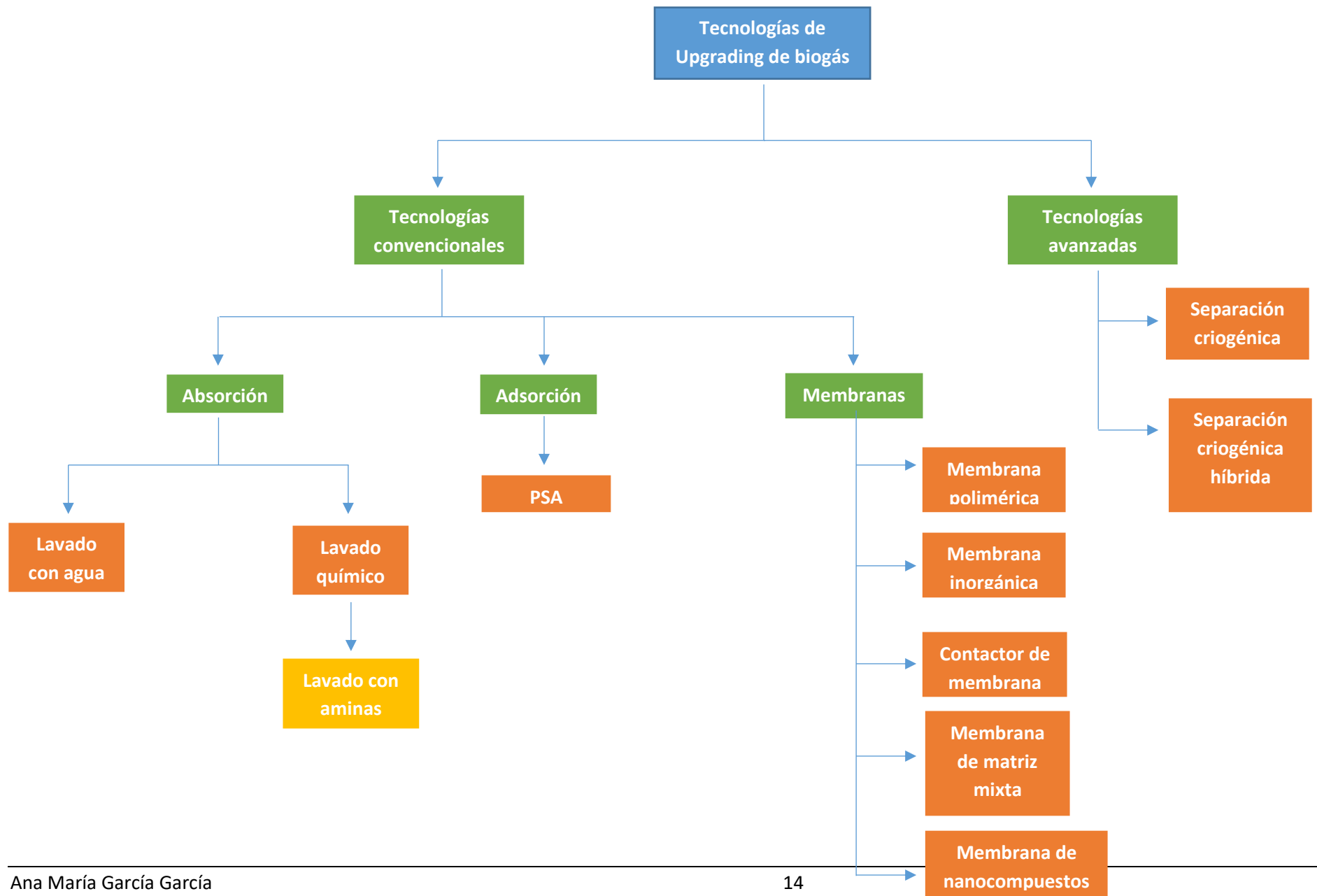


Figura 1. Esquema de las distintas tecnologías de upgrading de biogás disponibles hoy en día.

2.1. Lavado con agua

El upgrading de biogás mediante el lavado con agua es una tecnología sencilla que se basa en la diferencia de solubilidad en agua existente entre el CO_2 y el CH_4 , siendo 26 veces mayor la solubilidad del CO_2 . El agua en la columna de absorción absorbe dióxido de carbono del biogás crudo a alta presión. A continuación, el dióxido de carbono se libera nuevamente del agua en la columna de desorción, utilizando aire a presión atmosférica como medio de extracción [4].

En esta tecnología el biogás se comprime (ya que, según la ley de Henry, la solubilidad aumenta si aumenta la presión parcial del compuesto) y después se introduce por la parte inferior de una columna de absorción donde se pone en contacto con agua a presión, que entra por la parte superior de la columna. El flujo a contracorriente de gas y líquido es fundamental para garantizar una alta eficiencia. Por la parte superior de la columna sale el biogás rico en CH_4 , que no ha sido disuelto en el agua. Aunque el CH_4 es poco soluble en agua en comparación con el CO_2 , una parte de este se disuelve en el agua. Por ello, se coloca una columna de flash, donde se reduce la presión a presión atmosférica. Se produce una descompresión súbita donde se desorben los gases (el CH_4 en su mayoría, ya que es menos soluble) y se recupera el CH_4 y el CO_2 que no se ha disuelto y se llevan a la entrada del compresor para repetir el proceso. A continuación, el agua saturada en CO_2 se lleva a una columna de desorción. En ella se suministra aire, que va a arrastrar el CO_2 obteniéndose por la parte superior de la columna aire con el CO_2 . Por la parte de debajo de la columna sale el agua libre de CO_2 que se recircula de nuevo a la columna de absorción. El proceso es circular, aunque en ocasiones se retira agua y es necesario aportar agua nueva.

En el upgrading de biogás de lavado con agua se obtiene biometano con un porcentaje de CH_4 superior al 96%.

En la Figura 2, se muestra un esquema del proceso de upgrading de biogás de lavado con agua.

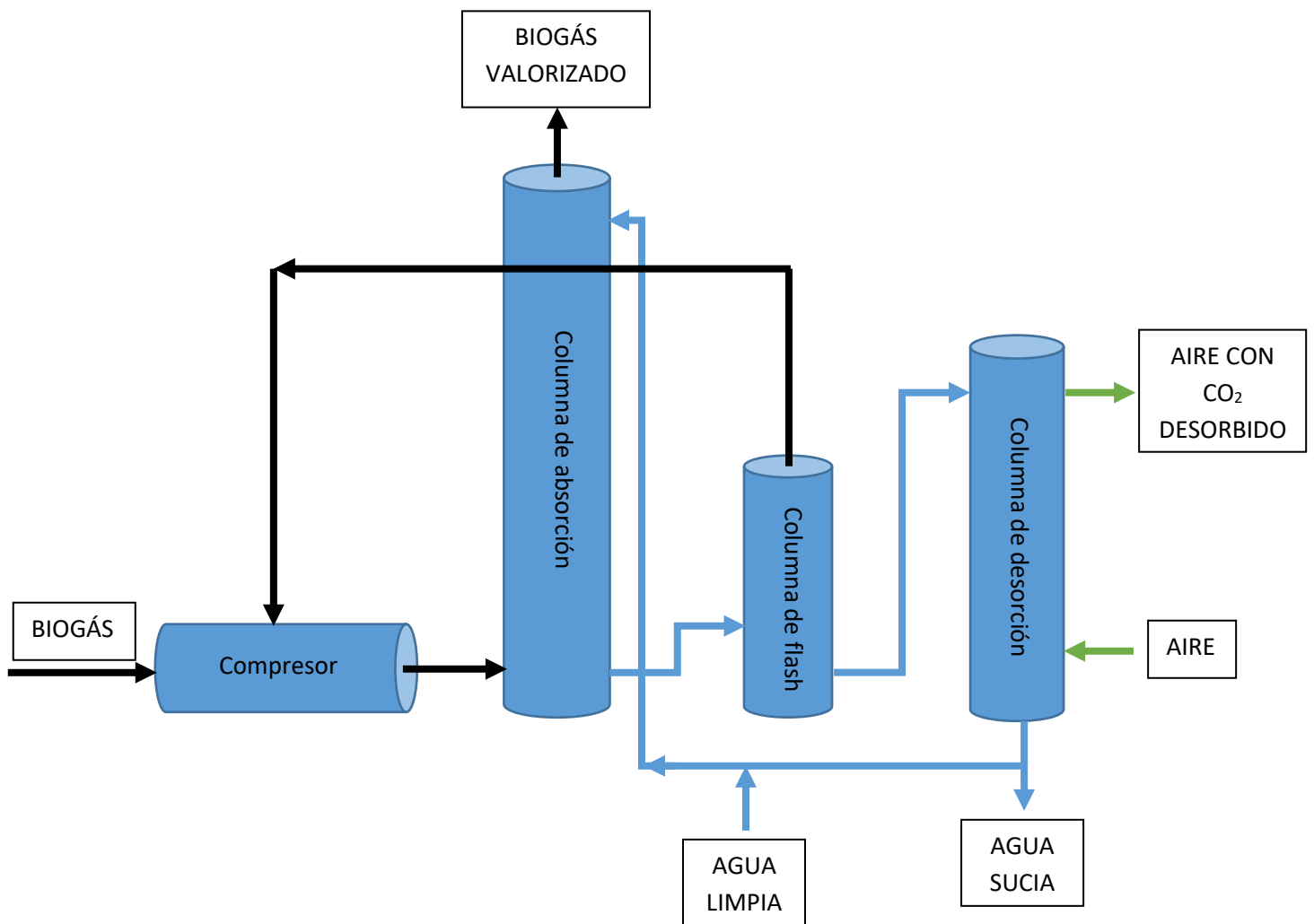


Figura 2. Esquema del proceso de upgrading de lavado con agua.

2.2. Lavado con aminas

El lavado con aminas es un proceso químico similar al anterior, pero en este caso en lugar de utilizar agua como solvente se utilizan productos químicos cuya afinidad por el CO_2 es mayor que por el CH_4 . En este caso como producto químico es habitual utilizar aminas (tales como metildietanolamina (MDEA), dietanolamina (DEA) y la monoetanolamina (MEA). Hoy en día, una opción común es utilizar una mezcla de MDEA y piperazina (PZ), que a veces se denomina MDEA activada (aMDEA). La aMDEA tiene una capacidad de absorción significativamente mayor en comparación con el uso solo de MDEA. La razón es que las aminas secundarias y primarias como la PZ tienen altas velocidades de reacción para la absorción de CO_2 y la capacidad de reaccionar aún más el CO_2 con la amina terciaria (MDEA), que con su calor de reacción relativamente bajo hace que la regeneración sea energéticamente eficiente. En esta tecnología tiene lugar una reacción química, a diferencia del caso anterior en el que se daban procesos físicos [5].

En este caso, se tienen dos columnas en serie, primero una de absorción, donde se elimina el CO₂ del biogás y después una de desorción, donde se elimina el CO₂ de la solución de amina mediante adición de calor. El biogás bruto entra en la primera columna donde las aminas actúan como absorbente, reaccionan con el CO₂ del biogás, forman un enlace y después se aporta energía para romperlo. Por la parte superior de la columna de absorción se retira el biogás rico en CH₄; por la parte inferior la amina con CO₂. Para romper el enlace Amina-CO₂ se aplica temperatura (más o menos 120-150°C). A continuación, se lleva a una columna de stripping y se obtiene el CO₂. La ventaja es que en este punto ya solo hay CO₂; antes era necesario utilizar aire para desplazar el CO₂ del agua. Se alcanzan concentraciones más altas de CH₄ que en los casos anteriores. El problema: la corrosión.

En el proceso de upgrading de biogás por lavado químico mediante aminas se consiguen tasas de recuperación de metano del 96 al 98%.

En la Figura 3, se muestra un esquema del proceso de upgrading de biogás de lavado con aminas:

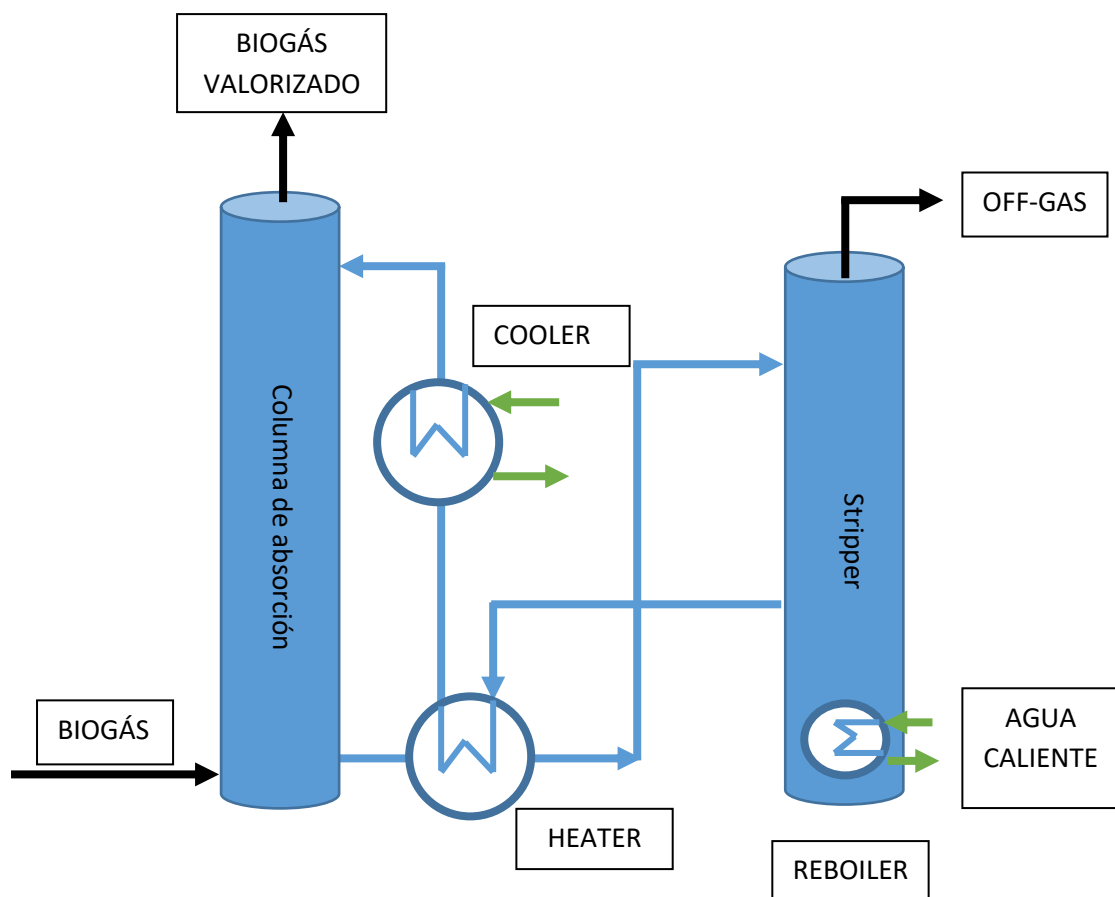


Figura 3. Esquema del proceso de upgrading de lavado con aminas.

2.3. Adsorción PSA

El método de adsorción por cambio de presión (PSA) es un método seco, que se utiliza para separar gases mediante propiedades físicas, es decir, la interacción física entre las moléculas del gas y el material adsorbente. Los adsorbentes utilizados son sólidos porosos con áreas específicas altas para maximizar el contacto gas-adsorbente.

En este caso el biogás se coloca en contacto con una sustancia sólida que tiene afinidad por el CO_2 y este se queda adsorbido a las paredes de esa sustancia sólida, que es el adsorbente. El proceso que se da suele ser físico. En esta tecnología de upgrading se hace pasar el biogás por una columna en la que se encuentra alojado el adsorbente, que suele ser zeolita o en otros casos carbón activo o aminas. El material adsorbente se acaba saturando en el proceso y ya no se tiene un proceso continuo como ocurría con los lavados físicos y químicos. Por ello, se utilizan cuatro columnas operadas en paralelo para que sea lo más continuo posible. Una vez que se ha adsorbido el biogás, se despresuriza, se recoge el CH_4 y se retira en la etapa de purga el CO_2 que se ha quedado sobre la zeolita. Luego, se haría la desorción para recoger el CO_2 y de nuevo la presurización. También van a quedar adsorbidos otros materiales como H_2S , H_2O y siloxanos y es más difícil eliminarlos, por ello, es mejor una eliminación de estos compuestos previa al proceso de upgrading.

El ciclo de una columna PSA consta principalmente de cuatro fases: adsorción, despresurización, regeneración o purga y presurización [5]. Durante la fase de alimentación, la columna se alimenta con biogás bruto presurizado a aproximadamente 4-10 bar. El dióxido de carbono se adsorbe en el lecho de la columna mientras que el metano pasa a través de la columna sin ser retenido por el adsorbente. Cuando el lecho está saturado con dióxido de carbono, se cierra la entrada y se inicia la fase de purga. La presión se reduce a presión ambiente o inferior para desorber el dióxido de carbono del adsorbente y el gas rico en dióxido de carbono se evacua de la columna. Como la columna al principio de esta fase estaba llena de biogás bruto, se pierde algo de metano con el dióxido de carbono desorbido. A la presión de columna más baja se inicia la fase de purga. Se sopla gas mejorado a través de la columna para vaciarla de todo el dióxido de carbono que se ha desorbido del lecho de la columna. La columna se regenera y se puede represurizar, ya sea con biogás crudo o con gas depurado. Como el ciclo consta de varias fases en las que la columna no se alimenta con biogás bruto, una unidad PSA de funcionamiento continuo tiene varias columnas paralelas; los diseños con dos o cuatro columnas son comunes. Así, una de las columnas siempre está involucrada en adsorción mientras que la(s) otra(s) se encuentran en diferentes fases de regeneración. Para reducir la pérdida de metano del proceso, las columnas suelen estar interconectadas de modo que el flujo de gas que sale de una columna

durante la purga se utiliza para presurizar otra columna en una fase de equalización de presión, lo que también reduce el consumo de energía del proceso. Las características de la unidad PSA incluyen presión de alimentación, presión de purga, adsorbente, tiempo de ciclo e interconexión de columnas, entre otras cosas. Cuando se utilizan varias columnas, hay muchas formas de modificar el ciclo del proceso para aumentar el rendimiento de metano del biogás crudo al gas mejorado, reducir la pérdida de metano y reducir la demanda de energía.

En los procesos de upgrading de biogás por adsorción PSA se consiguen purzas de metano del 96 al 98 %.

En la *Figura 4*, se muestra un esquema del proceso de upgrading de biogás de adsorción PSA.

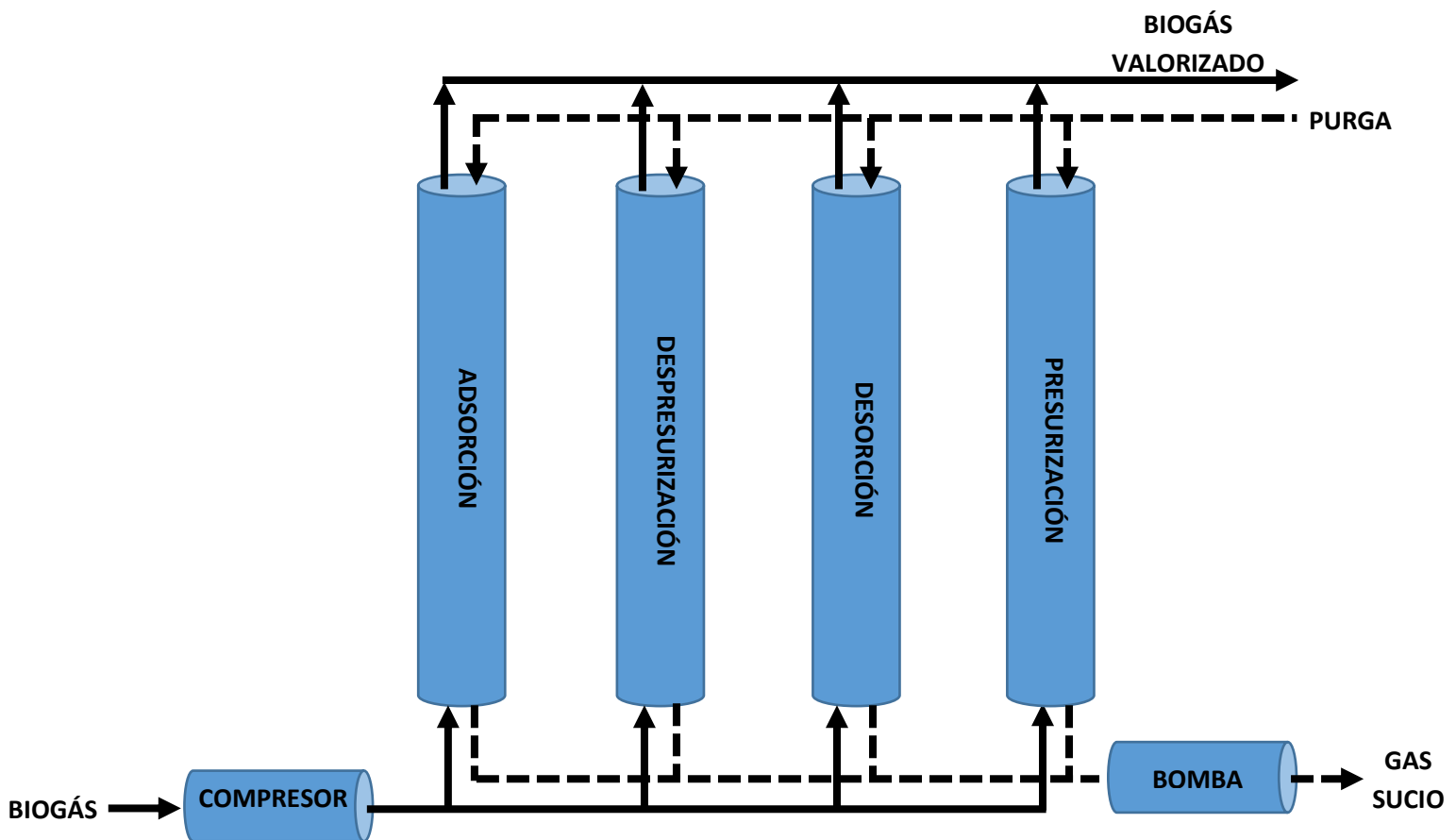


Figura 4. Esquema del proceso de upgrading de biogás de adsorción PSA.

2.4. Separación por membranas

Una membrana es un filtro denso que puede separar los componentes de un gas, generalmente según el tamaño molecular. Las membranas se utilizan para la eliminación de CO₂ en el procesamiento de gas natural desde hace unas tres décadas, por lo que la tecnología es bien conocida. Las membranas utilizadas para el upgrading del biogás retienen metano mientras que

el dióxido de carbono puede atravesar la membrana. Durante la separación del dióxido de carbono del gas bruto, se eliminan del biometano otros compuestos como el vapor de agua y el hidrógeno. Aunque la tecnología se ha utilizado durante varios años para el upgrading del biogás, los desarrollos de membranas más selectivas y diseños de procesos con mayores tasas de recuperación de metano durante los últimos años han aumentado el interés en las membranas y han convertido a la tecnología en una alternativa viable a las otras tecnologías. Las ventajas que suele presentar la tecnología de membranas son la falta de demanda de agua o productos químicos y la capacidad de reducir el proceso sin grandes pérdidas de eficiencia.

Es la tecnología más empleada en upgrading de biogás. Las membranas funcionan como un filtro y tienen un periodo de vida útil bastante corto. Suelen reemplazarse en periodos de tiempo de 5 a 10 años. Son membranas semi-permeables de materiales poliméricos como acetato de celulosa (aunque también las hay cerámicas) en las que el CH_4 no atraviesa la membrana y el CO_2 sí. Hay que eliminar previamente el H_2S , H_2O y siloxanos porque se quedan en las membranas y generan muchos problemas. Las membranas para tener una eliminación alta necesitan varios módulos de membrana en serie o en paralelo [3].

El upgrading de biogás de separación por membranas proporciona biometano con porcentajes de CH_4 de 96 a 98%, o incluso superiores.

En la Figura 5, se muestra una imagen del proceso de upgrading de biogás de separación por membranas:

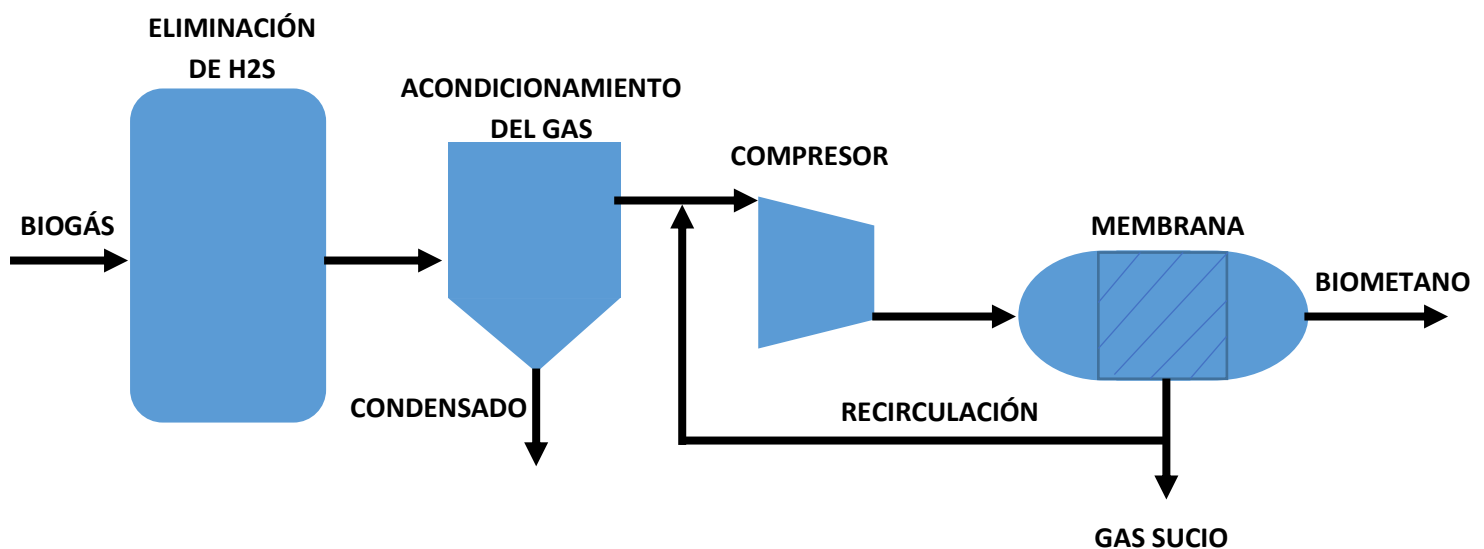


Figura 5. Esquema del proceso de upgrading de separación por membranas.

Primero, se limpia el biogás de contaminantes importantes, como agua y sulfuro de hidrógeno, antes de comprimirlo a 5-20 bar y alimentarlo a la unidad de membrana. En la propia membrana, el dióxido de carbono se separa de la corriente de gas principal a medida que atraviesa la pared de la membrana.

Hoy en día existen diferentes diseños de procesos para unidades de separación de gases por membrana, dependiendo del fabricante del sistema y de las membranas utilizadas, utilizando membranas individuales o varias membranas en una configuración en cascada con recirculación. La opción de diseño más simple incluye la ausencia de circulación interna del gas y, por lo tanto, un menor consumo de energía para la compresión. La pérdida de metano puede ser bastante alta cuando se utiliza una sola membrana. La segunda opción de diseño aumenta la recuperación de metano mediante el uso de membranas dobles. El permeado de la primera membrana se retira del sistema mientras que el permeado de la segunda membrana se recircula de regreso al compresor para minimizar las pérdidas de metano en el off-gas. En un tercer diseño posible, el retenido de la primera etapa se pule en la segunda etapa de membrana para obtener un gas producto de mayor calidad. Además, el permeado de la primera etapa se pule en una tercera etapa de membrana para minimizar el contenido de metano en los gases de escape. La corriente de permeado de la segunda etapa y el retenido de la tercera etapa se mezclan luego y se reciclan al compresor. A medida que se desarrolló la tecnología de actualización de membranas, las opciones de diseño más avanzadas se volvieron más aceptadas. Hoy en día, la segunda y tercera opciones de diseño son las que más suelen ofrecer los fabricantes.

2.5. Selección de tecnología

Dentro de las tecnologías que se han descrito anteriormente y que son consideradas como las tecnologías más maduras y eficientes del mercado, se han estudiado los costes de operación mantenimiento, inversión, tasas de recuperación, etc. para cada una de ellas.

En la Tabla 1 se muestran diferentes características de las tecnologías de upgrading de biogás evaluadas:

Tabla 1. Evaluación de características de las distintas tecnologías de upgrading de biogás [3].

Tecnología	Lavado con agua	Lavado con aminas	PSA	Membrana
Recuperación de metano, %	98.0	99,96	98.0	99,5
Pérdidas de metano, %	< 2	< 0,5	< 3	< 5
Demanda de energía, kWh/Nm ³	0,2 – 0,5	0,05 – 0,18	0,16 – 0,43	0,18 – 0,35
Nivel de temperatura, °C	-	120–160	-	-
Requisitos de desulfuración	depende	Sí	Sí	Sí
Demanda de consumibles	Agente antiincrustante, agente secante.	Solución de amina	Carbón activado	-
Número de plantas de referencia	Alto	Medio	Alto	Bajo
Costes típicos de inversión				
Por 100 m ³ h ⁻¹ biometano	10.100	9.500	10.400	7.600
Para 250 m ³ h ⁻¹ biometano	5.500	5.000	5.400	4.900
Por 500 m ³ h ⁻¹ biometano	3.500	3.500	3.700	3.700
Costes operativos típicos [€/ (m ³ h ⁻¹) biometano]				
Por 100 m ³ h ⁻¹ biometano	14,0	14,4	12,8	12,5
Para 250 m ³ h ⁻¹ biometano	10,3	12,0	10,1	8,6
Por 500 m ³ h ⁻¹ biometano	9,1	11,2	9,2	7,5

Si se observa la Tabla 1, en cuanto, a la recuperación de metano, la tecnología de membranas junto con la de lavado con aminas muestran las mayores tasas de recuperación (99,5 y 99,6 % respectivamente). Por otro lado, si se analiza la demanda de energía en kWh por Nm³, la menor demanda la muestran la tecnología de lavado con aminas (0,05 – 0,18 kWh/ Nm³) y la tecnología de membranas (0,18 - 0,35 kWh/Nm³). En cuanto a la demanda de consumibles, todas las tecnologías requieren alguno, excepto la tecnología de membranas.

Como se ha podido ver, las dos tecnologías más favorables son la tecnología de lavado con aminas y la tecnología de separación por membranas, sin analizar los costes de inversión y de operación.

A continuación, se van a analizar los costes de inversión para caudales desde 0 a 2000 Nm³/h y más adelante desde 0 a 500 Nm³/h.

Como se ve en la Figura 6, para caudales iguales o inferiores a 500 Nm³/h, la depuración con aminas tiene un coste de inversión ligeramente superior y la tecnología de membrana tiene un coste de inversión ligeramente menor. Los costes de inversión empiezan a disminuir a medida que aumentan los caudales a tratar. Además, desde el punto de vista de la inversión, entre las tecnologías PSA y las de depuración física y química (lavado con agua y lavado con aminas, respectivamente) los costes de inversión apenas existen diferencias.

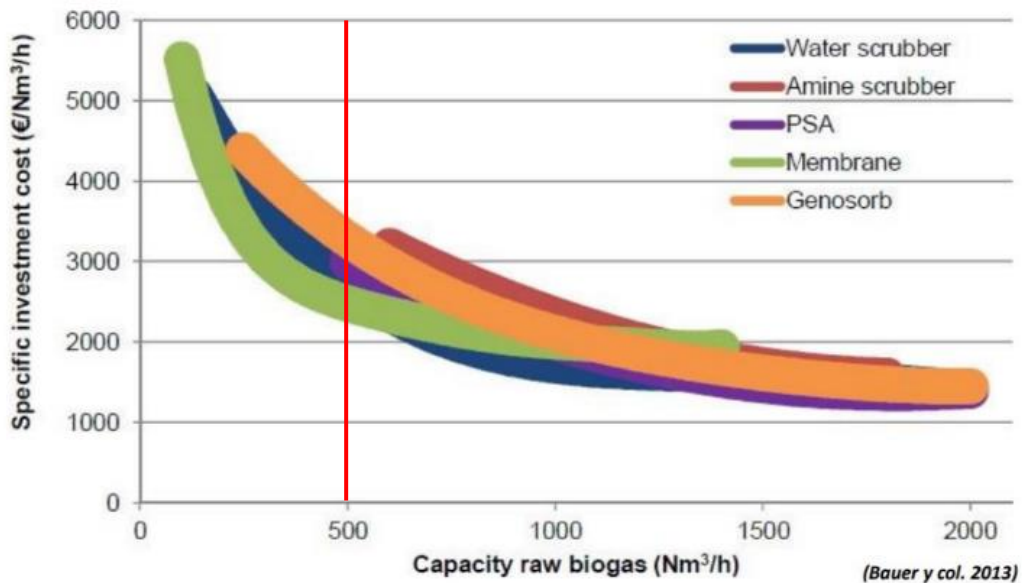


Figura 6. Costes de inversión específicos en función del caudal de biogás a tratar [4].

Según la Figura 6, se pueden extraer los costes de inversión para cada una de las tecnologías de upgrading estudiadas para caudales de 500 Nm³/h:

- Lavado con agua: 3.000 €/Nm³/h
- Lavado con aminas: 3.500 €/Nm³/h
- Adsorción PSA: 3.000 €/Nm³/h
- Separación por membranas: 2.500 €/Nm³/h

En la Figura 7, se representan los costes de inversión para el tratamiento de pequeños caudales de biogás y en la Figura 8, los costes de operación para pequeños caudales de biogás, que han sido representados a partir de los datos de la Tabla 1:

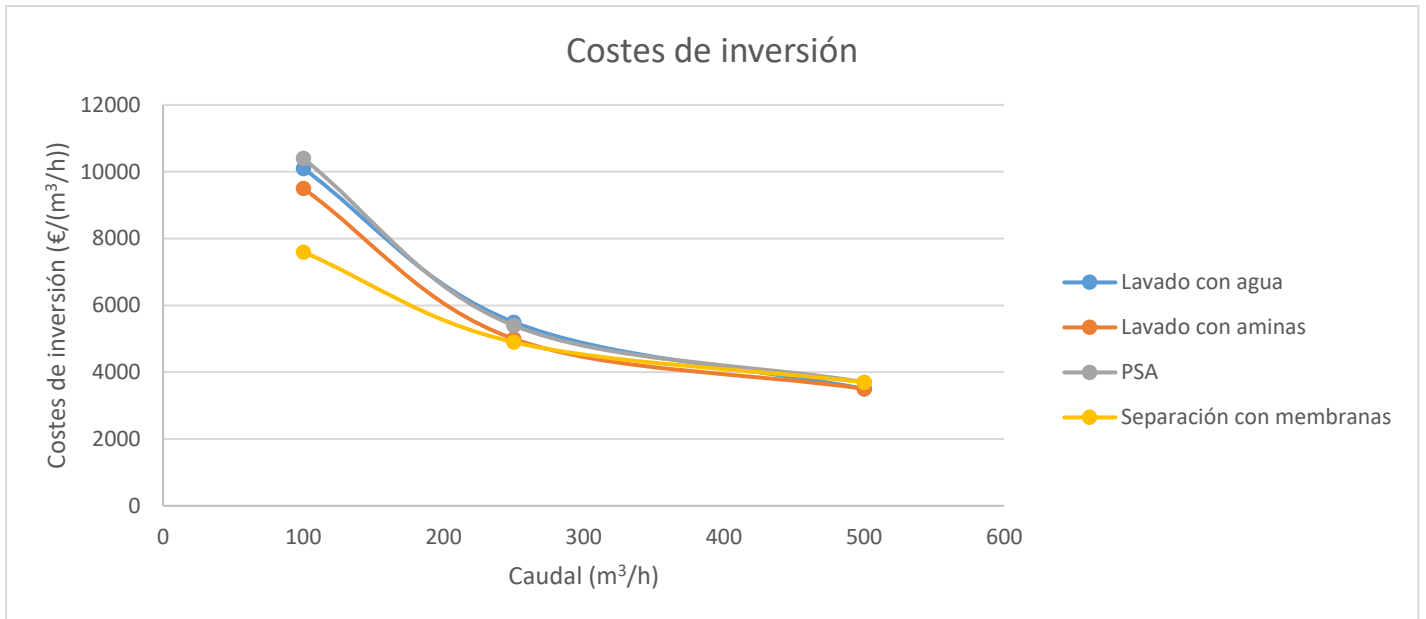


Figura 7. Costes de inversión para pequeños caudales de biogás a tratar.

Si se analizan pequeños caudales de biogás (100 m³/h), se observa en la Figura 7, que la diferencia en cuanto a costes de inversión todavía es mayor entre la tecnología de lavado con aminas y la tecnología de separación por membranas, siendo 9.500 €/m³/h para el lavado con aminas y de 7.500 €/m³/h para la separación con membranas, aproximadamente.

Si se analizan los costes de operación para pequeños caudales de biogás, se observa en la Figura 8, que los costes más bajos se presentan en la tecnología de upgrading de biogás de separación por membranas situándose entre 7,5 y 12,4 €/m³/h y los costes más altos en el lavado con aminas.

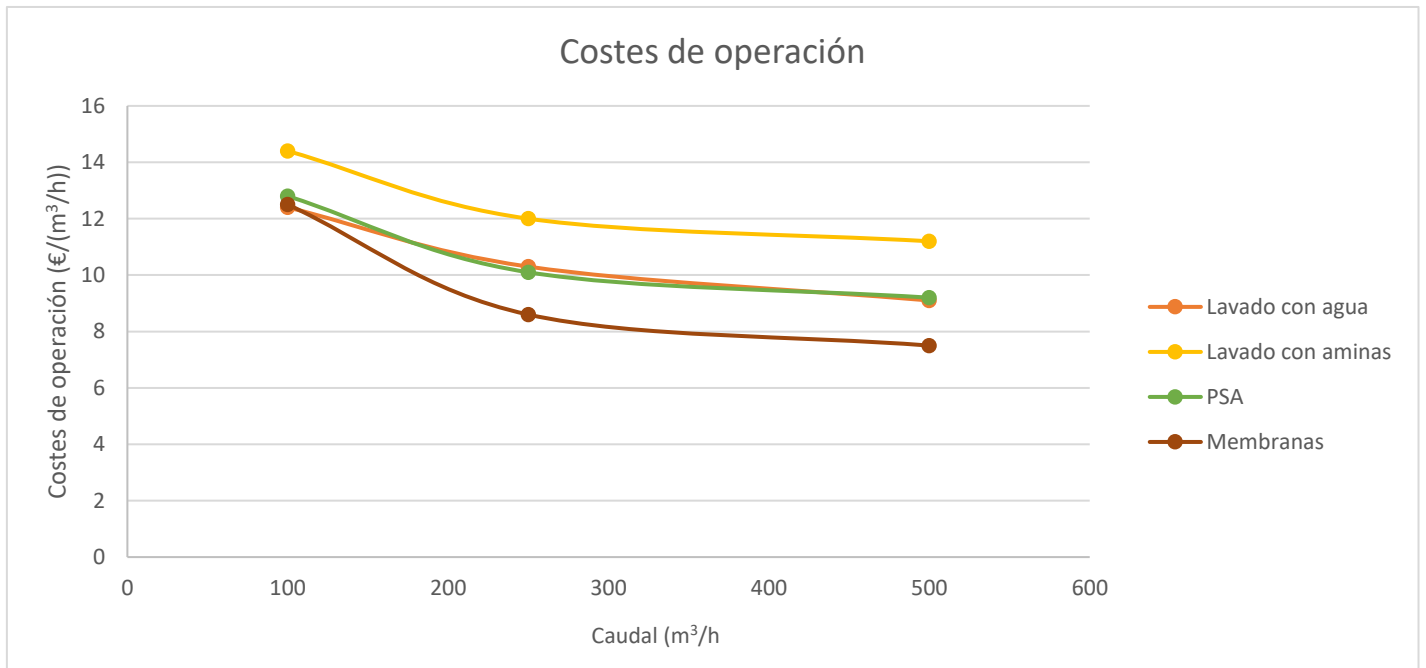


Figura 8. Costes de operación para pequeños caudales de biogás a tratar.

Con todo lo mencionado, se selecciona la tecnología de upgrading de biogás de separación por membranas como la tecnología más factible para el tratamiento de pequeños caudales de biogás, teniendo en cuenta que presenta la mejor relación entre costes de inversión y de operación, buen porcentaje de separación de CH_4 y CO_2 , no demanda ningún producto químico, es respetuosa con el medioambiente, es una tecnología bien conocida, etc.

En cuanto a la tecnología de separación por membranas, el coste de inversión de los módulos de membranas oscila entre 7.600 y 3.700 €/m³ /h para capacidades de 100 a 500 m³/h, respectivamente y el coste de operación oscila entre 12,5 y 7,5 €/m³ /h). En la mayoría de los casos, los costes operativos implican el reemplazo de membranas, que generalmente tienen una vida útil de 5 a 10 años, el coste de presurizar el biogás antes de la separación de la membrana, que depende de la fuente de biogás y consume energía en el rango de 0,18 a 0,35 kWh /Nm³, y el coste del pretratamiento del biogás. Además, la demanda energética es baja ya que el proceso no requiere calentamiento. Es importante destacar que la tecnología de membranas tampoco consume productos químicos durante el funcionamiento, lo que es más segura y respetuosa con el medioambiente ya que no emite gases nocivos. Aunque los costes de inversión siguen siendo bastante elevados, el coste de mantenimiento es aceptable durante un largo período de funcionamiento.

Sin embargo, existen desafíos que abordar, como garantizar la estabilidad del proceso durante períodos prolongados y gestionar la concentración de CH_4 y su degradación por componentes

del biogás como NH_3 y H_2S y el agua. Son necesarias medidas de limpieza previa para proteger la membrana. Mientras tanto, el uso de un proceso de membrana de varias etapas puede eliminar eficazmente el gas ácido y el vapor de agua del biogás crudo, produciendo CH_4 con una alta concentración (>98 %) a un bajo coste operativo. Además, hay unidades de membrana disponibles para la mejora de biogás a pequeña escala con capacidades de procesamiento bajas.

3. UPGRADING DE BIOGÁS MEDIANTE SEPARACIÓN POR MEMBRANAS

La tecnología de membranas ha dominado recientemente el upgrading del biogás debido al coste cada vez menor de la membrana polimérica. En los últimos 40 años, las tecnologías han evolucionado y desarrollado como una solución económica y sostenible con excelente eficiencia para la separación de gases. Además, hoy en día, se establece como la tecnología más factible para el tratamiento de pequeños caudales de biogás.

La tecnología de membranas puede verse como una barrera semipermeable entre dos fases. Emplea una membrana densa para la separación de gases como barrera selectiva entre las corrientes de gas de alimentación y permeado. El mecanismo de separación comienza inicialmente con la difusión de moléculas de gas desde el lado de alimentación, luego se difunden selectivamente a través de la matriz de la membrana como corriente de permeado. El gas restante fluye hacia el otro extremo del módulo para convertirse en la corriente retenida.

El material de la membrana suele estar formado por una combinación de varias capas, cada una de las cuales tiene funciones importantes para facilitar la separación de gases. Hay capas porosas, selectivas y protectoras.

El proceso de upgrading de biogás de separación por membranas tiene una serie de ventajas, siendo las de mayor relevancia su bajo coste de inversión y la alta pureza de metano que consigue. Otras ventajas son las siguientes: no utiliza sustancias nocivas, es un proceso seco, diseño y proceso simple, instalación y puesta en marcha rápida, etc. Como desventajas requiere un postratamiento de gases residuales, un pretratamiento previo, demanda de energía y es inestable a largo plazo.

Todas las membranas que pueden separar dióxido de carbono del metano podrían utilizarse para mejorar el biogás, pero para lograr una operación efectiva, la membrana aplicada debe tener algunas características que se detallan a continuación:

- Altamente selectiva para los componentes deseados
- Estable a altas presiones de funcionamiento (hasta 200 bar)
- Activo en presencia de diversos contaminantes y en diferentes niveles.
- Funciona en el rango sensible de temperatura.
- Capacidad para ser procesado en módulos y sistemas de ingeniería a gran escala.

Aunque se han dedicado esfuerzos significativos para mejorar las propiedades del material de la membrana, existen desafíos persistentes en el equilibrio entre permeabilidad y selectividad en el rendimiento de separación de la membrana. Entre ellos se encuentran la presencia de contaminantes que requieren pretratamiento, provocando polarización por concentración,

envejecimiento físico, plastificación y compactación de membranas a alta presión. Estos desafíos conducen a una alta inversión en unidades de soporte y altos costes operativos de mantenimiento. Por lo tanto, se han desarrollado materiales de membrana robustos para superar esos desafíos y producir materiales que no solo logren un equilibrio óptimo entre permeabilidad y selectividad, sino también resistentes a los contaminantes presentes en el biogás. Existen varios tipos de membranas para la mejora de biogás, como membrana polimérica, membrana inorgánica, membrana de matriz mixta (MMM), membrana compuesta de matriz mixta (MMCM), membrana compuesta de película delgada (TFC) y membrana nanocompuesta de película delgada (TFN) [3].

En términos de fabricación de membranas, se pueden dividir en membranas sintéticas y biológicas. Las membranas sintéticas se pueden clasificar además en materiales inorgánicos y orgánicos. Las membranas inorgánicas incluyen membranas cerámicas, metálicas y de vidrio. Las membranas orgánicas están formadas por polímeros y macromoléculas. Además, las membranas también se pueden clasificar según su mecanismo de separación. Las membranas densas funcionan mediante mecanismos de difusión de solución o de transporte facilitado. Las membranas porosas, por otro lado, pueden utilizar tamizado molecular o flujo superficial selectivo. Además, las membranas se pueden clasificar según su estructura. Las membranas simétricas tienen una estructura uniforme en todas partes. Las membranas asimétricas tienen una estructura en capas, que se puede dividir en membranas asimétricas integrales y membranas compuestas. Finalmente, las membranas se pueden clasificar según su configuración. Las membranas tubulares tienen forma de cilindro, mientras que las membranas de fibra hueca tienen una estructura tubular con un núcleo hueco. Las membranas de lámina plana tienen una estructura plana. En general, las membranas ofrecen una gama versátil de clasificaciones basadas en su fabricación, mecanismo, estructura y configuración, lo que permite su aplicación en diversos procesos de separación [3].

3.1. Tipos de membranas

Dentro de las tecnologías de upgrading de biogás mediante separación de CO₂ y CH₄ por membranas existen diferentes tipos de membranas en función del material con el que se fabrica la membrana:

- Membranas poliméricas: se fabrican a partir de materiales orgánicos como el acetato de celulosa (CA), La polisulfona (PSU), la poliimida (PI), el polidimetilsiloxano (PDMS) o el policarbonato (PC). Estos materiales presentan una fuerte selectividad para la separación CH₄/CO₂, ya que son altamente permeables a los gases CO₂, H₂O y NH₃, pero menos permeables a O₂ y H₂S, y casi no permeables a CH₄ y N₂. Son de bajo coste, síntesis

simple, buena estabilidad mecánica y fácil de escalar. En consecuencia, la corriente de permeado consiste principalmente en CO_2 , H_2O , NH_3 y otros gases residuales, que pueden pasar a través de los microporos de la membrana, mientras que la corriente de retentado, al ser rica en CH_4 , pasa a través del módulo de membrana, sin ser realmente eliminado o separado. Sin embargo, presentan una baja estabilidad química y térmica y sufren de baja selectividad y plastificación. Son las más utilizadas comercialmente,

- Membranas inorgánicas: constan de metales, óxidos o carbono elemental en su estructura. Las membranas inorgánicas consisten con mayor frecuencia en materiales, como zeolita, carbón activado, sílice y nanotubos de carbono (CN). Ofrecen beneficios más específicos, como una mayor resistencia mecánica y una mayor estabilidad térmica y química. Hoy en día, la aplicación de membranas inorgánicas también es bastante limitada, debido a su mayor costo de fabricación en comparación con las membranas poliméricas.
- Membrana de matriz mixta: es una solución alternativa para mejorar el rendimiento de la membrana de separación de gases aprovechando tanto las membranas poliméricas como las inorgánicas. La construcción de tales membranas tiene como objetivo combinar las ventajas de los materiales poliméricos e inorgánicos y superar las limitaciones que presenta cada fase individual. Por lo tanto, se espera una mejora significativa en el campo industrial de la mejora del biogás, cuando las membranas de la matriz mixta estén listas para ser aplicadas a mayor escala.

Se deben abordar varios aspectos al seleccionar una membrana adecuada para la mejora de biogás, incluida la composición, permeabilidad y selectividad del biogás, las condiciones de operación, la escala y el costo, el material de la membrana, la resistencia a los contaminantes y el diseño de la membrana.

En primer lugar, es necesario examinar la composición del biogás. Es importante prestar especial atención a las concentraciones de CH_4 , CO_2 , trazas de contaminantes como H_2S o siloxanos y cualquier posible impureza. La membrana debe ser capaz de separar adecuadamente estos componentes. Luego, evaluar la permeabilidad de la membrana para permitir el paso de gases específicos y su selectividad para eliminar el gas objetivo de la mezcla. Para maximizar el contenido de CH_4 del biogás sometido al proceso de upgrading, a menudo se desea una mayor selectividad por el CH_4 sobre el CO_2 . A continuación, es preciso considerar las condiciones de funcionamiento, como la temperatura y la presión, bajo las cuales funcionará la membrana. Algunas membranas funcionan mejor en rangos específicos de temperatura o presión.

Debido a su compatibilidad con el biogás, a menudo se utilizan membranas poliméricas como membranas basadas en poliimida o poliéter. Las membranas inorgánicas, como las membranas cerámicas o metálicas, también pueden ser apropiadas para determinadas aplicaciones. Además, es necesario determinar la resistencia de la membrana, como la humedad, las partículas y las impurezas como el H₂S. Para evitar la contaminación o degradación causada por estos contaminantes, se requiere una membrana duradera y estable. Además, es necesario evaluar la mejor configuración de membrana para la aplicación de mejora de biogás. Las membranas de fibra hueca, las membranas de lámina plana y las membranas enrolladas en espiral son opciones comunes. La decisión está influenciada por consideraciones como el diseño del sistema, la superficie requerida y la facilidad de operación y mantenimiento.

Por otro lado también es necesario analizar la escalabilidad y rentabilidad de la tecnología de membranas. Se considera el tamaño del módulo de membrana, los requisitos de instalación, los costes operativos y la vida útil. También el uso de energía y los requisitos de mantenimiento para determinar la rentabilidad total de la membrana elegida. Al considerar cuidadosamente estos criterios, es factible elegir una membrana adecuada para la mejora del biogás que maximice la eficiencia de separación, aumente el contenido de metano y satisfaga las necesidades únicas de la composición del biogás y las condiciones de operación [9].

4. UPGRADING DE BIOGÁS Y LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030.

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, es un plan de acción a favor de las personas, el planeta y la prosperidad, que también tiene la intención de fortalecer la paz universal y el acceso a la justicia. La Agenda 2030 contempla 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) [8]:

- 1) Fin de la pobreza
- 2) Hambre cero
- 3) Salud y bienestar
- 4) Educación de calidad
- 5) Igualdad de género
- 6) Agua limpia y saneamiento
- 7) Energía asequible y no contaminante
- 8) Trabajo decente y crecimiento económico
- 9) Industria, innovación e infraestructura
- 10) Reducción de las desigualdades
- 11) Ciudades y comunidades sostenibles
- 12) Producción y consumo responsables
- 13) Acción por el clima
- 14) Vida submarina
- 15) Vida de ecosistemas terrestres
- 16) Paz, justicia e instituciones sólidas
- 17) Alianza para lograr los objetivos.

Si se evalúa la repercusión que tiene la tecnología de upgrading de biogás a través de la tecnología de membranas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, es necesario considerar los siguientes puntos clave:

- ODS 7: Energía asequible y no contaminante: el upgrading de biogás a biometano contribuye al aumento de la producción de energía renovable y, como consecuencia, a la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles, ya que el biometano es un gas renovable que puede ser inyectado en la red de gas natural.
- ODS 13: Acción por el Clima: la producción de biometano y su uso en diferentes aplicaciones (como la sustitución de combustibles fósiles) conlleva la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEIs), ya que la utilización del biometano supone que no se libere metano (CH_4) a la atmósfera, suponiendo un impacto positivo en el cambio climático ya que es un gas con elevado potencial de calentamiento global. Por otro lado, como se ha comentado en apartados anteriores, la tecnología de

upgrading de biogás mediante separación de CO₂ y CH₄ por membranas, es la mejor alternativa para tratamiento de pequeños caudales de biogás. En España existen varias regiones donde la generación de residuos agropecuarios es muy dispersa y se puede dar la situación de tener que transportarlos a largas distancias para codigerirlos y posteriormente tratarlos con una tecnología de upgrading adecuada. Eso supondría un excesivo consumo de combustible y consecuentemente, elevadas emisiones de GEIs. Por ello, encontrar alternativas viables, como es el caso del upgrading de biogás a través de la tecnología de membranas supondría un impacto positivo en el medioambiente, ya que evitaría el transporte de residuos a largas distancias y al mismo tiempo generaría la producción de energía renovable.

- ODS 12: Producción y Consumo Responsables: dentro de este Objetivo de Desarrollo Sostenible, el biogás tiene un impacto positivo en el sentido de que es un gas que se produce a partir de residuos orgánicos. De esta forma, se estaría promoviendo una gestión de residuos más sostenible y reduciendo la cantidad de residuos que terminan en vertederos. Por otro lado, la producción de biogás fomenta la economía circular, donde los residuos se utilizan para producir energía.
- ODS 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico: la apuesta por el biogás y el biometano también tiene impacto positivo en la creación de empleo, ya que la puesta en marcha de plantas de biogás, así como, su mantenimiento, generan empleabilidad. Además, las plantas de biogás y biometano permiten el desarrollo rural, ya que en las zonas rurales se generan muchos de los residuos empleados en la producción de biogás. Esto también supondría el crecimiento de las zonas despobladas donde se proporcionarían oportunidades de crecimiento económico.
- ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura: la adopción de tecnologías de upgrading de biogás avanzadas fomenta la innovación y el desarrollo tecnológico en el sector energético. Por otro lado, la incorporación de biometano en la red de gas natural mejora la infraestructura energética y aumenta la resiliencia del suministro energético.
- ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles: como se ha comentado anteriormente, una de las aplicaciones del biometano es su uso como combustible de vehículos. Esta aplicación del biometano contribuiría a la reducción de la contaminación del aire en las ciudades. Asimismo, la transformación de residuos sólidos urbanos, RSU, (uno de los principales sustratos para la generación de biogás), permitiría una gestión más sostenible de los residuos en las ciudades.

La tecnología de upgrading de biogás tiene un impacto significativo y positivo en distintos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), al promover la sostenibilidad ambiental, económica y social. Al tratar pequeñas cantidades de biogás, se puede aprovechar mejor los recursos disponibles, reducir los desechos y contribuir a una transición energética más limpia y justa. La implementación de estas tecnologías no solo contribuye a la consecución de los objetivos establecidos en la Agenda 2030, sino que también fomenta un desarrollo más sostenible y resiliente tanto a nivel global como local.

5. CONCLUSIONES

El biometano obtenido a través del upgrading del biogás es el potencial de la energía renovable en el futuro.

Las tecnologías de upgrading de separación por membranas y el lavado con aminas destacan por sus altas tasas de recuperación de metano (99.5% y 99.6%, respectivamente). Además, ambas tecnologías presentan una baja demanda energética, con la tecnología de membranas requiriendo entre 0.18 y 0.35 kWh/Nm³, y el lavado con aminas entre 0.05 y 0.18 kWh/Nm³.

Sin embargo, para el tratamiento de pequeños caudales pequeños de biogás (0-500 Nm³/h), la tecnología de membranas muestra un coste de inversión menor en comparación con el lavado con aminas, situándose aproximadamente en 7,500 €/m³/h frente a los 9,500 €/m³/h del lavado con aminas. Los costes operativos para la tecnología de membranas también son inferiores en comparación con el lavado con aminas, variando entre 7.5 y 12.4 €/m³/h. Por ello, la tecnología de membranas es la más adecuada para el tratamiento de pequeños caudales de biogás ya que presenta los menores gastos de inversión (CAPEX) y menores gastos de operación (OPEX)

Por otro lado, la tecnología de membranas no requiere consumibles, lo que simplifica el mantenimiento y reduce los costes operativos a largo plazo. Además, esta tecnología no utiliza productos químicos, haciendo su operación más segura y respetuosa con el medio ambiente.

La tecnología de upgrading de biogás mediante membranas emerge como una solución altamente efectiva y sostenible en el contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, ya que tiene impacto positivo en distintos ODS. Este enfoque no solo facilita la producción de biometano de alta pureza, sino que también aborda varios desafíos ambientales y económicos.

A pesar de sus numerosas ventajas, la tecnología de membranas enfrenta desafíos como la estabilidad del proceso a largo plazo y la gestión de contaminantes como NH₃ y H₂S. Es crucial implementar medidas de pretratamiento y continuar desarrollando materiales de membrana más robustos y eficientes. La evolución de esta tecnología, junto con su adaptación a las condiciones operativas y económicas locales, será esencial para maximizar su impacto positivo en el desarrollo sostenible.

La tecnología de upgrading de biogás mediante membranas representa una solución avanzada y viable para el tratamiento de biogás, ofreciendo ventajas significativas en términos de eficiencia, coste y sostenibilidad ambiental. Su capacidad para contribuir a múltiples ODS la posiciona como una herramienta clave en la transición hacia un desarrollo más sostenible y

resiliente, alineándose perfectamente con los objetivos de la Agenda 2030. La inversión en esta tecnología no solo impulsará el progreso hacia una energía más limpia y accesible, sino que también promoverá un crecimiento económico inclusivo y una gestión más sostenible de los recursos naturales.

Finalmente, la tecnología de upgrading de biogás mediante separación por membranas es la más adecuada para tratar pequeños caudales de biogás. Esta tecnología presenta los costes de inversión y operación más bajos entre las opciones estudiadas y, además, cuenta con un funcionamiento simple y un sistema fácil de operar, siendo también respetuosa con el medioambiente. Aunque, al igual que otras tecnologías, tiene sus limitaciones, todos los desafíos en el upgrading de biogás de separación por membranas pueden minimizarse durante la fabricación de la membrana y durante toda la operación de separación del gas

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ji-Qin Ni. A review of household and industrial anaerobic digestion in Asia: Biogas development and safety incidents. Renewable and Sustainable Energy Reviews. June 2024. Volume 197. 114371
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032124000947>
- [2] EBA Statistical Report. 2023
- [3] Nur Fajrina, Norhaniza Yusof, Ahmad Fauzi Ismail, Farhana Aziz, Muhammad Roil Bilad, Meshel Alkahtani. A crucial review on the challenges and recent gas membrane development for biogas upgrading. Journal of Environmental Chemical Engineering. June 2023. Volume 11, Issue 3, 110235.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343723009740>
- [4] Fredric Bauer, Tobias Persson, Christian Hulteberg, Daniel Tamm. (2013). Biogas upgrading – technology overview, comparison and perspectives for the future. Biofuel, bioproducts and biorefining. July 2013. Volume 7, number 5, Pages 499-511.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/bbb.1423>
- [5] Petros Gkotsis, Panagiotis Kougias, Manassis Mitrakasc, Anastasios Zouboulis. Biogas upgrading technologies – Recent advances in membrane-based processes. International Journal of Hydrogen Energy. February 2023. Volume 48, Issue 10, Pages 3965-3993
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922050418>
- [6] Raúl Muñoz, Leslie Meier, Israel Díaz, David Jeison. A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. September (2015). Volume 14, pages 727-759.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11157-015-9379-1>
- [7] Anneli Pettersson, Arthur Wellinger. Biogas upgrading technologies – developments and innovations. IEA Bioenergy.
https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2009/10/upgrading_rz_low_final.pdf
- [8] Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030
https://www.mdsocialesa2030.gob.es/agenda2030/conoce_la_agenda.htm
- [9] Atefeh Roozitalab, Fatemeh Hamidavi, Ali Kargari. A review of membrane material for biogas and natural gas upgrading. Gas Science and Engineering. June 2023. Volume 114, 204969
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949908923000973>