



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Máster en Ingeniería Química

**ESTUDIO DE LA VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE LA
TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS PARA EL ENRIQUECIMIENTO
DE BIOGÁS PROCEDENTE DE LA DIGESTIÓN DE FANGOS DE
DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES**



Memoria y Anexos

Autor: Adriana Lucía Romero Lestido
Director: José Luis Cortina Pallas
Convocatoria: Enero 2018

Resumen

En este documento se recogen los resultados y conclusiones sobre el estudio técnico y económico de la tecnología de membranas para el enriquecimiento del biogás producido en estaciones depuradoras. El estudio técnico ha permitido identificar la tecnología de membranas como un proceso válido para producir biometano con calidad suficiente para su inyección a red. El estudio económico ha revelado que la utilización del biometano para su inyección a red o para su uso como biocombustible resulta rentable a partir de ciertas capacidades de planta y dependiendo de la aplicación. Se incluye también una revisión del marco legislativo del biogás y biometano tanto a nivel estatal como europeo así como una recopilación de los factores e impactos ambientales asociados a la tecnología. A partir de los resultados obtenidos se han identificado los puntos fuertes de la tecnología de membranas y las oportunidades de mejora. Este estudio se complementará con la validación de un sistema de membranas a escala piloto; las tareas previas para la puesta a punto de este piloto aparecen detalladas en este documento.

Abstract

The present document contains the results and conclusions about the technical and economic study of membrane technology for the enrichment of biogas produced in sewage treatment plants. The technical study has made it possible to identify membrane technology as a valid process to produce biomethane with sufficient quality for its injection into the gas grid. The economic study has revealed that the use of biomethane for its injection into the grid or for its use as a biofuel is profitable from certain plant capacities and depending on the application. It also includes a review of the legislative framework of biogas and biomethane both at Spain and European level as well as a compilation of the environmental factors and impacts associated with the technology. Based on the results obtained it was possible to know the strengths of membrane technology and opportunities for improvement have been identified. This study will be complemented with the validation of a membrane system at pilot scale; the previous tasks for the development of this pilot are detailed in this document.

Agradecimientos

A José Luis Cortina y a Josep Manzano, por la oportunidad que me han dado de poder trabajar en Cetaqua y realizar el TFM dentro del Proyecto COSIN.

A José Luis Cortina, Josep Manzano y Núria Basset, por la paciencia ante tantas preguntas y su predisposición a contestarlas.

A Montserrat Termes, por resolver todas mis dudas sobre la parte económica del TFM.

A Andrea, por ser mi apoyo incansable.

Glosario

ACA	Agencia Catalana de Aguas
ATD	Dispositivo anti telescópico
BMC	Biometano Comprimido
BML	Biometano Licuado
BOE	Boletín Oficial del Estado
BT(E)X	Benceno, tolueno, (etilbenceno), xileno
CAPEX	Costes de Capital
CCS	Captura y Secuestro de Carbono
COSIN	Combustibles sintéticos
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
D	Densidad relativa
DA	Digestión Anaerobia
D_i	Coefficiente de difusión del componente i
DEA	Dietilamina
EBA	Asociación Europea de Biogás (siglas en inglés)
EDAR	Estación Depuradora de Aguas Residuales
EEUU	Estados Unidos
EPI	Equipo de Protección Individual
FORSU	Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Orgánicos
GC	Cromatografía de gases (<i>Gas chromatography</i>)
GEI	Gases de Efecto Invernadero

HC Hidrocarburos

HCBM Hidrógeno y Biometano Comprimido

J_i Flujo del componente i a través de la membrana por unidad de tiempo y área

K_i^G Coeficiente de adsorción del componente i

TR Informe Técnico (*Technical Report*)

l Espesor de la membrana

MDEA MonodietilAmina

MEA Monoetilamina

MF Microfiltración

MMM Materiales de Matriz Mixta

n_{iP} Fracción másica de i en el permeado

n_{iR} Fracción másica de i en el rechazo

OPEX Costes de Operación

PI Propiedad Industrial / Intelectual

p_{i0} Presión parcial del componente en el rechazo

p_{i_l} Presión parcial del componente en el permeado

P_i^G Permeabilidad del gas de componente i

PIM Polímeros térmicamente reordenados

p_R Presión parcial en el rechazo

p_P Presión parcial en el permeado

PAH Hidrocarburos poliaromáticos (*Poly Aromatic hydrocarbons*)

PCS Poder Calorífico Superior



PSA	Adsorción por oscilación de presión (siglas en inglés)
PV	Pervaporación
RCDE	Régimen de Comercio de Derechos de Emisión
RSH	Mercaptanos
SG	Separación de Gases
TIR	Tasa Interna de Retorno
TFM	Trabajo Fin de Máster
TOC	Compuestos Orgánicos Tóxicos (<i>Toxic Organic Compounds</i>)
TSA	Adsorción con ciclos de temperatura
UAB	Universidad Autónoma de Barcelona
UF	Ultrafiltración
VSA	Adsorción por vacío
VAN	Valor Actual Neto
α_{ij}	Selectividad, permeabilidad del componente i respecto al componente j
φ	Ratio de presión

Índice

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
AGRADECIMIENTOS	III
GLOSARIO	IV
1. PREFACIO	11
1.2. Justificación del trabajo	11
2. INTRODUCCIÓN	12
2.1. Objetivos del trabajo.....	12
2.2. Alcance del trabajo	12
2.3. Metodología de trabajo	13
3. EL BIOGÁS	14
3.1. Características del biogás.....	14
3.2. Origen del biogás	14
3.2.1. Proceso de producción de biogás a partir de la digestión de lodos de depuración de aguas residuales	14
3.3. Usos y aplicaciones del biogás: biometano	16
3.4. Producción de biogás.....	19

3.4.1.	Producción de biometano	21
4.	BIOMETANO Y SECTOR ENERGÉTICO	23
4.1.	Modelo energético europeo	23
4.1.1.	Objetivo 20-20-20	23
4.1.2.	Horizonte 2020.....	23
4.1.3.	Marco regulatorio	24
4.2.	Modelo energético nacional.....	24
4.2.1.	Marco regulatorio	25
4.3.	Limitaciones en la producción y uso del biometano	25
4.3.1.	Limitaciones regulatorias.....	25
4.3.2.	Limitaciones técnico-económicas.....	27
5.	PROCESOS DE ENRIQUECIMIENTO DE BIOGÁS	28
5.1.	Pre-tratamiento del biogás.....	28
5.1.1.	Enfriamiento	28
5.1.2.	Filtros de carbón activo.....	29
5.1.3.	Filtros biológicos	30
5.1.4.	Otros procesos de limpieza.....	30
5.1.5.	Filtros auxiliares para enriquecimiento con membranas.....	31
5.2.	Tecnologías de enriquecimiento de biogás.....	31
5.3.	Selección de la tecnología de membranas.....	35
6.	PROCESOS DE ACONDICIONAMIENTO DEL BIOMETANO	38
7.	ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS	40
7.1.	Aparición y desarrollo de la tecnología de membranas	40
7.1.1.	Membranas para separación de gases	41
7.1.2.	Fabricantes de membranas para separación de gases	43
7.2.	Membranas poliméricas	44
7.2.1.	Modelo solución-difusión	48
7.2.2.	El límite superior de Robeson	51
7.3.	Nuevos materiales de membranas	52
7.4.	Patrones de flujo.....	53
7.5.	Módulos de membranas	55
7.5.1.	Módulos en espiral.....	56
7.5.2.	Módulos de fibra hueca	59
7.5.3.	Selección del módulo	61

7.6.	Factores de diseño	62
7.7.	Configuración de los sistemas de membranas.....	64
7.8.	Fabricantes de sistemas industriales de membranas	68
8.	PILOTO DE MEMBRANAS	72
8.1.	Descripción del piloto	72
8.2.	Fase de instalación	73
8.2.1.	Definición del plan experimental	74
9.	ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL	76
9.1.	Descripción general.....	76
9.2.	Descripción del entorno.....	76
9.3.	Efectos identificados e impactos asociados	76
9.4.	Medidas preventivas y/o correctoras.....	77
10.	ANÁLISIS ECONÓMICO	79
10.1.	Casos de estudio	79
10.2.	Costes	80
10.2.1.	Costes de la planta de pre-tratamiento y enriquecimiento de biogás.....	83
10.2.2.	Costes de la etapa de inyección	85
10.2.3.	Costes de la estación de biometano comprimido	85
10.2.4.	Costes de la estación de biometano licuado	85
10.2.5.	Capacidad de las estaciones de repostaje	85
10.3.	Resultados y análisis de resultados	87
10.3.1.	Costes.....	87
10.3.2.	Parámetros económicos.....	91
	CONCLUSIONES	97
	COSTE ASOCIADO AL TFM	99
	BIBLIOGRAFÍA	101
	ANEXO A	105
	Tabla comparativa entre las normativas española y europea en materia de calidad de biometano y recomendaciones para su medición y monitorización.....	105
	ANEXO B	107
	Cálculos justificativos de los parámetros económicos VAN, TIR y Payback.	107

1. Prefacio

1.2. Justificación del trabajo

Este Trabajo Final de Máster se engloba dentro del proyecto COSIN, Combustibles sintéticos, desarrollado en Cetaqua, Centro Tecnológico del Agua, y cuyo objetivo es la validación a escala semi-industrial de un piloto de enriquecimiento de biogás para la producción de biometano para inyección a red, con una duración total de tres años.

El biometano es una de los combustibles gaseosos renovables contemplados dentro del Programa Horizon 2020 propuesto por la Comisión Europea. Así, la utilización de biometano contribuirá a la reducción del uso de combustibles de origen fósil, a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono y la utilización de energía renovable, todos objetivos europeos energéticos a corto y largo plazo. De la necesidad de desarrollar tecnologías industriales para la producción de biometano nace el proyecto COSIN.

En una primera fase del proyecto, se evaluaron las diferentes tecnologías existentes para producción de biometano a partir de biogás y se seleccionó la tecnología de membranas como la más adecuada. Este trabajo recoge las tareas llevadas a cabo a partir de la selección de la tecnología hasta la puesta en marcha del piloto y la validación de dicha tecnología.

2. Introducción

2.1. Objetivos del trabajo

El objetivo global de este Trabajo Fin de Máster es la evaluación del uso de la tecnología de membranas en el enriquecimiento de biogás procedente de EDAR (Estación Depuradora de aguas Residuales) para la obtención de biometano desde una perspectiva técnica y económica, dentro de los marcos regulatorios vigentes y futuros aplicables a la inyección de biometano a la red de gas natural y a su uso como biocombustible.

Para llevar a cabo esta evaluación se han identificado los siguientes objetivos específicos dentro del presente trabajo:

- Realización de una revisión crítica del estado del arte de las membranas para separación de gases metano y dióxido de carbono.
- Realización de una revisión crítica de la normativa existente en España, aplicable a la inyección del biometano a la red de gas natural y a su uso como biocombustible, en relación con la normativa vigente en otros países de la UE y con los futuros cambios que se pretenden introducir en la misma.
- Definición del Plan experimental a realizar en el piloto en base a la identificación de los parámetros clave del proceso y del rango de interés de los mismos. En estos parámetros se incluyen las características del biogás alimentado y condiciones de operación del sistema y los requisitos mínimos de calidad de biometano y el consumo energético asociado.
- Realización de un análisis económico del proceso de enriquecimiento en el que se incluyen: costes CAPEX y OPEX del piloto y viabilidad económica del proceso a escala industrial en función de la capacidad de producción y del destino del biometano (inyección a red o venta como biocombustible).
- Ejecución de las tareas previas a la puesta en marcha y operación del piloto, correspondientes a la fase de montaje e integración del mismo.

2.2. Alcance del trabajo

Este trabajo se realiza dentro del Proyecto COSIN desarrollado en Cetaqua y dentro del tiempo correspondiente a la realización del Trabajo Fin de Máster, por lo que su alcance está delimitado por las tareas que se lleven a cabo dentro del proyecto.

Un primera parte de este trabajo corresponde a la revisión del estado del arte en todos los aspectos referentes a la tecnología de membranas aplicada a la separación de metano y dióxido de carbono, y también una revisión de la situación actual en lo que respecta al biogás, desde su producción hasta su uso como biocombustible.

La segunda parte de este trabajo está orientada a la fase previa a la validación del piloto de membranas para enriquecimiento de biogás, incluyendo la realización de las diferentes tareas que se han llevado a cabo desde la elaboración del plan experimental hasta la puesta en marcha de la planta piloto.

2.3. Metodología de trabajo

La metodología de trabajo seguida se caracteriza por dos estrategias de trabajo diferentes. Por un lado, se ha realizado de forma cíclica un proceso de búsqueda bibliográfica. Tras organizar las partes en las que se dividiría el TFM, se buscó información sobre los tópicos de interés. Se hizo una selección de aquella información más relevante o de aquellos documentos que la presentaban de una forma más interesante. Una vez asimilada la información, se reorientaba la búsqueda bien para profundizar en algún aspecto concreto bien para continuar con otro tema diferente y el proceso volvía a comenzar.

Paralelamente, se fueron desarrollando las diferentes tareas relacionadas con el piloto y su puesta a punto para ponerlo en marcha cuando llegase el momento. Inicialmente, se identificaron las tareas principales a realizar y se planificó su ejecución. Según avanzaba el proyecto, se iban identificando nuevas necesidades y estas se incorporaban a la planificación inicial.

Estas dos estrategias no se han seguido de forma independiente, sino que se siempre se extraía algo que podía ser útil para realizar otras tareas.

Finalmente, también se ha hecho un esfuerzo por recopilar todo lo hecho en este TFM tanto a nivel de piloto como a nivel de búsqueda bibliográfica, de forma que se consiga una integración de la parte más teórica y la parte práctica y creando así una visión global del trabajo realizado.

La revisión del trabajo hecho es también fundamental para poder identificar errores, corregirlos y aprender de ellos para no volver a cometerlos.

3. El biogás

3.1. Características del biogás

El biogás es un gas compuesto por metano (50 – 75 %) y dióxido de carbono (25 – 50 %) principalmente, que también puede contener otros gases minoritarios (hasta un 5 % en total), como hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, vapor de agua, monóxido de carbono y otros hidrocarburos de cadena corta. Además, también contiene otros contaminantes en cantidades traza, siendo los más problemáticos el ácido sulfhídrico, los compuestos orgánicos volátiles (COV) y los siloxanos.

La composición del biogás es variable, incluyendo la concentración de los contaminantes, por lo que puede ser necesaria su reducción o eliminación para el aprovechamiento del biogás producido. En el caso del biogás procedente de EDAR, los principales factores que afectan a la composición son las características del agua residual tratada, el sistema de digestión y las condiciones de operación (temperatura, tiempo de retención) [1].

El alto contenido en metano proporciona al biogás un elevado poder calorífico, con un poder calorífico superior (PCS) en torno a las 5500 kcal/m³ [2] [3] de media, y un PCS de 6400 kcal/m³ en el caso de biogás de EDAR [2], lo que hace de este una fuente de energía de origen renovable alternativa a las fuentes convencionales de origen fósil.

3.2. Origen del biogás

El biogás es un gas generado como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica biodegradable en ausencia de oxígeno, proceso conocido como digestión anaerobia (DA). Así, el biogás puede tener su origen en vertederos, en residuos agrícolas o agroalimentarios, en la fracción orgánica de residuos sólidos orgánicos (FORSU) y en los lodos de depuradora de aguas residuales (industriales y/o urbanas) [4]. Este trabajo está focalizado en el biogás procedente de lodos de depuradora.

3.2.1. Proceso de producción de biogás a partir de la digestión de lodos de depuración de aguas residuales

En una EDAR, las aguas residuales, de origen urbano y/o industrial, son sometidas a diferentes procesos de limpieza cuyo objetivo es convertir dichas aguas residuales en aguas aptas para su devolución al medio o para su reutilización (agua de proceso, sistemas de riego). Los procesos que

tienen lugar en una estación depuradora para tratar las aguas residuales se estructuran siguiendo las etapas que se explican a continuación y que se pueden ver en el esquema de la figura 1.

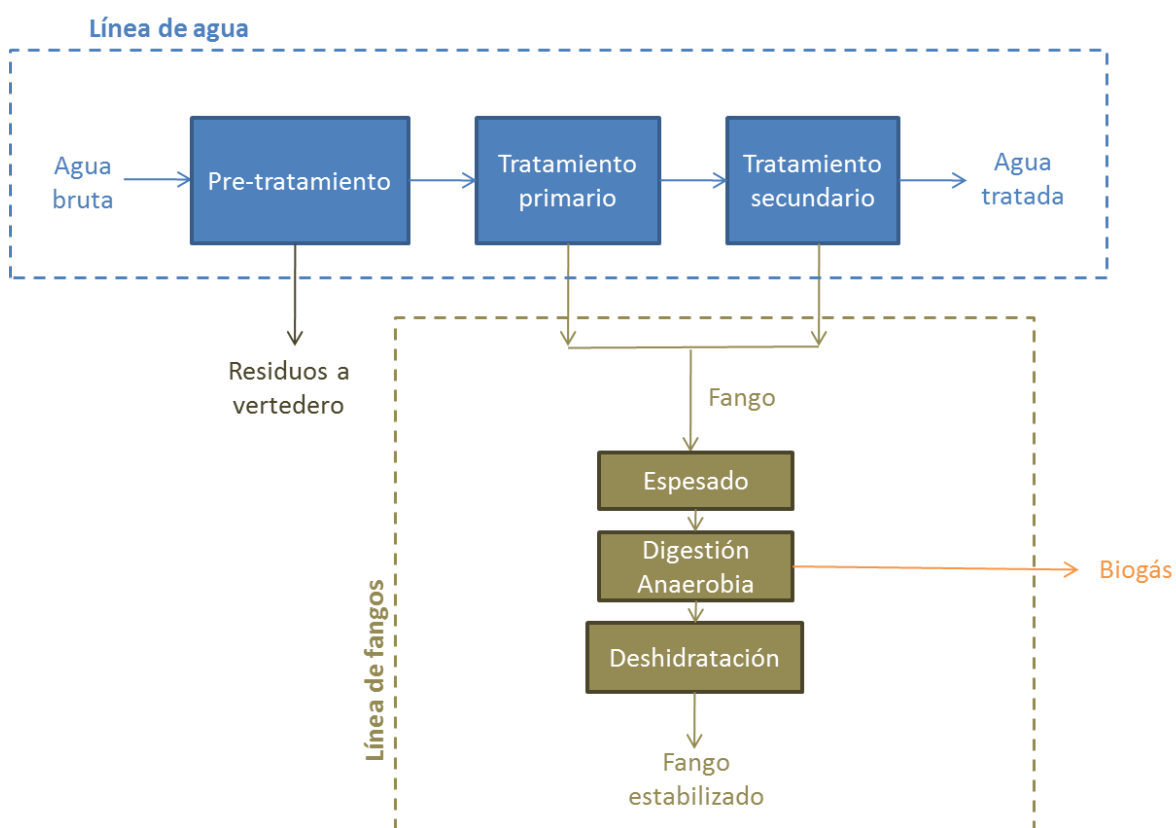


Figura 1. Diagrama de bloques de las etapas típicas de una EDAR para tratamiento de aguas y de fangos y generación de biogás

El agua bruta es captada de la red de saneamiento y pasa por las etapas de pre-tratamiento y tratamiento primario. En ellas tienen lugar el desbaste, el desarenado y el desengrasado, eliminándose los sólidos más pesados y voluminosos, las arenas y las grasas que llegan con el agua, así como la adecuación de las características del agua (homogeneización, neutralización, ajuste de pH) para que puedan llevarse a cabo los tratamientos de etapas posteriores. Finalmente, tiene lugar la decantación primaria, en la que todo el material flotante y los sólidos en suspensión que no han sido eliminados previamente se retiran por flotación y decantación, respectivamente.

La siguiente etapa es el tratamiento secundario, o biológico, en el cuál se utilizan microorganismos presentes para degradar la materia orgánica. Esta etapa se desarrolla en un reactor que tiene dos partes diferenciadas, la anóxica y la aerobia, diferenciándose en la ausencia o existencia de un mecanismo de aireación y consiguiéndose así que tengan lugar diferentes reacciones en cada una de ellas. Tras el tratamiento biológico tiene lugar la decantación secundaria, en la que se separa el agua del fango biológico generado en el reactor mediante la decantación del mismo y se recuperan nitrógeno y fósforo y también otros nutrientes.

Existen diferentes procesos físico-químicos y biológicos que se aplican en las diferentes etapas y que varían de unas EDAR a otras, ajustándose el proceso global de depuración a las características del agua que llega a cada instalación.

Todo este recorrido que realiza el agua desde que entra hasta que finaliza su tratamiento se conoce como línea de agua. De forma paralela, en las estaciones depuradoras existe una línea de fangos, a lo largo de la cual se recogen los lodos de depuración procedentes de la línea de agua. El fango o lodo de depuradora es la denominación que reciben los residuos sólidos eliminados del agua caracterizados por su consistencia pastosa debido a su alto contenido en agua (más de un 95 %) [5].

Estos fangos provienen de diferentes puntos de la línea de agua y es necesario someterlos a tratamientos adecuados para reducir su contenido en agua y los patógenos presentes y para estabilizar la materia orgánica que los compone. De esta forma, se obtiene un fango estabilizado y de consistencia sólida que no supone un riesgo para la salud humana ni para el medioambiente. Además del espesado y de la deshidratación, realizados para reducir su contenido en agua y facilitar su gestión y transporte, existen diferentes tratamientos para estabilizar el fango, siendo los más comunes la digestión anaerobia, la estabilización aerobia y el compostaje [5]. Generalmente, estos procesos se llevan a cabo en las propias depuradoras, aunque es posible encargar la gestión a un gestor autorizado.

El proceso más extendido para el tratamiento de fangos es la digestión anaerobia, llevada a cabo en la propia EDAR. En este proceso biológico los microorganismos presentes en el lodo transforman la materia orgánica inicial en moléculas más simples, en ausencia de oxígeno. Esta ruptura de las cadenas más complejas para dar moléculas pequeñas se lleva a cabo en cuatro fases bien diferenciadas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Como productos, se obtiene, por un lado, el digestato, una mezcla entre los compuestos de difícil degradación y diferentes productos minerales, y, por otro, el biogás. En la acidogénesis y la acetogénesis se produce el dióxido de carbono, mientras que el metano es el resultado de la metanogénesis.

3.3. Usos y aplicaciones del biogás: biometano

El biogás, que inicialmente era considerado un residuo procedente del tratamiento de los lodos generados en las estaciones depuradoras, es ahora un subproducto valorizable el cual puede ser aprovechado de múltiples formas, desplazando la opción menos medioambientalmente sostenible de quemarlo y liberarlo a la atmósfera directamente.

Los usos más extendidos del biogás son como combustible en calderas para producir calor, en motores y turbinas para producir electricidad o en motores de cogeneración.

Sin embargo, desde los años 80 se han estado desarrollando diferentes tecnologías para enriquecer el biogás, pasándose de un gas con hasta un 70 % de metano a uno con más del 95 %. Este biogás enriquecido, también conocido como biometano, ofrece unas características muy similares a las del gas natural, especialmente en cuanto poder calorífico (PCS mínimo del biogás de 8840 kcal/m³ [6] frente al PCS del gas natural de 9700 kcal/m³[2], condiciones normales), lo que ha abierto nuevas posibilidades de aprovechamiento del biogás, allí donde se utilice gas natural. Además, la utilización del biogás en pilas de combustible es también una opción que presenta un gran potencial, aunque también es la que se encuentra más lejos de alcanzar la viabilidad económica actualmente.

Estos nuevos usos del biogás como biometano son, por un lado, la inyección del biometano en la red de distribución de gas natural, ofreciendo una alternativa al gas natural de origen fósil. Por otro lado, está la utilización del biometano como biocombustible para medios de transporte. En la figura 2 se recogen las diferentes alternativas para el aprovechamiento del biogás.

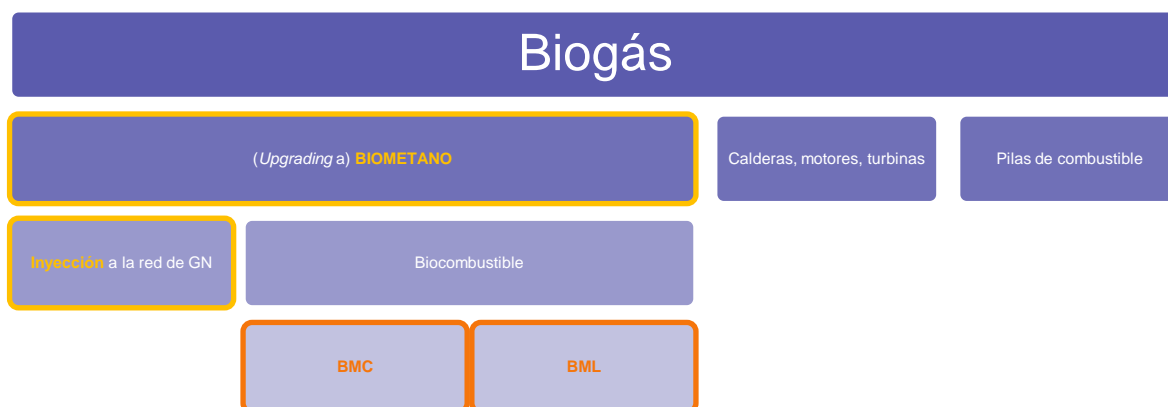


Figura 2. Esquema de los usos del biometano y otras aplicaciones del biogás

La utilización del gas natural como combustible vehicular se ha abierto paso en el mercado poco a poco, y cada vez son más los fabricantes de vehículos que se suman a esta alternativa, optando por combustible comprimido (como el biometano comprimido o BMC) para el recorrido de distancias cortas y de combustible licuado (como el biometano licuado o BML), para distancias largas. La validación e implementación de procesos de producción de biometano abre la puerta a la utilización de este como combustible allí donde el gas natural tiene aplicación, dadas sus similares propiedades. En la tabla 1 se recogen diferentes tipos de vehículos existentes en el mercado que utilizan gas natural/biometano como combustible así como las casas fabricantes. Aunque los coches, furgonetas y autobuses fueron los primeros vehículos adaptados a este nuevo combustible y, actualmente, la presencia de camiones de este tipo en las carreteras es ya una realidad, las primeras pruebas en la utilización de gas natural en otros medios de transporte susceptibles de adaptarse a este cambio ya

han sido realizadas. Así mismo, también se han desarrollado los primeros modelos de autobuses que combinan el uso de gas natural comprimido con el hidrógeno (HCBM), otra de las nuevas fuentes de energía renovable de interés.

Tabla 1. Vehículos que funcionan con biometano y marcas fabricantes

Vehículos a GN (BM)	Combustible		Empresas
	CBM	LBM	
Coches, furgonetas, carretillas elevadoras, motocicletas y 3-ruedas	Sí	No	Volkswagen, Audi, Fiat, Lancia, Mercedes, Volvo, Opel, Skoda,
Autobuses	Sí (HCBM en desarrollo)	Sí	Iveco, Renault, Scania, Man
Camiones (transporte, recogida RSU)	Sí	Sí	Iveco, Renault, Scania, Mercedes, Volvo
Trenes	Sí (en desarrollo)	Sí (en desarrollo)	
Barcos	Sí (en desarrollo)	Sí (en desarrollo)	
Aviones, helicópteros	Sí (en desarrollo)	Sí (en desarrollo)	

El biometano producido en el proceso de enriquecimiento de biogás necesita cierto acondicionamiento tanto para su inyección a red como para su utilización como biocombustible. Este acondicionamiento del biometano va desde un proceso sencillo como su odorización en el caso de inyección a red hasta los procesos más complejos de licuefacción para su uso como BML. Estos procesos se explican en apartados posteriores y la selección de los más adecuados en cada caso se toma como punto de partida para el análisis económico planteado en este trabajo.

Por otro lado, parte del biogás producido es utilizado para autoconsumo en la propia depuradora. Actualmente, la mayor parte del biogás destinado a autoconsumo se utiliza para mantener los digestores a la temperatura adecuada para que tenga lugar la digestión anaerobia y en el secado y la deshidratación de los fangos, y supone hasta un 40 % de la energía total consumida en la EDAR. Esta vía de aprovechamiento del biogás sigue resultando muy interesante de cara al desarrollo de EDAR energéticamente autosuficientes [7].

3.4. Producción de biogás

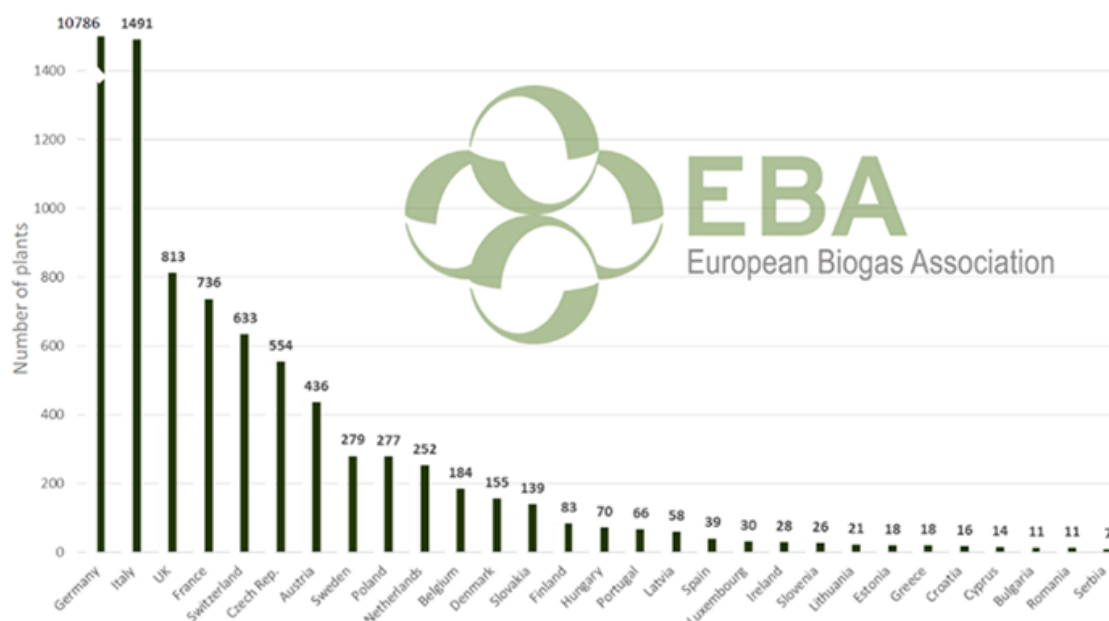
La producción de biogás sigue creciendo de forma progresiva. La Asociación Europea de Biogás (EBA, *European Biogas Association*) reporta que la tendencia creciente en la producción de biogás continúa, contabilizando un total de 17.376 plantas de biogás en toda Europa que han generado un total de 60.6 TWh en el año 2016. En la gráfica 1, puede verse la evolución en el número de plantas de biogás y la capacidad eléctrica instalada, observándose que entre 2013 y 2014 hubo un mayor crecimiento en el número de plantas respecto a años anteriores, mientras que el aumento en la capacidad instalada no fue tan pronunciado. Esto concuerda con el impulso que se le ha dado al sector agrícola/agroindustrial en la implantación de plantas de producción de biogás de baja capacidad como alternativa para la valorización de los residuos, con el fin de evitar así el vertido de los mismos en vertederos para reducir el impacto derivado y contribuir al desarrollo sostenible de las zonas rurales [4].

Por otro lado, en 2014, la distribución por sectores de origen del biogás producido fue la que sigue: 72 % del biogás producido procedente del sector agrícola, 10 %, del tratamiento de aguas residuales y 7 %, de vertedero, 5 %, de otros sectores. Respecto a 2013, se ha reducido el porcentaje procedente de vertederos, debido a la limitación de la disposición de residuos en los mismos, aumentando el porcentaje del biogás de origen agrícola, mientras que la producción de biogás en las EDAR ha aumentado en 0.5 %.



Gràfica 1. Número de plantas de Biogás instaladas en Europa entre 2010 y 2014 y capacidad total de producción [8]

La gráfica 2 muestra la distribución por país de las plantas de biogás existentes en Europa en 2014. El 60 % de las plantas están en Alemania, continuando con un 8 % de las plantas situadas en Italia. El siguiente 12 % se distribuye, por orden, en Reino Unido, Francia y Suiza. En estos 5 países se concentra más del 75 % de las plantas de biogás, aproximación que se mantiene en 2016. Entre 2015 y 2016, Reino Unido, Bélgica y Países Bajos tuvieron un crecimiento en el número de plantas significativo.

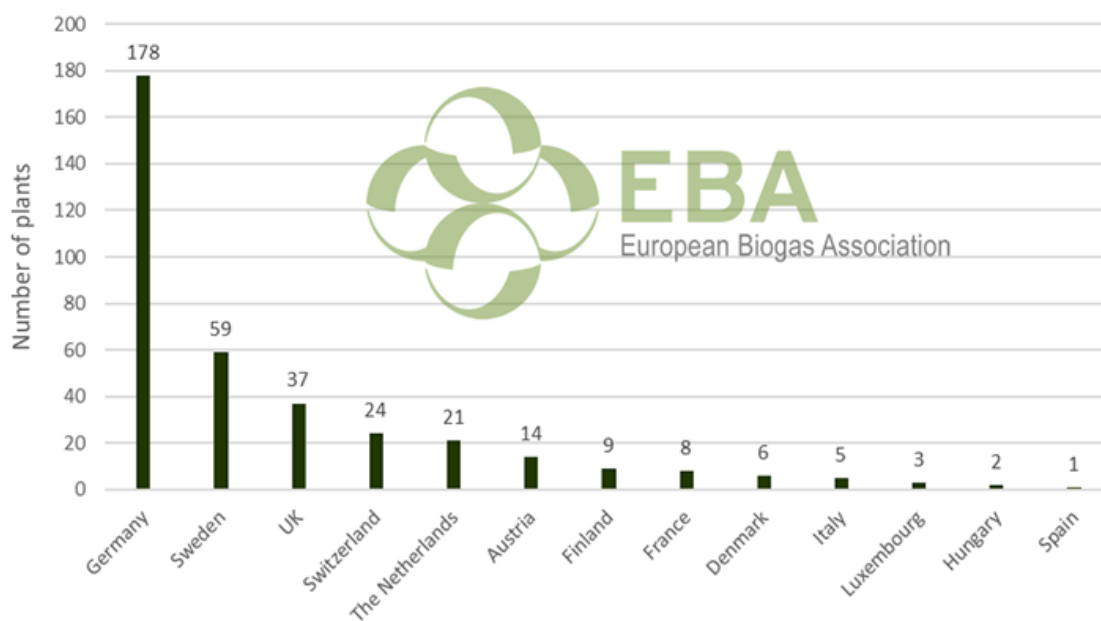


Gráfica 2. Localización de las plantas de producción de Biogás en Europa en el 2014 [8]

3.4.1. Producción de biometano

Aunque la principal aplicación del biogás es la generación de energía eléctrica, seguida de la cogeneración, el sector de producción de biometano también está experimentando un crecimiento progresivo. En 2016 se han registrado 92 nuevas plantas de biometano, sumando un total de 551 plantas, lo que supone un aumento del 20 %. El sector dedicado al enriquecimiento del biogás está experimentando un fuerte crecimiento, teniendo en cuenta que el número de plantas de biogás aumentó tan solo en un 3 % en el mismo periodo.

En la gráfica 3 se puede ver que Alemania lidera también la producción de biometano, y Reino Unido y Suiza continúan también a la cabeza, al igual que en la producción de biogás. Destaca la segunda posición de Suecia, situada también entre los 10 mayores productores de biogás, en cuanto a número de plantas.



Gràfica 3. Número de plantas de DA en Europa en 2014 y por país [8]

España, que se encuentra a la cola en la producción de biogás, cuenta desde 2014 con su primera planta de producción de biometano, a partir de la fracción orgánica de residuos domésticos, que lo sitúa en el, por ahora, reducido conjunto de países con este tipo de plantas.

Otro caso a destacar dentro del sector biometano es el de Suecia, donde el uso del biometano como biocombustible ha superado al del gas natural, ocupando el 57 % del mercado.

4. Biometano y sector energético

4.1. Modelo energético europeo

La Comisión Europea tiene como prioridad la transformación del sector energético hasta alcanzar un modelo energético basado en energías renovables y energéticamente independiente, libre de fuentes de energía procedentes de carbono de origen no renovable. El planteamiento actual incluye una transformación progresiva con objetivos intermedios fijados hasta el año 2050, para el que se espera alcanzar una reducción de las emisiones de gases contaminantes en la UE del 80 % por ciento respecto a las emisiones de 1990.

Este nuevo modelo energético es la propuesta planteada ante la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para poder preservar el medioambiente y frenar el avance del cambio climático, pasa por el ahorro energético.

Los pilares de este nuevo modelo energético son la producción de energía a partir de fuentes renovables y la mejora de la eficiencia energética. Bajo este modelo se ven impulsadas la reducción de las emisiones contaminantes, la reducción de los combustibles fósiles, el desarrollo de las tecnologías de producción de energía renovable y de biocombustibles, el desarrollo de tecnologías emergentes para el almacenamiento de energía, la mejora de las tecnologías de aprovechamiento y de valorización de residuos y la creación de una red inteligente global (*smart grid*) que permita una gestión eficiente y un ahorro energético desde las redes de distribución, el almacenamiento de la energía y el consumo energético en edificios [9].

4.1.1. Objetivo 20-20-20

La siguiente revisión del recorrido hacia la transformación del modelo y del sector energético se hará en 2020. En el paquete de medidas sobre clima y energía hasta dicho año, conocido como Objetivo 20-20-20, se han fijado los siguientes objetivos a nivel europeo: reducir en un 20 % las emisiones de GEI respecto al año 1990, reducir la producción del 20 % de la energía total a partir de fuentes renovables y aumentar de la eficiencia energética en un 20 %.

4.1.2. Horizonte 2020

Una de las herramientas fundamentales empleadas por la Comisión Europea para alcanzar los objetivos propuestos es la promoción de la innovación y del desarrollo tecnológico a través de la financiación de proyectos de investigación. Esta herramienta está enfocada al desarrollo de

tecnologías de baja emisión de carbono y la financiación de los proyectos se lleva a cabo a través de dos programas: el NER300 y el Horizonte 2020. El programa NER300 está orientado al desarrollo tecnológico a escala industrial; el Horizonte 2020 se centra en el desarrollo de tecnologías a escala laboratorio y escala semi-industrial.

El biometano es uno de los biocombustibles contemplados dentro de las nuevas fuentes de energía renovables. Ofrece un gran potencial en diferentes aplicaciones, contribuyendo a la reducción del uso del gas natural como su sustituto. Su obtención a partir del enriquecimiento de biogás puede llevarse a cabo a partir de diferentes tecnologías. La tecnología de membranas tiene un particular interés por ser una tecnología sencilla, fácil de operar, de bajo impacto ambiental y no especialmente cara que se presenta como candidata para su implantación a nivel industrial. En los últimos años se han logrado los primeros avances para la comercialización de estos sistemas y su escalado a nivel semi-industrial, por lo que los proyectos para continuar con este desarrollo, como el proyecto COSIN dentro del que se elabora este TFM, se engloban dentro del programa Horizonte 2020 [9].

4.1.3. Marco regulatorio

Todas estas estrategias planteadas de cara a la consecución de los objetivos propuestos deben recogerse dentro de un marco común que sirva de referencia para los Estados miembros de la Unión Europea y que forman parte de esta transición energética.

En materia de eficiencia energética, el marco regulatorio de referencia es la Directiva 2012/27/UE; la promoción de las energías renovables está reflejada en la Directiva 2009/28/CE sobre fuentes de energía renovables; la reducción de las emisiones de GEI se ve impulsada por el Régimen de comercio de derechos de emisión (RCDE) [9].

Otras regulaciones de especial interés son las siguientes. La Directiva 2009/73/CE sobre gas natural, en la que se indica que las normas de dicha Directiva son aplicables al biogás (y biometano, por extensión) y que los Estados miembros deben garantizar el acceso de gas natural procedente de fuentes no convencionales (biometano, por ejemplo) si este cumple con las especificaciones requeridas [4]. La directiva 2009/30/CE sobre Especificación de Carburantes, en la que se marca como objetivo respecto a las emisiones de GEI la reducción de un 6 % de las mismas en el año 2020 en el sector específico de combustibles vehiculares.

4.2. Modelo energético nacional

El modelo energético en España se basa en las directrices de la Unión Europea dentro del marco energético establecido. En el último informe entregado a la Comisión Europea (2015) aparecen las diferentes acciones actualizadas respecto a la versión anterior [99]; se trata de un modelo muy

enfocado a la producción de energía eléctrica y la cogeneración a partir de biogás, pero los incentivos económicos existentes se retiraron y esto ha frenado la implantación de los equipos correspondientes e incluso ha llegado a dejar de ser rentable el aprovechamiento del biogás de esta forma.

4.2.1. Marco regulatorio

El marco regulatorio está limitado principalmente por el Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética 2017-2020 [10] [11], con el que se presentan los informes anuales en relación a las medidas propuestas y adoptadas. Una relación más directa con las energías renovables se establece en el Real Decreto 1494/2011, del 24 de octubre, por el que se regula el Fondo de Carbono para una Economía Sostenible [1]. La legislación más reciente relacionada con la producción de biogás está desarrollada en concordancia con las directrices europeas; en ella, el aprovechamiento de biogás está relacionado únicamente con la generación de energía eléctrica o la cogeneración.

En cuanto a los incentivos económicos, existen en relación con la compra de vehículos que utilicen energías renovables, aunque no se hace referencia alguna al biogás/biometano [12]. También se incentiva el desarrollo de proyectos orientados a la reducción de las emisiones de GEI y en favor de las energías renovables a través de planes de financiación nacionales, independientes de la financiación de la UE, como ocurre con los Proyectos Clima [12].

4.3. Limitaciones en la producción y uso del biometano

4.3.1. Limitaciones regulatorias

Como ocurre con cada avance tecnológico, uno de los frentes que deben cubrirse es la creación de leyes y/o normativas que regulen tanto los nuevos procesos de fabricación/producción como los requisitos en cuanto a calidad del producto para poder ser utilizado en las aplicaciones propuestas para el mismo. El caso del biometano no es diferente. Las tecnologías existentes para su obtención a partir del enriquecimiento de biogás no son nuevas, pero sí lo es el biometano como producto.

Aunque el biometano se presenta como sustituto, parcial, del gas natural ya que presentan características muy similares, su origen es muy diferente. De esta diferencia surge la necesidad de una normativa específica para biometano, en la que se regule su uso y se especifiquen los requisitos de calidad para minimizar los posibles riesgos asociados y eliminar los peligros innecesarios. El hecho de que el origen del biometano se encuentre en los residuos sólidos y aguas residuales hacen que esta regulación esté estrechamente relacionada con la protección y seguridad de las personas y con la preservación del medioambiente.

Aunque sí se hace referencia al uso de biogás e, indirectamente, al de biometano, no hay ayudas ni incentivos fiscales ni económicos que mejoren la rentabilidad de estos procesos de forma efectiva, lo que sigue frenando la utilización del biogás y el desarrollo de tecnologías para su aprovechamiento. A esto se suma que, aún superados estos obstáculos, la normativa en cuanto a calidad para el uso de biometano en inyección y/o como biocombustible es tan estricta que alcanzar las especificaciones marcadas resulta un reto para hacer el proceso económicamente viable, en especial al introducir en el proceso un sistema de monitorización para el control de calidad del biometano.

Sin embargo, estas limitaciones no son tan restrictivas en otros países y, gracias a eso, en ellos la inyección de biometano en red o su venta como combustible vehicular es una realidad y se encuentran un paso más cerca de la total industrialización de los procesos respecto a España. Alemania es el referente en el camino a seguir para la producción y explotación del biogás, mientras que Suecia está despuntando en la inyección de biometano a red y en su uso como biocombustible. Otro país que está realizando grandes avances en ambos sectores es Francia, quien parece estar bien encaminada en la creación de un marco regulatorio en el que tanto los avances técnicos, la integración de los nuevos procesos y productos en la industria (desarrollo e implantación industrial de tecnologías de producción de biogás/biometano, creación de un mercado para biogás/biometano con medidas que incentiven su producción) y la legislación van desarrollándose en paralelo y no frenándose entre sí. Quizás Francia sería un buen ejemplo a seguir para España en cuanto a promover la producción y uso de este biometano incluyendo el punto de vista legislativo, dado que España se encuentra más cerca de la situación del sector del biometano en este país que en otros países más avanzados en este campo, como Alemania.

El objetivo a largo plazo es la creación de una Normativa Europea única que sirva de referencia para todos los países, pero esto supone un reto debido a la gran diferencia de la situación del biogás/biometano en los diferentes países y a la consecuente evolución y estado actual de las normativas estatales.

Por ahora, se ha elaborado el borrador pr-EN 16723 relativo al biometano para inyección (parte 1) y al biometano como combustible vehicular (parte 2) y que incluye recomendaciones sobre control de calidad del biometano, basándose en las experiencias previas de los diferentes países líderes en el sector.

En el [Anexo A](#) puede verse una comparativa entre las especificaciones relativas a calidad del biometano para inyección fijadas en la normativa española vigente actualmente, el BOE-A-2011-15496 y su modificación en el BOE-A-2013-185, y las especificaciones del borrador europeo. En esta tabla también se reflejan las diferentes recomendaciones que aparecen en el borrador. En el BOE-A-2011-15496 se hace referencia a aspectos relacionados con el Protocolo de Medición para la determinación de la calidad del gas a inyectar y destaca la flexibilidad en cuanto al sistema de

monitorización a emplear, que se fijará de mutuo acuerdo entre el productor del biometano y el operador de la red de distribución.

Cabe destacar que esta flexibilidad no quita que periódicamente deba realizarse el análisis de aquellos compuestos que no se monitoricen de forma continua (como BTEX, o mercaptanos). A esto se suma la no especificación de los componentes individuales que se engloban dentro de las familias de componentes (como mercaptanos, o siloxanos), así como la falta de técnicas de análisis que puedan implementarse en campo para el análisis on-line y/o la incapacidad de las técnicas existentes para cuantificar ciertas concentraciones indicadas en la normativa, ya que son valores muy bajos. Todo esto resulta en que la monitorización, que es crucial para asegurar la calidad del biometano, determinando así si este es o no apto para el uso previsto, supone un reto tanto técnico como económico que deberá superarse para poder implantar industrialmente los procesos de enriquecimiento de biogás.

4.3.2. Limitaciones técnico-económicas

En cuanto al biogás utilizado directamente como combustible, los mayores retos técnicos están relacionados con el rendimiento de los equipos y con la limpieza del gas, ya que la composición del biogás fluctúa, su contenido en metano puede llegar a ser bastante bajo y la eliminación de ciertos contaminantes puede ser crucial para no dañar los equipos. Esta etapa de limpieza actualmente también supone una parte importante tanto en los costes de inversión como en los de operación de cara al uso del biometano como combustible. Las técnicas de producción de biogás de bajo contenido en ácido sulfhídrico, enfocadas a la optimización de las condiciones del proceso de digestión anaerobia, pueden suponer una alternativa o un complemento a la limpieza del biogás, pero todavía se encuentran en fases iniciales del desarrollo, lejos de llegar a su comercialización.

Actualmente, la tecnología de membranas es la tecnología comercial más prometedora para el enriquecimiento de biogás, especialmente a pequeña escala, como puede ser el caso de la producción de biometano a partir de biogás de depuradora. Todavía existen puntos de mejora a nivel técnico, como el desarrollo de módulos más compactos y de materiales más selectivos, con mayor énfasis en la reducción del consumo energético de los sistemas. Esta reducción en el espacio, el aumento en la capacidad de biogás a tratar del sistema y la mejora de la eficiencia energética permitirán también que la tecnología sea económicamente más rentable y pueda ser competitiva a gran escala, lo que ampliará su campo de aplicación y el mercado actual de la tecnología.

5. Procesos de enriquecimiento de biogás

Existen diversos procesos de enriquecimiento de biogás y en todos es necesaria una etapa de pre-tratamiento para asegurar que la presencia de contaminantes en el mismo no supone un problema. A continuación, se recogen las diferentes tecnologías que se pueden emplear a nivel industrial para tratar el gas, tanto en la etapa de pre-tratamiento como en la etapa de enriquecimiento. Esta visión general permite ver las diferencias, ventajas e inconvenientes de los diferentes procesos [13].

5.1. Pre-tratamiento del biogás

La eliminación de contaminantes es una etapa imprescindible antes de enriquecer el biogás, ya que el gas contiene ciertos contaminantes que pueden perjudicar los equipos utilizados en el enriquecimiento y que tampoco pueden estar presentes en el biometano producido para las aplicaciones recogidas en este trabajo.

El biogás puede ser utilizado como combustible sin pasar por el enriquecimiento. Aunque los equipos que admiten este combustible (motores, calderas, turbinas) son más robustos que, por ejemplo, las membranas para SG, dependiendo de las características del biogás puede seguir siendo necesaria cierta limpieza previa a su uso.

En cualquier caso, el uso de un biogás o biometano libre de contaminantes alargará la vida de los equipos y es por eso que las técnicas de pre-tratamiento son de vital importancia y la optimización de esta etapa llevará a una reducción tanto de los costes de inversión como de los costes de operación y de mantenimiento.

Se detallan a continuación brevemente los procesos de pre-tratamiento existentes, entre los que se encuentran procesos industriales y otros en fase de investigación y desarrollo [].

5.1.1. Enfriamiento

Convencionalmente, se suele incluir una etapa de enfriamiento hasta 2 °C, para eliminar el agua presente en el biogás, ya que este sale saturado de los digestores. Es un método de eliminación del agua de bajo coste, pero efectivo. La humedad relativa del biogás puede alcanzar el 20-40 %, valores suficientes para conseguir un biometano con un contenido en agua aceptable para su utilización.

Otros contaminantes condensables pueden ser eliminados, como los siloxanos, pero, a estas temperaturas, la eliminación es solo parcial, por lo que sigue siendo necesaria la aplicación de otras

técnicas para su eliminación. Es común la colocación de esta etapa antes de los filtros de carbón activo, contribuyendo a alargar la vida del adsorbente.

5.1.2. Filtros de carbón activo

El carbón activo es el adsorbente más utilizado en pre-tratamiento de gas natural y es por lo tanto una alternativa industrial utilizada para la limpieza de biogás. Existen diferentes tipos de carbón activo. Los carbones vírgenes suelen emplearse para la eliminación de moléculas pequeñas, como los siloxanos. Los carbones impregnados, como los de KOH, suelen emplearse para atrapar moléculas más pesadas, principalmente ácido sulfhídrico.

Los carbones impregnados presentan una mayor adsorción de las moléculas, lo que permite adsorber contaminantes más difíciles de atrapar. Esta característica hace que algunos de estos carbones activos atrapen COV y siloxanos junto con el ácido sulfhídrico. La eliminación de este último ha sido ampliamente estudiada, pero la eliminación de COV y siloxanos en biogás a partir de este tipo de adsorbentes no está optimizada.

Aún así, esta capacidad es aprovechada a nivel industrial. Ya que la eliminación de sulfhídrico es un paso clave en otras industrias bien consolidadas, como las refinerías, la adaptación al pre-tratamiento del biogás se hace diseñando los filtros para la eliminación de este compuesto. Sin embargo, dado que los sistemas de control de calidad en el enriquecimiento de biogás están todavía evolucionando y las opciones actuales tienen un coste de inversión muy elevado y/o no es posible cuantificar las concentraciones traza marcadas por la legislación, los filtros se sobredimensionan para asegurar que los niveles de H₂S están por debajo del valor requerido. Este sobredimensionamiento permite también la eliminación de COV y siloxanos en los mismos filtros adsorbentes, simplificando enormemente la etapa de pre-tratamiento.

El carbón activo puede ser regenerado y reutilizado, pero con los grandes volúmenes necesarios a nivel industrial, la opción más conveniente hoy en día es hacer un solo uso de los rellenos. Una vez saturados, un gestor autorizado, generalmente el propio proveedor del carbón activo, los rellenos se tratan como proceda para su eliminación y se sustituyen por unos nuevos.

Cabe decir que este pre-tratamiento es económicamente rentable para tratar 20-30 kg de H₂S diarios. A partir de 25, sería recomendable considerar la utilización de otro tipo de materiales para reducir el contaminante y, a continuación, utilizar los filtros de carbón activo. En este aspecto influyen el contenido en sulfhídrico del biogás así como el caudal tratado.

5.1.3. Filtros biológicos

Los filtros biológicos, que son ampliamente utilizados para la reducción de olores en corrientes de gas procedentes de las plantas de tratamiento de residuos, tienen su aplicación en la limpieza de biogás para eliminar principalmente ácido sulfhídrico, aunque también pueden atrapar determinados COV y otro tipo de contaminantes como mercaptanos.

Estos filtros se utilizan como paso previo al carbón activo en la eliminación del ácido sulfhídrico cuando el contenido en el biogás es elevado. El biogás que atraviesa estos filtros puede contener hasta 2500-35000 ppm de H₂S y su concentración puede reducirse hasta 200-100 ppm. El biogás procedente de las EDAR no suele estar tan cargado, aunque sí es posible ver valores elevados.

El filtro biológico más común es un biotrickling, que utiliza compuestos férricos para atrapar el sulfhídrico. En estos filtros es necesaria la adición de oxígeno para que las eficiencias sean elevadas. Esta adición de oxígeno debe estar bien controlada ya que la legislación es muy restrictiva en cuanto al contenido de oxígeno en el biometano, especialmente en España. Por lo tanto, el uso de estas unidades añade un punto crítico en la operación de las instalaciones así como al diseño del proceso global con el fin de garantizar un buen control de este componente en el producto final.

5.1.4. Otros procesos de limpieza

Los procesos anteriores son los principalmente empleados a nivel industrial, están ampliamente estudiados, proporcionan resultados válidos en cuanto a la limpieza del gas, son simples, robustos y económicamente viables.

Además de ellos, existen otras técnicas de limpieza de biogás que, o bien no se han escalado o bien siguen en fase de desarrollo en laboratorio.

En el enfriamiento a baja temperatura, si la temperatura a la que se enfría el biogás es lo suficientemente baja, se consigue una mayor eliminación tanto de agua como de otros contaminantes. El enfriamiento a -30 °C permite alcanzar eficacias superiores al 90 % para eliminación de agua, pero el coste de inversión y de operación (consumo energético) lo hacen económicamente viable.

En cuanto a materiales adsorbentes, materiales como silicas o grafito son investigados además del carbón activo. Estos materiales están enfocados a la eliminación de siloxanos. La sílica gel es muy interesante por su bajo coste frente al carbón activo. Aunque ha demostrado eliminar los siloxanos de forma efectiva, las experimentaciones realizadas son por ahora muy limitadas y se alejan mucho de las condiciones de operación reales y de la composición real del biogás, por lo que sigue siendo un camino a explorar.

El grafito es otro adsorbente que presenta una alta eficiencia en la eliminación de siloxanos y que muestra potencial aplicación para la eliminación de otros contaminantes, sin embargo, el mayor inconveniente actual es su elevado coste. Tanto las silicas como el grafito deben operar en condiciones secas y un pequeño aumento en la humedad relativa del biogás tratado puede suponer una gran caída en la eficacia de los materiales.

Los lavados de biogás con distintos agentes químicos (aminas, soluciones alcalinas, disolventes orgánicos) son técnicas ya conocidas por su empleo en otro tipo de procesos. Aplicadas a la limpieza de biogás, sirven para absorber ácido sulfhídrico y/o dióxido de carbono, sin embargo, presentan dos grandes inconvenientes: elevados costes de operación y presencia de agentes químicos agresivos, añadiendo peligrosidad al proceso y haciéndolo menos favorable medioambientalmente.

Existe otro método de eliminación de ácido sulfhídrico, de relativa nueva aparición aunque su principio básico ya es conocido desde hace décadas. Este es el método biológico, que consiste en la utilización de microorganismos para la reducción

5.1.5. Filtros auxiliares para enriquecimiento con membranas

Las membranas son especialmente sensibles a la presencia de material particulado. Ya que no es común la presencia de partículas en el biogás, su eliminación no forma parte de los procesos convencionales de pre-tratamiento, pero la protección de las membranas, sensibles y caras, sigue siendo necesaria. Para ello, es común la instalación de filtros de partículas como elementos auxiliares en la etapa de membranas. La construcción modular de los sistemas comerciales de membranas ha llevado a que estos filtros sean seleccionados por los fabricantes de los sistemas, en lugar de formar parte de la etapa de pre-tratamiento, pero no dejan de ser unidades de limpieza del gas.

5.2. Tecnologías de enriquecimiento de biogás

Existen varias tecnologías de enriquecimiento de biogás que utilizan diferentes principios de separación: absorción, adsorción, membranas, separación criogénica y metanación [15] [16].

La absorción con agua es la más utilizada hasta la fecha, ya que es sencilla y robusta, aunque necesita grandes cantidades de agua y la temperatura afecta al proceso, con lo que afecta a la calidad del gas. El esquema del proceso es el que aparece en la figura 3.

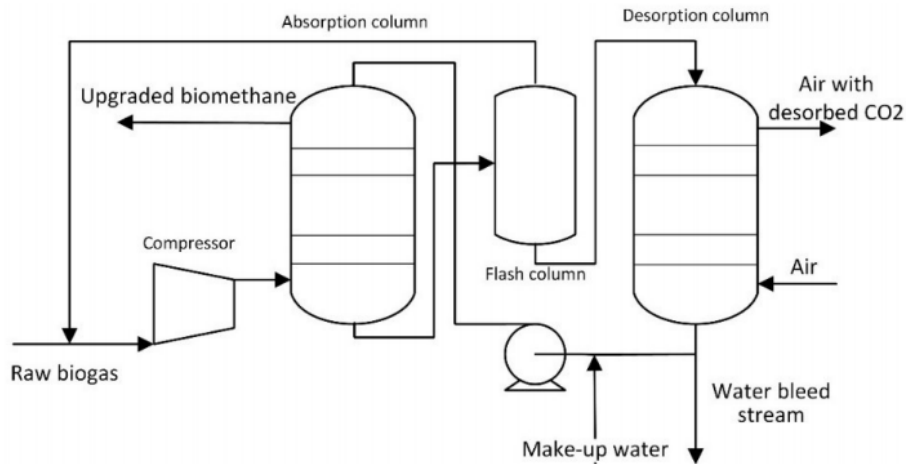


Figura 3. Esquema de absorción empleando agua como absorbente [17]

La absorción en disolventes orgánicos es un proceso establecido industrialmente. La utilización de polietilenglicol como disolvente ha dado lugar a varios procesos comerciales como el Selexol o el Genosorb. En la figura 4 aparece el esquema básico del proceso de absorción física con disolventes orgánicos.

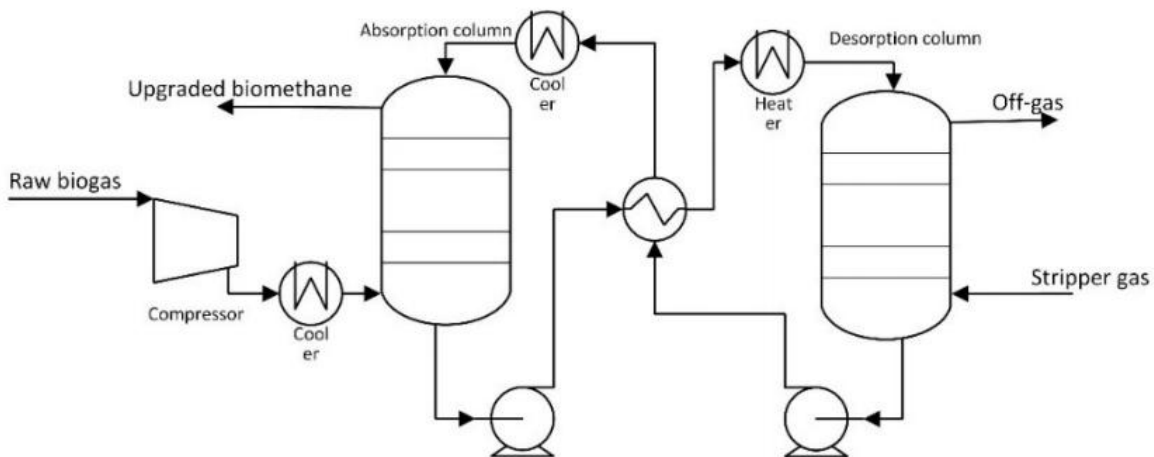


Figura 4. Esquema de absorción física con disolventes orgánicos para enriquecimiento de biogás [17]

El uso de otros disolventes, en particular, de aminas (MEA, DEA, MDEA), es también una técnica bien conocida que permite obtener un biometano de elevada pureza con pocas pérdidas de metano. Sin embargo, el uso de disolventes, al igual que en el caso anterior, y la etapa de regeneración de las aminas complican el proceso, que aparece esquematizado en la figura 5.

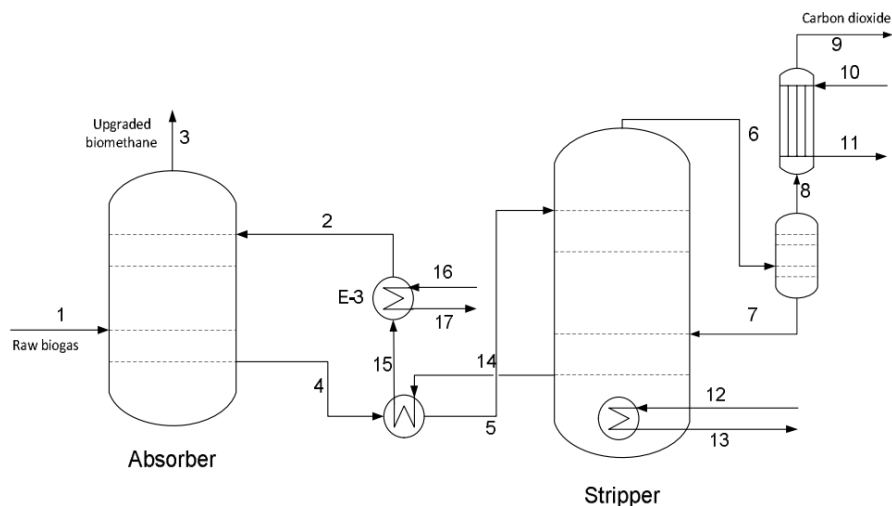


Figura 5. Esquema de absorción con aminas para el enriquecimiento de biogás [16]

En la adsorción, los adsorbentes sólidos más utilizados son carbones activos, silicas, zeolitas y silicatos, y, en menor medida, tamices moleculares de carbono. En este proceso se aplican ciclos de adsorción/desorción para regenerar el sólido. En función del tipo de ciclos aplicados, existen diferentes procesos de adsorción. El proceso más común es la PSA (*Pressure Swing Adsorption*) cuyo esquema aparece en la figura 6; la preferencia por este tipo de adsorción se debe a que los ciclos de regeneración son más cortos. También existe la VSA (*Vacuum Swing Adsorption*), a vacío, y la TSA (*Temperature Swing Adsorption*), con ciclos de temperatura, que presentan eficiencias menores a la de la PSA. En general, la adsorción produce un biometano de baja pureza y es necesario tratar la corriente de dióxido de carbono para eliminar otros contaminantes que salen con este gas, principales motivos por los que se prefieren otro tipo de tecnologías para enriquecer el biometano.

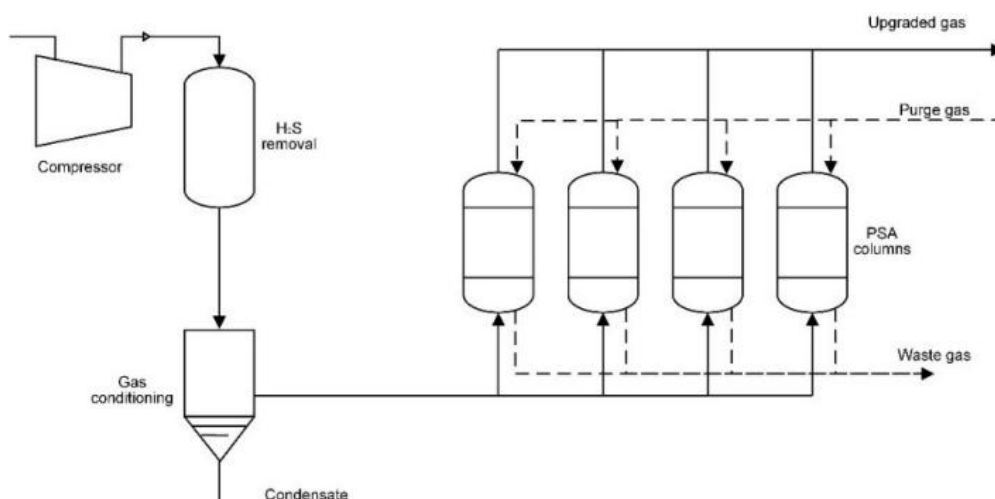


Figura 6. Esquema de adsorción con un adsorbente sólido, empleando PSA como mecanismo de adsorción/desorción [16]

La separación a través de membranas es una tecnología que se está abriendo paso en el mercado. Es atractiva por su sencillez y por no utilizar agentes químicos. Actualmente ya presenta un consumo energético a la altura de otras tecnologías maduras, como se puede observar en la tabla 2) y su sistema modular facilita mucho su escalado, por lo que presenta un gran potencial. La pureza del biometano es elevada y el sistema presenta pocas pérdidas, permitiendo obtener una corriente de dióxido de carbono de elevada pureza, lo cual es una ventaja añadida por el potencial uso de este bio-CO₂ como materia prima en otros procesos. No tiene un coste de inversión muy elevado, aunque sí necesita una etapa de pre-tratamiento del biogás más compleja que otras tecnologías no comparten.

Al igual que la tecnología de membranas explota las diferencias en los tamaños moleculares, la separación o destilación criogénica explota la diferencia en las temperaturas de licuefacción y sublimación. Resulta muy interesante porque permite eliminar también el sulfhídrico y el amoníaco a la vez que el dióxido de carbono del metano, sin utilizar químicos auxiliares y obteniendo los tres componentes por separado. Sin embargo, presenta consumos energéticos elevados y la pureza del biometano es baja. Como se puede ver en el esquema de la figura 7, se trata de un proceso complejo en comparación con algunas de las tecnologías alternativas.

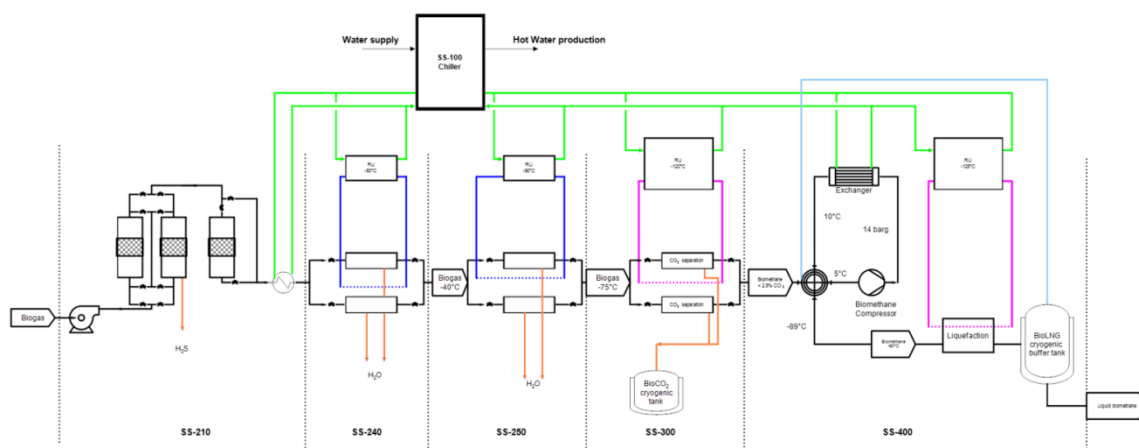


Figura 7. Esquema del proceso de separación criogénica[18]

Una nueva tecnología todavía en desarrollo despierta particular interés en cuanto al aprovechamiento de biogás y a la producción de biometano, ya que no consiste en separar el dióxido de carbono del metano para enriquecer el biogás, sino que se transforma en metano, lo que resulta en la producción de biometano pero consumiendo el dióxido de carbono presente en el biogás inicial. Este proceso se conoce como metanación y es necesaria la adición de hidrógeno para hacer reaccionar el dióxido de carbono. Además de probar la tecnología de metanación, el gran reto de este proceso reside en obtener hidrógeno de forma económica; ya que los electrolizadores actuales utilizados para la electrólisis del agua tienen consumos que hacen inviable la implantación de esta tecnología, la obtención de este hidrógeno pasa actualmente por el desarrollo de electrolizadores que operen con energías renovables, como la fotovoltaica. Actualmente, la combinación de enriquecimiento de biogás y metanación es una opción que también está siendo explorada.

De todas las tecnologías presentadas, todas trabajan a presión excepto la absorción con aminas. Destaca también la elevada temperatura que se necesita en el lavado con aminas y las bajas temperaturas en la separación criogénica.

5.3. Selección de la tecnología de membranas

La tabla permite realizar una comparación rápida de los parámetros técnico-económicos que caracterizan los diferentes procesos.

Tabla 2. Comparativa de las diversas tecnologías de separación

	Absorción en agua	Absorción en aminas	PSA	Separación Criogénica	Separación con membranas
Grado de desarrollo	Tecnología madura	Tecnología madura	Tecnología madura	En desarrollo/ Tecnología Comercial	Tecnología comercial
Pureza BM (% CH₄)	97-99	98-99	95-97	>99	>99
Pérdidas de BM (% CH₄ en CO₂)	2	0,5	5-15	<2	<0,5
Facilidad de recuperación del CO₂	Difícil	Fácil	Fácil	Muy fácil	Fácil
Presión (bar)	9-10	1-3	7-10	17-25	5-20
Temperatura (°C)	15	38-65	25	-40 - -90	15-38
Incluye eliminación de impurezas	Sí	Sí	No	Sí	No
CAPEX	Bajo	Alto	Bajo	Medio	Alto
Consumo energético	0,22 kWh/Nm ³ BG	0,06-0,17 kWh/Nm ³ BG	0,22 kWh/Nm ³ BG	0,6 kWh/kg BioGNL	0,28 kWh/Nm ³ BG
Fluidos	Agua	Aminas	-	-	-
Materiales	-	-	Carbón Activo, zeolitas	-	Membranas
Coste consumibles	Medio	Bajo	Alto	Medio	Bajo

La tecnología de membranas permite obtener un biometano de elevada pureza con pocas pérdidas, utilizando un sistema simple que también permite obtener una corriente pura de dióxido de carbono. No requiere una elevada inversión y el consumo energético es similar a las demás tecnologías alternativas. Requiere trabajar a presiones moderadas, como las demás tecnologías excepto una, y no depende de la temperatura ni de otros agentes químicos como los disolventes, por lo que medioambientalmente también ofrece ventajas respecto a otras tecnologías.

El lavado con aminas podría parecer un buen competidor contra las membranas, pero si se analizan los valores de la tabla 2, se observa que las membranas ofrecen mayor pureza y menores pérdidas de metano. Además, la facilidad de la recuperación del dióxido de carbono hace referencia a si es necesario separarlo de otros compuestos, como ocurre al utilizar PSA, sin embargo, el esquema de proceso de la figura cuatro muestra que el CO₂ se obtiene tras la desorción de la amina, mientras que en el caso de las membranas, separar el dióxido de carbono del metano ya implica la obtención de una corriente de elevada pureza (con la configuración del sistema adecuada), por lo que el dióxido de carbono de alta pureza se obtiene simultáneamente al biometano y no en una etapa diferente. Finalmente, sí es cierto que las aminas presentan un menor consumo energético, pero tienen el inconveniente de requerir el uso de disolventes, necesitar aporte de energía térmica y tener una etapa de desorción compleja, por lo que las membranas parecen más seguras y sencillas que las aminas y proporcionarán mejores resultados. Aunque el consumo energético sea mayor que en la absorción con aminas, sigue estando en valores parecidos a los indicados para las demás tecnologías y no hay que olvidar que el disolvente empleado en el lavado con aminas también tiene un coste asociado.

Además de las características anteriores, los avances en cuanto a desarrollo de nuevos materiales y a optimización de los sistemas permiten ver un crecimiento considerable en las últimas dos décadas, con el potencial necesario para ser una tecnología utilizada de forma reiterada y a largo plazo, tanto en la separación de biogás como en otras aplicaciones.

6. Procesos de acondicionamiento del biometano

Una vez que el biometano sale de la planta de enriquecimiento, este será acondicionado para que pueda ser utilizado en la aplicación correspondiente. Dependiendo de la aplicación, esta etapa de acondicionamiento será diferente.

En el caso de la inyección a red, puede ser necesaria la odorización del gas, para poder ser detectado en caso de fuga, así como su presurización, dependiendo de si ya sale del enriquecimiento a la presión del punto de inyección o no. Luego, se transporta hasta el puesto o estación de inyección más cercano, donde ya existe un sistema de regulación de presión para terminar de ajustar la presión del biometano a la presión de la línea de distribución.

En el caso de biometano comprimido, su acondicionamiento corresponde en realidad a su transporte, ya que la compresión se encuentra incorporada dentro de la estación de repostaje. En ella, el biometano que llega se almacena en tanques y se presuriza en botellas a diferentes presiones, de forma que combinando el biogás almacenado a presiones distintas se pueda rellenar el depósito del vehículo hasta la presión correspondiente de una forma exacta y segura.

El acondicionamiento para la utilización del biometano como combustible vehicular licuado es el más complejo y costoso, ya que incluye la unidad de licuefacción. La licuefacción es un proceso común en otras industrias, como en la producción de GLP, y ahora encuentra su particular aplicación en la licuefacción del biometano. Sin embargo, la diferencia en los caudales producidos en unas y otras plantas hace que exista una variedad de procesos de licuefacción que funcionan de diferente forma para ajustarse a todas las capacidades de las instalaciones. La comparativa entre los diferentes procesos de licuefacción existentes puede verse en la figura 8.

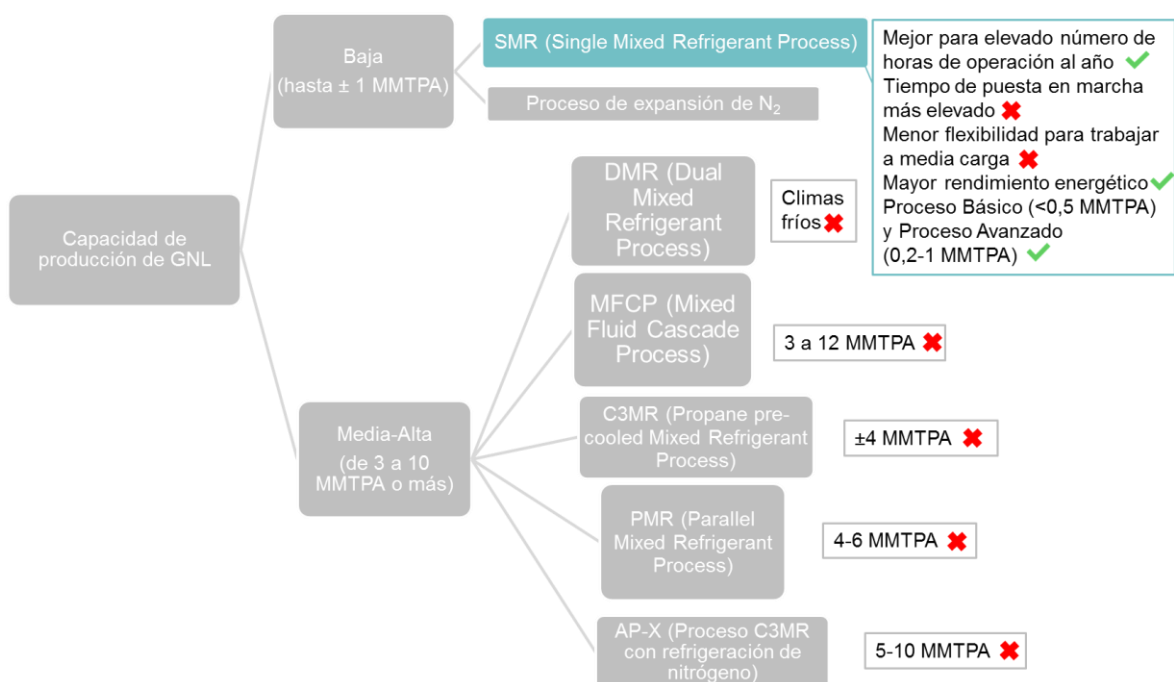


Figura 8. Comparación entre los diversos mecanismos de licuefacción existentes

Para tan bajas capacidades, tanto la expansión de nitrógeno como los refrigerantes mixtos son válidos, sin embargo, el refrigerante mixto ofrece un mayor rendimiento energético y es más adecuado para la operación en continuo [19] [20] [21] [22].

Como ejemplo del proceso de refrigeración mixta está el proceso LINUM1 de Linde, indicado para bajas capacidades, cuyo esquema aparece en la figura 9.

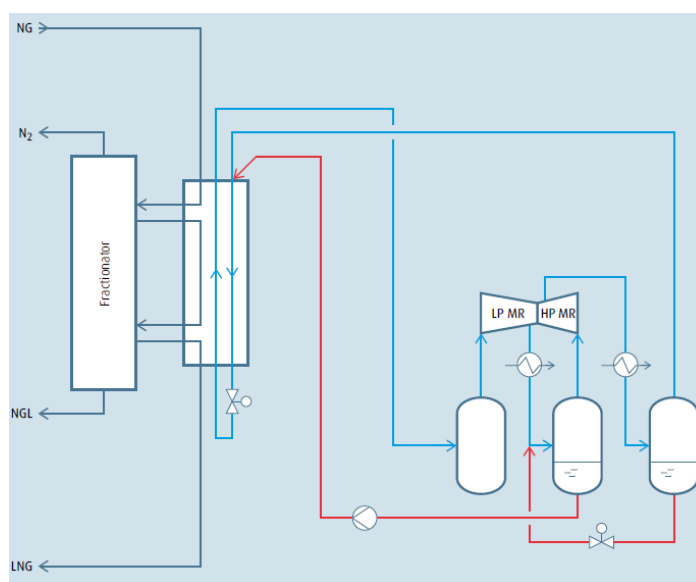


Figura 9. Proceso de licuefacción de refrigerante mixto LINUM1 de Linde

7. Estado del arte de la tecnología de membranas

Las membranas son láminas muy finas de materiales cuyas características permiten que actúen como filtros moleculares en los que la separación es posible debido a la diferencia en las velocidades de permeación de las moléculas a separar. Existen muchos tipos de membranas, clasificadas en base a diferentes criterios. Atendiendo a cada uno de ellos, se recogen en los siguientes apartados las características de las membranas utilizadas para separación de gases.

7.1. Aparición y desarrollo de la tecnología de membranas

La existencia de las membranas se conoce desde el siglo XVIII. Los primeros experimentos para estudiar su comportamiento se hicieron con diafragmas animales, desde vejigas de cerdo o pescado hasta tripas de intestino. En 1748, el término “ósmosis” fue acuñado por Abbe Nollet.

Durante el siglo XIX y a principios del XX se desarrollaron teorías físico-químicas a partir de la continua experimentación con membranas, pero sin llegar a comercializar ningún modelo. En 1907, Bechhold idea un proceso de fabricación de membranas de nitrocelulosa que continuó siendo desarrollado por otros científicos hasta resultar en el desarrollo comercial de membranas de nitrocelulosa para microfiltración en los años 30. En los siguientes 20 años, el desarrollo de estas membranas microporosas para microfiltración continuó con la utilización de diferentes polímeros y de acetato de celulosa como materiales de fabricación. Con la finalización de la Segunda Guerra Mundial en 1945 se desarrolló la primera aplicación comercial de las membranas al utilizarse para asegurar la calidad del agua apta para consumo humano.

A partir de 1960 comienza la era moderna del desarrollo de membranas. Hasta entonces, cuatro grandes obstáculos frenaban la industrialización de las membranas: poca fiabilidad, coste elevado, proceso de separación muy lento y baja selectividad. Diferentes avances han ido aportando soluciones para estos problemas. El primer salto de escala laboratorio a industrial lo realizan en la década de los 60 Loeb-Sourirajan al desarrollar un proceso de producción de membranas anisotrópicas para ósmosis inversa libres de defectos y con una capacidad para tratar un flujo 10 veces mayor al de cualquier membrana existente hasta ese momento. La industrialización de las membranas de ósmosis inversa también fue impulsada por la gran inversión en investigación por parte de EEUU, desarrollándose procesos de fabricación de membranas a partir de composites multicapa alcanzándose espesores de hasta 0.1 μm .

En las décadas de 1970 y 1980 se establecieron los procesos de micro (MF) y ultrafiltración (UF) y de electrodiálisis, junto con la ósmosis inversa, y su uso se abrió paso también en la industria

farmacéutica y en medicina. Uno de los grandes avances en la industrialización de las membranas fue el desarrollo de los módulos de membranas, permitiendo una fácil escalabilidad.

En la década de los 80 se dan los primeros pasos en el desarrollo de membranas para separación de gases (SG) y pervaporación (PV).

A mediados de los 90 se consiguen desarrollar sistemas de MF/UF para tratamiento de aguas residuales solventando el problema del ensuciamiento existente hasta entonces, y en la década del 2000, estos sistemas son llevados a escala industrial con la aparición de los actuales biorreactores de membrana, económicamente competitivos con los tratamientos biológicos convencionales.

A lo largo de las últimas décadas se ha conseguido solventar en mayor o menor medida y en diferentes campos cada uno de estos obstáculos, creándose un mercado industrial para la tecnología de membranas que está creciendo exponencialmente en los últimos 20 años [23] [24].

7.1.1. Membranas para separación de gases

La capacidad de las membranas para separar gases ya se conocía desde poco después que su capacidad para separar líquidos, pero el desarrollo de estos sistemas SG fue posterior. Los primeros avances en este campo de aplicación comenzaron con los experimentos de Graham en 1829 con membranas poliméricas y continuaron con la postulación de la Ley de Fick en 1855. Graham continúa con la experimentación en membranas de goma natural hasta deducir en 1866 que este material presenta diferentes permeabilidades para diferentes gases. A principios del siglo XX varios avances en SG tienen lugar: se cuantifican las permeabilidades relativas en membranas de goma natural para oxígeno, nitrógeno y argón, se define el modelo de difusión de Knudsen; se establece la dependencia de la permeabilidad con la temperatura; y se desarrolla una metodología que permite calcular los coeficientes de solubilidad y difusión de gases, parámetros en los que se basa el modelo de transporte de materia de las membranas densas.

Ya en la década de 1960, se extiende el uso de las membranas de Loeb-Sourirajan para SG y continúa la investigación del comportamiento de las membranas poliméricas.

A partir de aquí, en los últimos 30 años se han conseguido desarrollar procesos a escala industrial para la separación de diferentes gases. Actualmente la tecnología de membranas en SG está ampliamente extendida en la industria química (como la farmacéutica), en la industria dedicada a distribución y suministro de gas y en la industria de obtención de petróleo y refinerías. Las aplicaciones con una mayor implantación a gran escala son la obtención de nitrógeno del aire, recuperación de hidrógeno del gas de purga en la producción de amoníaco, recuperación de hidrógeno en refinerías, eliminación de dióxido de carbono del gas natural y para recuperación

mejorada de petróleo (conocida por sus siglas en inglés *EOR*, *Enhanced Oil Recovery*) [23] [24]. Los mayores hitos en la industrialización de la tecnología de membranas aparecen reflejados en la figura 10. Paralelamente al escalado de la tecnología, se ha realizado una intensa labor de investigación en la búsqueda de nuevos materiales para la fabricación de membranas, ya sea a partir de la combinación de materiales a partir de los ya existentes, mejorando o modificando las técnicas de fabricación de membranas para mejorar las propiedades del material o probando materiales completamente nuevos.

Hoy en día, los esfuerzos en SG siguen concentrados en estos dos grandes focos que son la ampliación de las aplicaciones a escala industrial y búsqueda de nuevos materiales / mejora de las propiedades en la fabricación de membranas.

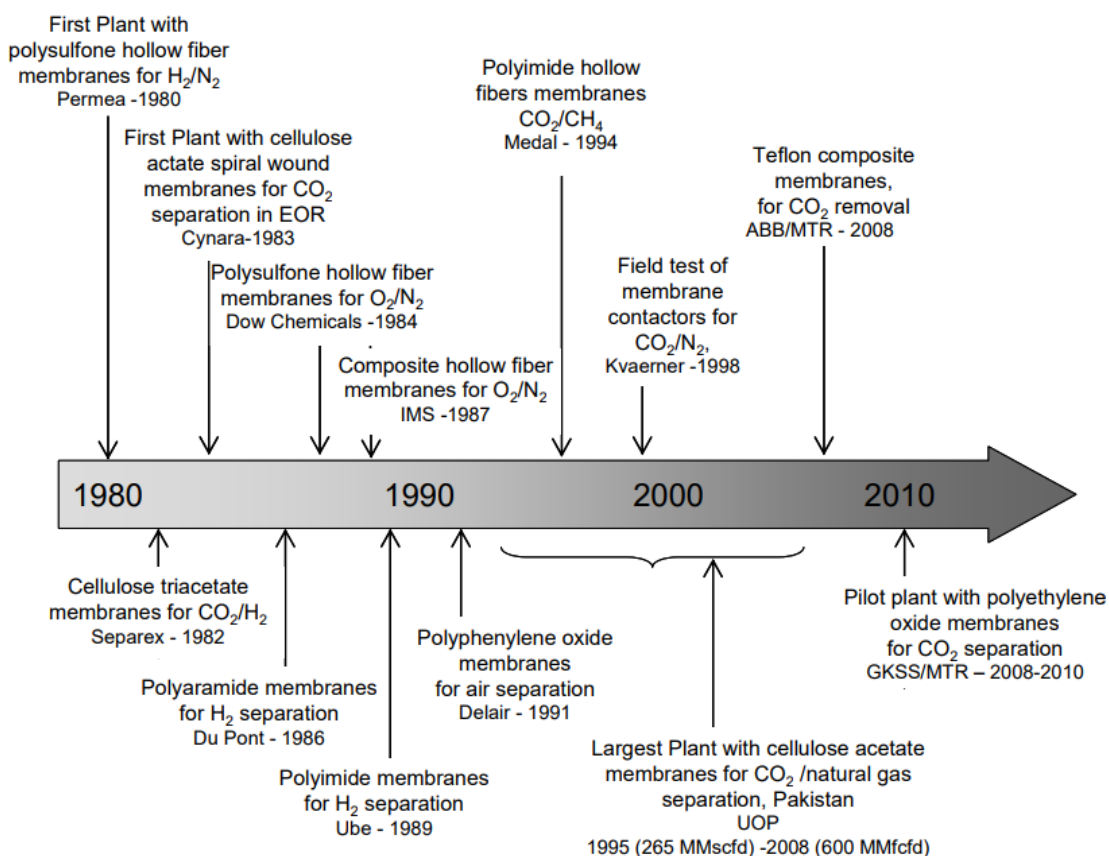


Figura 10. Cronograma con los hitos más relevantes respecto a la separación con membranas [23]

7.1.2. Fabricantes de membranas para separación de gases

Tabla 3. Aplicaciones y fabricantes para los diferentes pares de gases separados

Separación	Aplicaciones	Fabricantes
Oxígeno - Nitrógeno	Obtención de nitrógeno	Permea (Air Products) Generon (IGS) IMS (Praxair) Medal (Air Liquid)
	Enriquecimiento de oxígeno	Parker Gas Separation Ube Evonik
Hidrógeno - Hidrocarburos	Recuperación de hidrógeno en refinerías	Air Products Air Liquid Praxair Ube
		Permea (Air Products) Medal (Air Liquid) UOP (Separex) Evonik
Hidrógeno - Dióxido de carbono	Ajuste del ratio en el gas de síntesis	Air Products Air Liquid Praxair Ube
		Permea (Air Products) Medal (Air Liquid) UOP (Separex)
Hidrógeno - Nitrógeno	Recuperación de hidrógeno en la producción de amoníaco	Air Products Air Liquid Praxair Ube Permea (Air Products) Medal (Air Liquid) UOP (Separex)

Dióxido de carbono - Metano	EOR Enriquecimiento de biogás	Cynara (NATCO) Kvaerner Air Products Ube UOP (Separex) Grace Medal, PRISM (Air Liquid) MTR
Ácido sulfhídrico - Hidrocarburos	Tratamiento de gas ácido	Cynara (NATCO) Kvaerner Air Products Ube UOP (Separex)
Agua - Aire	Deshidratación de aire	Air Products Parker Balxston Ultratronc Praxair
Hidrocarburos - Aire	Control de emisiones Recuperación de hidrocarburos	Borsig MTR GMT NKK
Hidrocarburos - otras corrientes de proceso	Recuperación de disolventes orgánicos Recuperación de monómeros	Borsig MTR GMT SIHI

7.2. Membranas poliméricas

Existen varios criterios bajo los que clasificar las membranas. En la figura 11 se recogen todos los tipos de membranas según su naturaleza, su estructura o el modelo de transporte de materia que permite la separación de las moléculas.

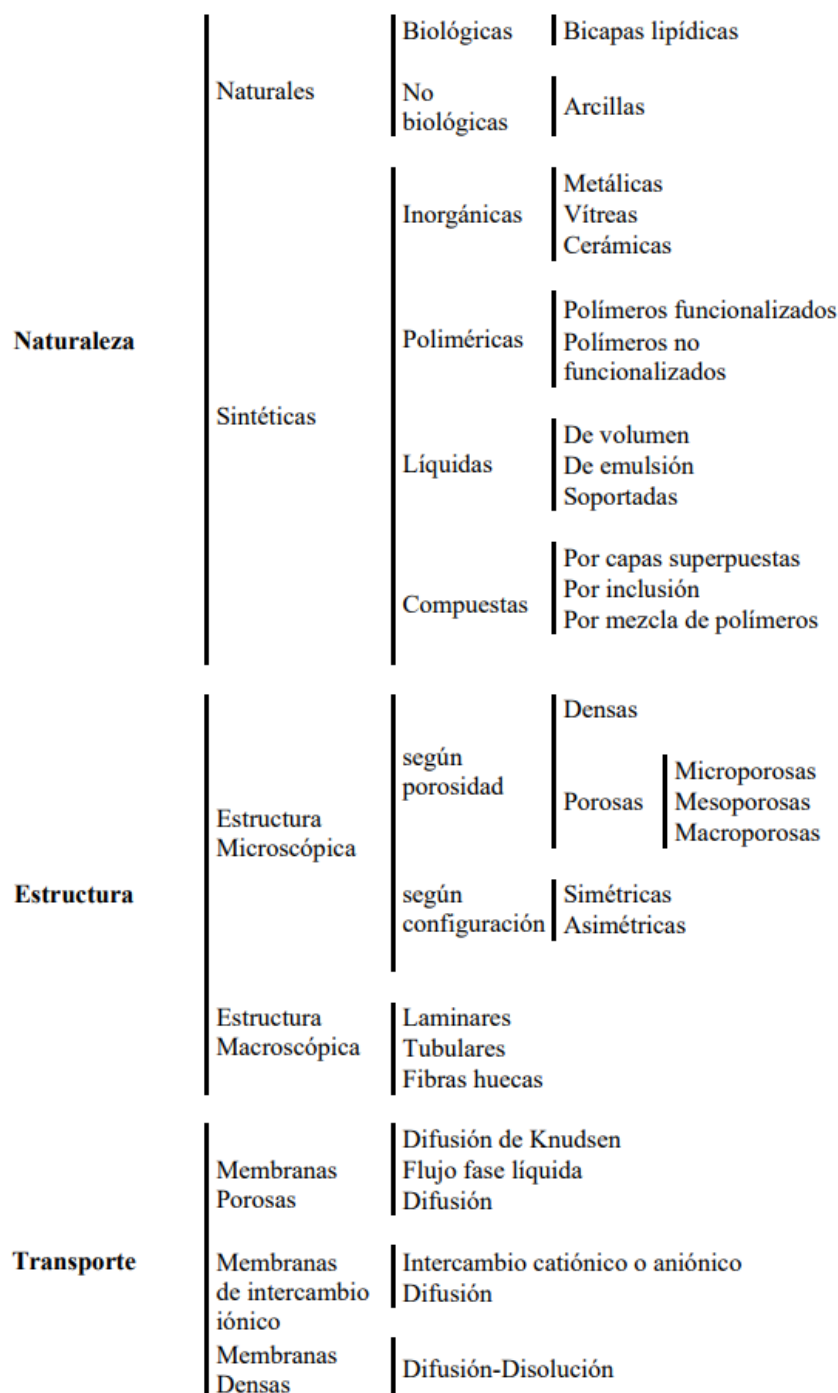


Figura 11. Clasificación de las membranas según su naturaleza, estructura o modelo de transporte empleado para separar las partículas [25]

En separación de gases, las membranas más utilizadas son las membranas densas poliméricas, membranas sintéticas simétricas formadas por materiales poliméricos. Estas membranas se caracterizan por no tener poros definidos lo suficientemente grandes como para permitir el paso de moléculas a través de ellos, como ocurre en las membranas porosas; en su lugar, tienen pequeños espacios entre las cadenas poliméricas, que pueden variar de volumen y posición a lo largo del

tiempo permitiendo así el paso de las moléculas a través de la membrana. Para que en esta estructura se produzcan estos cambios microestructurales es necesario crear un gradiente de concentraciones a través de la membrana que actúe como fuerza impulsora para que las moléculas puedan atravesar la membrana. En SG, la fuerza impulsora está muy influenciada por la diferencia de presiones entre rechazo y permeado.

En este tipo de membranas, el transporte de materia sigue un modelo particular conocido como modelo solución – difusión, que será explicado con detalle en un apartado específico. En términos generales, este modelo basa el transporte de las moléculas en dos etapas, una primera etapa en la que las moléculas se disuelven en la superficie de la membrana y una segunda etapa en la que las moléculas, una vez adheridas a la superficie de la membrana, difunden a través de la misma.

El conocimiento sobre las membranas poliméricas es amplio en cuanto a número de polímeros estudiados y propiedades bajo condiciones ideales y controladas, mientras que a nivel industrial el número de materiales empleados se reduce y el estudio del comportamiento bajo condiciones reales es más limitado. El desarrollo de los simuladores dinámicos ofrece hoy en día buenos resultados a nivel cualitativo y su desarrollo a nivel cuantitativo permitiría ahorrar mucho tiempo y acelerar los avances, sin embargo, por ahora la mejor predicción sigue obteniéndose a partir del modelo de solución-difusión [24] [26].

Las membranas poliméricas, u orgánicas, son las que han experimentado un mayor desarrollo no solo en su aplicación en SG, sino en todos los tipos de membranas en general. Varias características de los polímeros han llevado a explorar principalmente este tipo de materiales. Los polímeros son accesibles, más fáciles de manejar que otros materiales y, además, existen procesos de producción y caracterización ya establecidos. Existen numerosos tipos de polímeros que, por un lado, guardan ciertas similitudes entre sí, pero que a la vez ofrecen muchísima variedad de propiedades que pueden ser interesantes a la hora de utilizarlos en la fabricación de membranas. Esto favorece la investigación de numerosos materiales hasta encontrar la combinación de propiedades de la membrana que sean convenientes en cada caso, teniendo ya parte del camino recorrido al tratarse todos ellos del mismo tipo de material, un polímero. La versatilidad que puede conseguirse tanto en las propiedades como en la forma es una ventaja para poder configurar las membranas en cuanto a aplicación y escalabilidad.

Como ya se ha adelantado, las membranas poliméricas de interés en SG son las membranas densas, también conocidas como no porosas. La categorización depende del tamaño de poro observado, siendo las densas aquellas cuyos poros son inferiores a 5, 10 o incluso 20 Å, según la fuente [24] [26].

Los polímeros utilizados se clasifican en polímeros de goma o polímeros vítreos. Una característica fundamental de los polímeros es la temperatura de transición vítrea, por encima de la cual el polímero de goma se transforma en un polímero vítreo con el consecuente cambio en sus propiedades, y viceversa.

Existen diferencias entre las gomas y los polímeros vítreos. En general, los polímeros de goma tienen una mayor movilidad (el movimiento térmico permite que trozos de cadenas poliméricas se muevan libremente, la cadena principal puede rotar sobre el eje), lo que resulta en polímeros blandos y elásticos, con mayores coeficientes de difusión. Por el contrario, los polímeros vítreos tienen una movilidad muy limitada, por lo que resultan muy duros y rígidos, lo que hace que los coeficientes de difusión de los gases en estos polímeros sean bajos.

Otra característica importante es el volumen libre, espacio no ocupado por las cadenas poliméricas. En los polímeros de goma existe un mayor volumen libre, por lo que el movimiento de trozos de cadenas poliméricas facilita el avance de las moléculas. Sin embargo, en los polímeros vítreos, la falta de volumen libre dificulta todavía más la libertad de movimiento y, por lo tanto, dificulta también el paso de las moléculas. Estas características suponen que las moléculas pequeñas permeen con más facilidad que las grandes en los polímeros vítreos, y que las gomas se utilicen para separar moléculas de mayor tamaño en las que las diferencias en los coeficientes de difusión son más evidentes.

En los parámetros característicos de una membrana, esto se traduce en que las gomas tienen mayores permeabilidades que los polímeros vítreos, aunque a mayor permeabilidad, menor selectividad. Ya que los coeficientes de difusión en las gomas son relativamente altos, la etapa crítica en estas membranas es la disolución, mientras que para polímeros vítreos, la etapa crítica es la difusión.

Otras consideraciones deben tenerse en cuenta a la hora de seleccionar los polímeros a emplear, especialmente la evolución de las características de la membrana con el paso del tiempo. El volumen libre se reduce con el tiempo, y según se va utilizando la membrana, puede ocurrir que esta se vaya plastificando progresivamente. En general, todos los efectos que aparecen con el paso del tiempo, como los dos anteriores, supondrán un deterioro de las propiedades de la membrana resultando en una pérdida de eficiencia notable. Las altas temperaturas o la operación con agentes químicos agresivos no son adecuados para las membranas. Los problemas mencionados cobran especial fuerza en la industria petroquímica, refinerías y plantas de refinado de gas natural, caracterizadas por la presencia de hidrocarburos de cadena larga. En estos casos, los módulos de fibra hueca presentan graves problemas y otras alternativas inicialmente más caras resultan más adecuadas a la larga para este tipo de instalaciones [24].

Aunque el abanico de polímeros estudiados es muy amplio, los polímeros utilizados en módulos industriales son pocos y aparecen recogidos en la tabla 4. La gran mayoría de las membranas industriales se fabrican con polímeros vítreos, ya que, a pesar de presentar menores permeabilidades, las selectividades son buenas y presentan mejores propiedades mecánicas que las gomas.

Tabla 4. Polímeros usados en módulos industriales

Polímeros	
Gomas	Vítresos
Poli(dimetilsiloxano)	Acetato de celulosa
Co-polímeros de amida y óxido de etileno/óxido de propileno	Poliperfluorodioxoles
	Policarbonatos
	Poliimidas
	Poli(óxido de fenileno)
	Polisulfona

Los diferentes polímeros y sus propiedades características radican en su fabricación, en la combinación de cadenas y bloques poliméricos y en cómo se lleva a cabo el proceso.

7.2.1. Modelo solución-difusión

El modelo solución-difusión explica el paso de moléculas a través de un polímero denso basándose en dos mecanismos. Estos mecanismos dan nombre al modelo y estructuran el proceso en dos etapas. En una primera etapa, las moléculas, por un mecanismo de disolución, pasan del fluido a la superficie de la membrana. A continuación, las moléculas disueltas en la superficie atraviesan la capa de polímero hasta llegar al otro lado por el mecanismo de difusión.

La concentración de cada especie en la superficie de la membrana dependerá, en mayor o menor medida, de la presión, la temperatura y la composición del fluido en contacto con la superficie de la membrana. Una vez disueltas, las moléculas difunden a través de la membrana pasando de unos a otros elementos de volumen libre existentes entre las cadenas poliméricas. Estos huecos van formándose y desapareciendo con el tiempo de forma aleatoria, debido al movimiento de las moléculas del polímero que está directamente relacionado con el material polimérico y su interacción con las moléculas que difunden.

Este mecanismo de difusión favorece el avance de las moléculas con diámetros más pequeños. En el caso de la separación de metano y dióxido de carbono, si se observan los diferentes diámetros

moleculares de cada compuesto en la figura 12, se deduce que la molécula de dióxido de carbono difunde más rápido que la de metano debido a que tiene el menor de los diámetros. Esto aumenta las probabilidades de caber a través en los huecos que se formen en sus localidades, siendo mayores que las del metano. Numéricamente, el coeficiente de difusión del dióxido de carbono es mayor que el del metano.

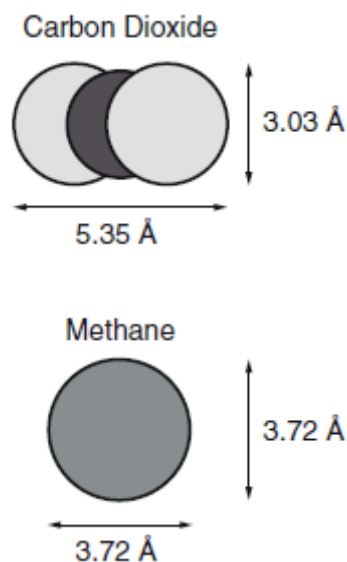


Figura 12. Diámetros moleculares del dióxido de carbono y de metano [24]

Matemáticamente, la difusión en las membranas poliméricas se basa en que la fuerza impulsora es un gradiente en el potencial químico de un componente a través de la membrana. Dos grandes suposiciones son aceptadas en este modelo.

En primer lugar, se asume que fluido y membrana están en equilibrio en la interfase en la que se encuentran en contacto. Esto implica que el gradiente es continuo a lo largo de la membrana y que las velocidades de absorción y desorción de las moléculas en la interfase son mucho mayores que la velocidad de difusión, por lo que es ésta última la etapa crítica del proceso.

En segundo lugar, se asume que la presión a lo largo de la membrana es constante, principal diferencia con el modelo de flujo a través de poros. Esto implica que el gradiente en el potencial químico puede ser expresado como un gradiente en la concentración de cada especie. La concentración puede expresarse en función de las presiones parciales, por lo que habitualmente este gradiente se expresa en función de las fracciones molares y las presiones a ambos lados de la membrana.

En separación de gases, el gradiente de concentraciones se debe a la composición del fluido inicial y a la obtención de un permeado pobre en uno de los componentes de la mezcla inicial, y a la diferencia de presión entre ambos lados de la membrana, que se consigue aplicando presión en el lado del rechazo o bien haciendo vacío en el lado del permeado. La figura 13 muestra los perfiles de presión y concentración a través de la membrana, en los que se observa gráficamente las hipótesis sobre las que se basa el modelo solución-difusión.

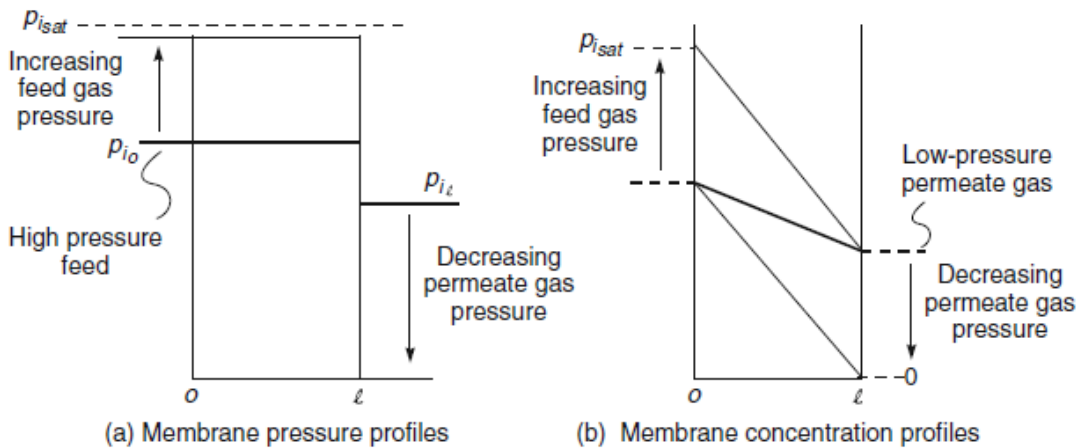


Figura 13. Perfiles de presión y concentración a través de una membrana densa [24]

Otro factor influyente en el proceso de separación es el espesor de la membrana, l . Además de este y de las presiones parciales del componente en rechazo y permeado, p_{i_0} y p_{i_l} , respectivamente, el flujo del mismo a través de la membrana, J_i , vendrá determinado por los coeficientes de difusión y de sorción D y K_i^G . Así, el flujo de un componente i a través de una membrana responde a la ecuación 7.1.

$$J_i = \frac{P_i^G (p_{i_0} - p_{i_l})}{l} \tag{Eq. 7.1}$$

Donde J_i es el flujo del componente i a través de la membrana por unidad de tiempo y área, en $\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$, p_{i_0} y p_{i_l} se expresan en bar y l en cm.

P_i^G es la permeabilidad del gas, es decir, volumen de gas que atraviesa la membrana por unidad de tiempo y área referido a una unidad de longitud de la membrana y bajo un determinado gradiente de

concentraciones, expresado en $\text{m}^3\text{cm} / \text{m}^2\text{s cmHg}$. Este parámetro es el producto de los coeficientes de difusión y sorción:

$$P_i^G = D_i K_i^G \quad (\text{Eq. 7.2})$$

Donde D_i y K_i^G se expresan respectivamente en cm^2/s y en $\text{cm}^3 / \text{cm}^2\text{cmHg}$. Todos los valores suelen referirse a condiciones normales de presión y temperatura (0°C , 1 atm).

Tanto los coeficientes de difusión como de sorción son difíciles de calcular, por lo que suele determinarse directamente la permeabilidad de forma experimental para un determinado par gas-membrana. Es también habitual expresar la velocidad de permeación en función de la permeancia, que no es más que el cociente entre la permeabilidad y el espesor de la membrana.

A partir de las permeabilidades (o permeancias) de dos componentes es posible calcular otro de los parámetros característicos de las membranas: la selectividad. La selectividad es la capacidad de separación relativa de la membrana, es decir la velocidad de separación de un gas respecto a otro gas a través de una membrana y unas condiciones determinadas. La selectividad de una membrana para el componente i sobre el componente j se expresa como

$$\alpha_{ij} = \frac{P_i^G}{P_j^G} = \frac{D_i K_i^G}{D_j K_j^G} \quad (\text{Eq. 7.3})$$

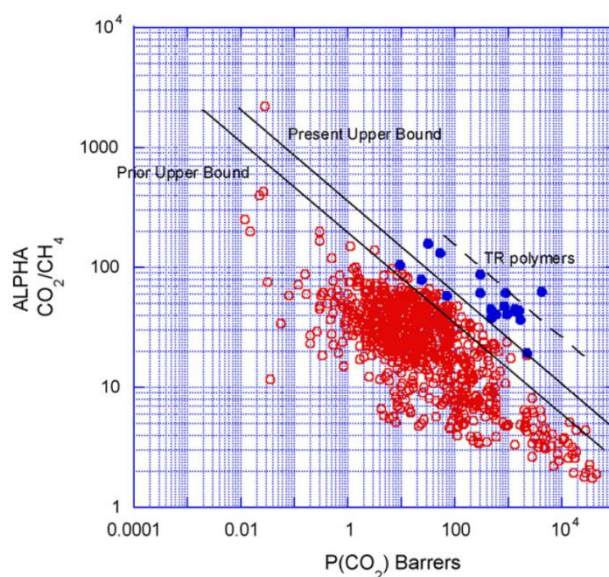
7.2.2. El límite superior de Robeson

En 1991, Robeson publicó varias gráficas para las principales separaciones de pares de gases de interés comercial. Estas gráficas recogían la relación selectividad/permeabilidad de los distintos pares referidas al gas más permeable a partir de datos experimentales recogidos de numerosos materiales para fabricación de membranas. Como resultado de la representación de los puntos, se obtuvo una línea que determinaba los límites de la separación que se podían alcanzar en función de permeabilidad y selectividad. Esta línea, también incluida en la gráfica, se conoce como límite superior de Robeson.

Inicialmente, los materiales eran los polímeros de goma y vítreos conocidos hasta el momento, pero cada vez que un nuevo material se prueba, es susceptible de situarse en la gráfica y observar su posición respecto al límite superior de Robeson. A lo largo de los últimos años, Robeson ha estado recopilando la información sobre nuevos materiales para membranas de SG a partir de aquellos que

ya aparecen en su publicación, obteniéndose el límite superior de Robeson “revisado”, una versión actualizada del original. El objetivo en el desarrollo de materiales es la obtención de membranas que estén por encima de este límite, ya que eso supondrá una mejora en la selectividad y/o en la permeabilidad sin la reducción del otro parámetro.

La gráfica 4 muestra la recta trazada en 1991 y los materiales probados hasta el momento. También aparece la recta revisada, dejando ver que, si bien los nuevos materiales desarrollados son muy reducidos en comparación con la cantidad de polímeros convencionales, sí se ha conseguido mejorar las prestaciones de las membranas. La gráfica 4 está referida a la separación CO_2/CH_4 , pero existen sus análogas para las separaciones O_2/N_2 , H_2/N_2 , H_2/CH_4 , He/N_2 , He/H_2 , He/CH_4 , CO_2/N_2 , N_2/CH_4 , H_2/CO_2 y He/CO_2 .



Gráfica 4. Diagrama de Robeson para separación Dióxido de Carbono/ Metano [27]

7.3. Nuevos materiales de membranas

Desde el año 2000 se ha puesto especial empeño en la investigación y desarrollo de nuevos materiales para las membranas en general y en SG, en particular. Los avances en nuevos materiales están estrechamente ligados en algunos casos con la utilización de los polímeros ya conocidos hasta el momento como base para nuevas combinaciones y, en general, con nuevas técnicas para sintetizar las membranas. Aunque todavía lejos de ocupar un hueco en el mercado, los nuevos materiales están ocupando gran parte del volumen de trabajo en el campo de las membranas, por lo que merecen cierta consideración dentro de la visión general del estado del arte recogido en este trabajo.

Esta línea de investigación está especialmente orientada a solventar los problemas que presentan las membranas poliméricas en cuanto a bajas permeabilidades y selectividades y en cuanto a trabajar bajo condiciones de operación severas (altas temperaturas y ambientes químicamente agresivos).

Los grupos que presentan un mayor potencial son las silicas y las zeolitas dentro de las membranas inorgánicas, y las membranas basadas en carbono, los polímeros reticulados y los materiales de matriz mixta (MMM) dentro del grupo “materiales avanzados”.

La mejora de membranas poliméricas, además de la vertiente en MMM, también se aborda con el desarrollo de Polímeros de microporosidad intrínseca (PIM) y de Polímeros térmicamente reordenados.

Esta línea de investigación también está caracterizada por la especialización de las membranas para mezclas determinadas de gases, y la separación CO_2/CH_4 es relevante en todas las nuevas familias de materiales citadas.

Aunque se han hecho avances, actualmente todavía quedan varios obstáculos que superar: su coste es muy elevado, los procesos de fabricación no son reproducibles de forma fiable, son frágiles, presentan dificultades en el sellado y no se dispone de diseños modulares aptos para su escalado a nivel industrial [26].

7.4. Patrones de flujo

Independientemente de la aplicación, todas las membranas pueden operarse con diferentes patrones de flujo. Esta clasificación se basa en la dirección relativa de los flujos de rechazo y permeado a lo largo de la membrana. Una adecuada selección del patrón de flujo minimizará el efecto negativo de la concentración por polarización, que obstruye el paso de las moléculas a través de la membrana disminuyendo la eficacia de la misma. Los patrones de flujo existentes, esquematizados en la figura 14, son: flujo cruzado, caracterizado por que las direcciones entre rechazo y permeado son perpendiculares entre sí, co-corriente, caracterizado porque rechazo y permeado fluyen paralelos y en la misma dirección, y contra-corriente, caracterizado porque rechazo y permeado fluyen paralelos y en direcciones contrarias. En el caso del flujo a contra-corriente, cuando el permeado es un gas, a veces se introduce un gas de barrido o *sweep gas* en la dirección del permeado que ayude a este a fluir en la dirección deseada.

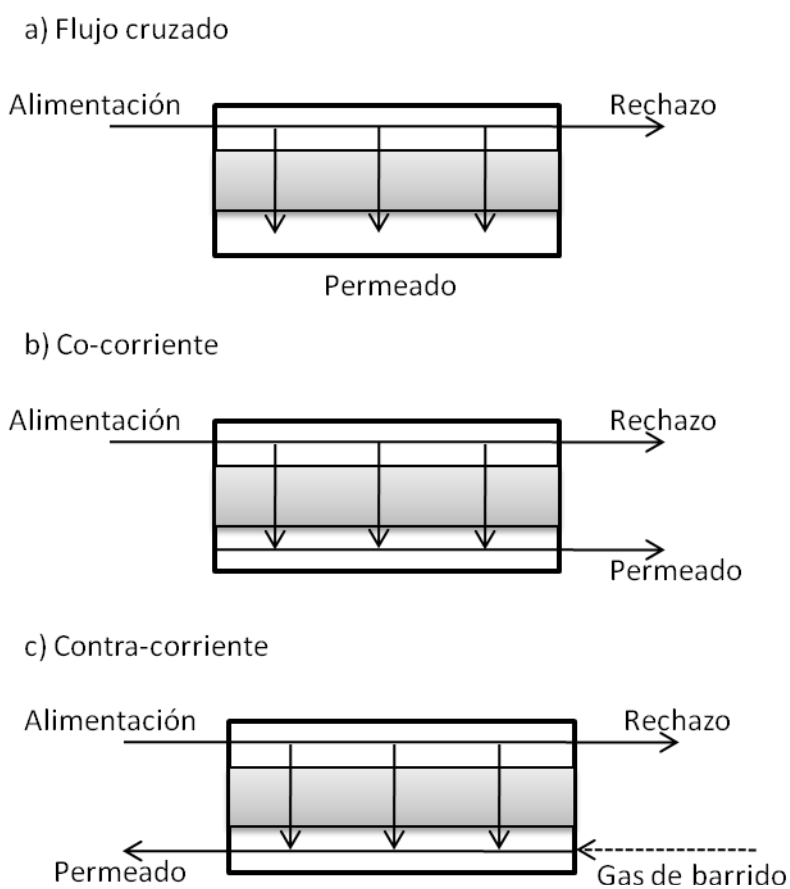


Figura 14. Esquema de los diferentes patrones de flujo existentes

El efecto de la concentración por polarización depende del estado de los fluidos con los que se trabaja. Se trata de un fenómeno bien estudiado en líquidos, en los que su efecto es considerable aunque a escala industrial puede ser controlado mediante un mantenimiento adecuado de las membranas y un buen ajuste de las condiciones de operación. Sin embargo, en el caso de gases (separación de gases y pervaporación), la concentración por polarización es reducida, debido a la elevada velocidad de difusión de los gases.

En separación de gases, el flujo a contra-corriente proporciona mejores resultados que los otros patrones. El más utilizado es el flujo a contra-corriente sin gas de barrido, ya que ofrece muy buenos resultados y tiene una operación más simple [24]. Actualmente, la selección del patrón de flujo, junto con el tipo de módulo, son los factores que se tienen en cuenta para minimizar el efecto de la concentración de polarización, ya que resulta útil y suficiente para reducir la aparición del fenómeno y la implementación de estas medidas es sencilla.

Ya que la concentración por polarización no suele ser un factor determinante en el funcionamiento de los sistemas de separación de gases, existen otros factores más relevantes que han de tenerse en cuenta a la hora de seleccionar el patrón de flujo, por lo que, si bien el flujo en contra-corriente es el más utilizado, en ocasiones es preferible o mandatorio seleccionar otro diferente.

7.5. Módulos de membranas

Los módulos de membranas son las unidades de membranas construidas para la implantación de membranas a escala industrial. Una membrana no es más que una fina capa de un material que permite el paso discriminado de moléculas. Cuando esta capacidad de separación se quiere explotar a nivel industrial, se necesitan áreas de membrana muy elevadas para poder tratar los grandes caudales. A gran escala, el espacio necesario es un factor decisivo, ya que el coste asociado a la utilización del espacio suele ser significativo y/o puede existir una limitación del espacio disponible. Sin embargo, el coste de los módulos de membrana también impacta significativamente en la economía de la planta y debe tenerse en cuenta.

El desarrollo de módulos de membranas que permitan ahorrar espacio y concentrar grandes áreas en volúmenes reducidos y a un coste aceptable siempre ha sido una tarea relegada al ámbito industrial. Aunque la aplicación de las membranas en separación de gases fue descubierta en los años 40, el salto al escalado industrial no se dio hasta los años 60-70 cuando los primeros módulos de bajo coste fueron creados. La ruptura de barrera económica en la fabricación de los módulos fue el hito que impulsó la investigación a pequeña y gran escala en este campo, el cual sigue en auge desde los años 90.

La tabla 5 recopila los diferentes módulos de membranas existentes así como sus principales aplicaciones. A continuación, se profundiza en los módulos utilizados en separación de gases.

Tabla 5. Diversos módulos de membrana y principales aplicaciones de cada uno de ellos

Módulo	Aplicación
De placas o " <i>plate-and-frame</i> "	Pequeña escala, usos específicos. Electrodiálisis, pervaporación, y ósmosis inversa y ultrafiltración con alimentaciones con elevada carga contaminante
Tubular	Ultrafiltración cuando la membrana tiende a ensuciarse rápidamente.
En espiral o " <i>spiralwound</i> "	Ósmosis inversa (desalinización) y ultrafiltración (bajo ensuciamiento: industria alimentaria, agua para consumo humano). Reciente aplicación potencial en pervaporación. Separación de gases.
Fibra hueca o " <i>hollowfiber</i> "	Ósmosis inversa (aguas residuales y aguas salobres), ultrafiltración, pervaporación. Separación de gases.
Módulos vibrantes y/o rotatorios	Ultrafiltración de fluidos muy viscosos y de alto valor añadido. Única utilización cuando ningún otro tipo de membrana funciona.
Membranas sumergidas (biorreactores de membrana)	Ultra y microfiltración de aguas residuales.

Los módulos de placas y tubulares fueron los primeros en aparecer. Actualmente, los módulos en espiral y de fibra hueca ofrecen mejores prestaciones, principalmente, mayor área por unidad de volumen y menor coste por unidad de área; sin embargo, estos primeros módulos todavía son los más adecuados para algunas aplicaciones particulares y por ello se siguen utilizando. Los módulos vibrantes o rotatorios son otro ejemplo de módulos para aplicaciones específicas, que se han desarrollado hace poco tiempo y cuyo coste sigue siendo muy elevado. Las membranas sumergidas han dado un giro al tratamiento de aguas residuales y, aunque también nuevas, son una alternativa de especial interés en EDAR con limitaciones de espacio, y económicamente viables.

En separación de gases, los módulos utilizados son en espiral o fibra hueca. Existen diferentes variantes para cada uno de ellos y su selección depende del sistema existente y de las características de los fluidos y de operación.

7.5.1. Módulos en espiral

La unidad estructural de los módulos en espiral se caracteriza por estar formada por una membrana plana enrollada sobre sí misma y con el tubo colector de permeado como eje. Encima y debajo de esta membrana se colocan espaciadores, capas de materiales impermeables que permiten separar y recoger las corrientes de permeado y rechazo. En el diseño más simple de estos elementos, se utiliza una única capa de membrana, con sus respectivos espaciadores, como se muestra en la figura 15. Sin embargo, este diseño puede resultar en una gran caída de presión en el lado del permeado,

ocasionando problemas en el funcionamiento y eficiencia de la membrana debido al largo recorrido del permeado hasta llegar al colector. La alternativa desarrollada es el diseño multi-capa, en el que se hace uso de varias membranas en lugar de una, superpuestas con los respectivos separadores. De este modo, el permeado llega al colector recorriendo menor distancia y eliminando esa elevada caída de presión. La figura 16 ejemplifica el diseño multi-capa.

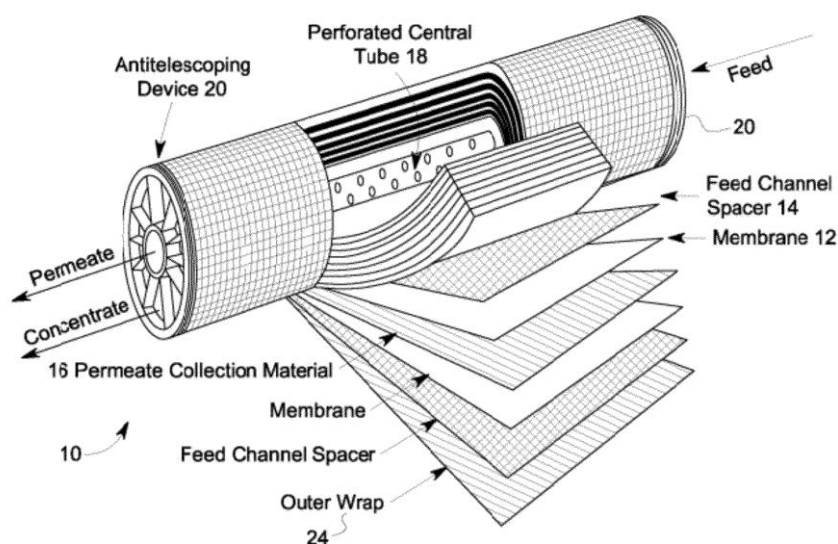


Figura 15. Cartucho de un módulo de membrana en espiral [24]

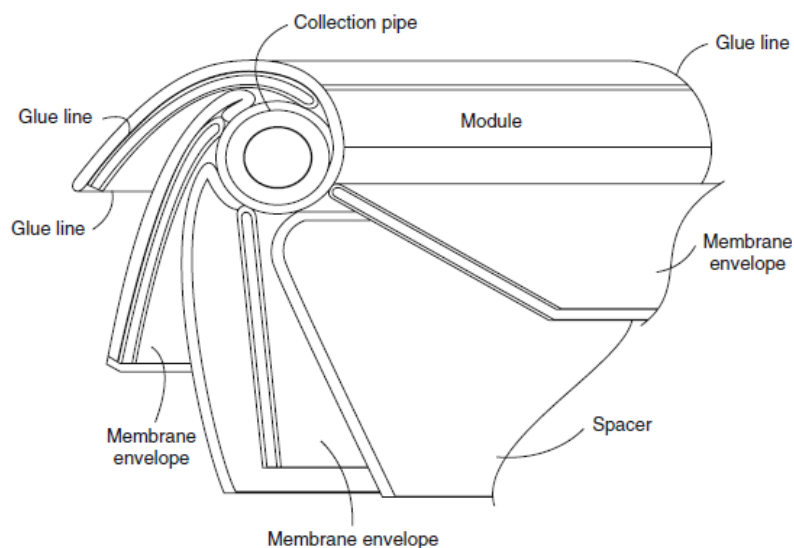


Figura 16. Cartucho de un módulo de membrana en espiral con multicapa [24]

Cada elemento se fabrica con una longitud de 1 m y puede tener diferentes diámetros, variando así el número de membranas utilizadas en el elemento y el área total del módulo. La tabla 6 muestra los diámetros comerciales convencionales y su relación con las demás variables mencionadas.

Tabla 6. Diámetros comerciales convencionales y su respectivo número de membranas y área del módulo

Diámetro (cm)	Número de membranas	Área del módulo (m ²)
10	4-6	3-6
15	6-10	6-12
20	15-30	20-40
40	50-100	80-150

Los elementos anteriores suelen acoplarse en serie dentro de un tubo presurizado y el conjunto es lo que se conoce como módulo en espiral, según se ve en el esquema de la figura 17. Un tubo de 20cm de diámetro puede contener 6 elementos, incrementando el área total hasta 250 m². Los extremos de cada elemento se sellan con un ATD (*antitelescoping device*) para evitar fugas en el módulo. En la figura 18 pueden verse fotografías tanto de los elementos como de los módulos de diferentes tamaños.

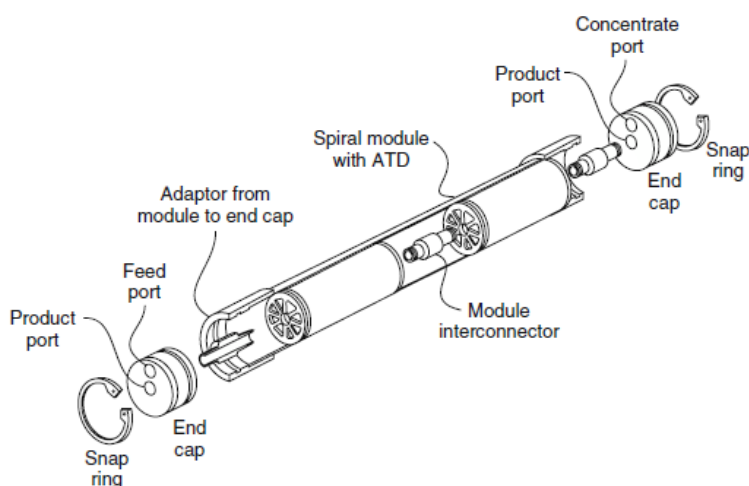


Figura 17. Esquema de un módulo en espiral [24]



Figura 18. Elementos y módulos industriales de membranas en espiral de distintos tamaños [28]

7.5.2. Módulos de fibra hueca

Los módulos de fibra hueca están formados por una carcasa que contiene en el interior numerosas membranas cilíndricas de diámetros muy pequeños. Estas membranas se conocen como fibras huecas, de ahí el nombre del módulo.

En estos módulos, una de las corrientes fluye por el interior de cada fibra y la otra, por el exterior. En base a esto, los módulos pueden ser de dos tipos: con la alimentación en el lado de la carcasa o con la alimentación en el lado de los tubos.

El diseño de alimentación en la carcasa es el más simple. En él, la carcasa se encuentra a presión y los tubos se colocan dentro en forma de haz. Uno de los extremos del haz está sellado y el permeado sale por el extremo abierto, como en el ejemplo (a) de la figura 19. La gran ventaja es que pueden soportar presiones de hasta 70 bar, pero como contrapartida la concentración por polarización puede ser un inconveniente y pueden aparecer problemas de ensuciamiento considerables si existen partículas, aunque podrían solventarse con una filtración previa. Para soportar las elevadas presiones, las fibras suelen tener espesores elevados, de entre 100 y 200 μm para un diámetro típico de 50 μm ; estas se conocen como fibras finas.

El diseño de alimentación en tubos se utiliza para presiones de hasta 10 bar, poco común en separación de gases, pero se reduce considerablemente el problema del ensuciamiento y estos módulos ofrecen un buen control a la concentración por polarización. Como puede verse en el ejemplo (b) de la figura 19, en este diseño ambos extremos del haz de tubos están abiertos, dejando

entrar y salir la corriente alimentación-rechazo. Ya que la parte presurizada son los tubos, la caída de presión debe tenerse en cuenta; para su reducción, las fibras tienen mayores diámetros que en el diseño de alimentación en carcasa, y reciben el nombre de fibras capilares. En esta configuración la ausencia de defectos en las fibras (estructura, longitud, diámetro) es un factor crítico para asegurar la eficiencia del módulo, por lo que su precio se ve encarecido respecto al diseño de alimentación en carcasa.

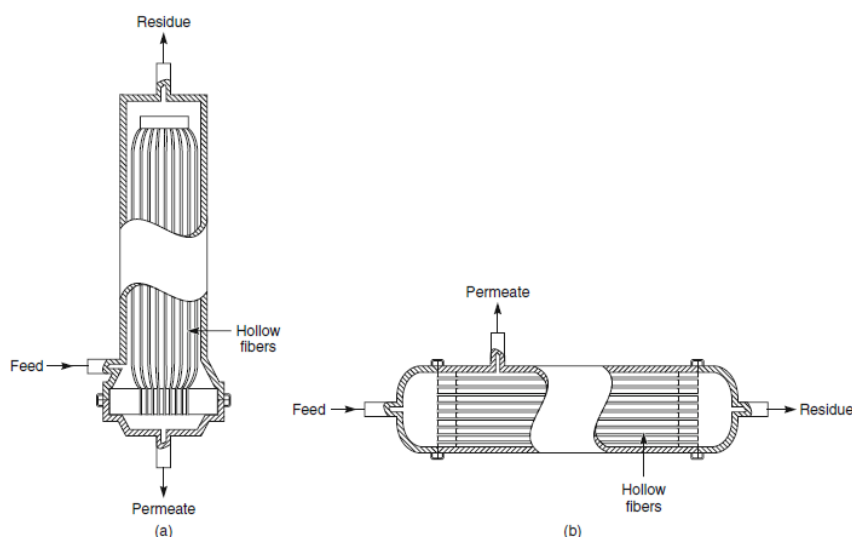


Figura 19. (a) Módulo de fibra hueca con alimentación en tubos y (b) módulo de fibra hueca con alimentación en carcasa [24]

En la tabla 7 aparece la relación entre las características del módulo y su aplicación y tipo de módulo. Destaca el mayor área que se puede compactar por unidad de volumen (capacidad de empaquetamiento) de los módulos de fibra hueca respecto a los módulos en espiral, que puede ser hasta 10 veces mayor para un módulo de iguales dimensiones.

Tabla 7. Relación entre el tipo de módulo y principal aplicación y sus dimensiones características

Módulo/aplicación	Diámetro de las fibras (μm)	Número de fibras (miles)	Área del módulo (m^2)	Densidad de empaquetamiento (cm^2/cm^3)
Alimentación en carcasa / separación de gases y ósmosis a alta presión	100	1000	315	100
Alimentación en tubos / separación de gases a baja presión	250-500	250-40	155-65	50-20
Alimentación en tubos / ultrafiltración	1000-2000	10-2.5	32-16	10-5

Los módulos de la figura 19 muestran patrones de flujo en contra-corriente, pero también pueden diseñarse para flujo en co-corriente. Además, la figura 20 muestra el esquema de un módulo de fibra hueca con patrón de flujo en contracorriente, esta configuración es de especial interés en los casos más severos de concentración por polarización. En la figura 21 puede verse una fotografía de un módulo de fibra hueca con un tramo cortado longitudinalmente, en el que se aprecian las numerosas fibras de membranas que contiene la carcasa.

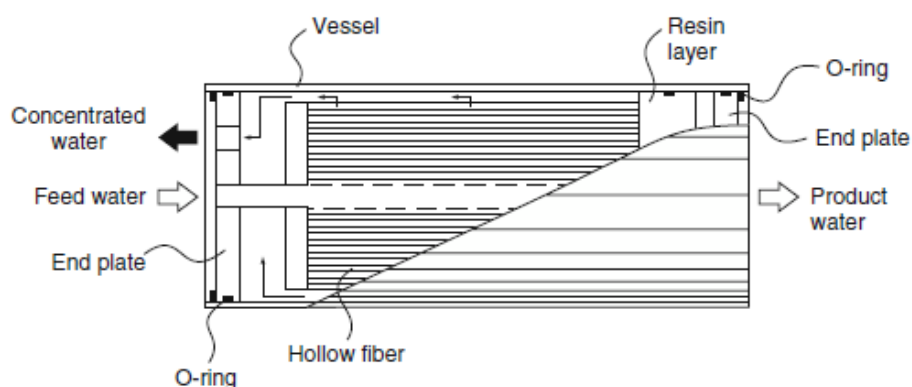


Figura 20. Patrones de flujo en contracorriente [29]



Figura 21. Corte de un módulo de membranas de fibra hueca [30]

7.5.3. Selección del módulo

Para seleccionar el módulo de membrana más adecuado encada caso es necesario tener en cuenta varios factores. Una de las principales diferencias entre los módulos en espiral y de fibra hueca es el

coste por unidad de área, y los primeros son significativamente más caros. Sin embargo, existen otras características que pueden ser tanto o más decisivas a la hora de la selección, comenzando por el caudal a tratar. Aunque los módulos de fibra hueca sean, en general, más baratos, la inversión inicial para su fabricación es más elevada, por lo que su viabilidad económica será factible si su volumen de producción es elevado.

El efecto de la concentración por polarización es menor en los módulos en espiral y otra de las ventajas que presentan es la posibilidad de utilizar un amplio abanico de materiales para su construcción, mientras que los módulos de fibra hueca están hechos de materiales poliméricos. Si bien los polímeros presentan muy buenas propiedades para la separación de gases, la investigación en la utilización de nuevos materiales que sobrepasen los polímeros podría ampliar en el futuro el campo de aplicación de las membranas en espiral allí donde actualmente se utilizan fibras huecas.

Ambos módulos pueden soportar elevadas presiones de trabajo, aunque los de fibra hueca son los más utilizados en este tipo de condiciones, mientras que los de espiral son más usados a bajas presiones o si se aplica vacío.

Otro factor decisivo en la selección del módulo puede ser la resistencia al ensuciamiento. Los módulos en espiral tienen mayor resistencia, por lo que son los utilizados con corrientes muy sucias o en aquellos casos donde la inversión en los módulos sea una alternativa preferible a la inversión en el pre-tratamiento del gas. El biogás no es un gas particularmente sucio y los requisitos de pureza en cuanto a contaminantes para su utilización como biogás enriquecido pueden ser más restrictivos que el factor ensuciamiento en los módulos, por lo que la utilización de módulos de fibra hueca para enriquecimiento de biogás está casi tan extendida como la de los módulos en espiral [24].

7.6. Factores de diseño

En el diseño de membranas se utilizan tres factores para caracterizar el comportamiento del sistema. El primero de ellos ya ha sido introducido en la teoría del modelo de transporte en membranas densas, se trata de la selectividad, que relaciona las permeabilidades de los diferentes componentes y determina cuál es la capacidad de separación relativa de un componente respecto a otro. La selectividad depende del material de la membrana y de la interacción entre este y cada uno de los componentes, pero también depende de la mezcla a separar, ya que las permeabilidades y, por lo tanto, las selectividades, difieren entre los valores ideales calculados a partir de mezclas puras de componentes y los valores obtenidos cuando se utilizan mezclas. Selectividades altas implican buenas separaciones, pero también bajos caudales, y viceversa. Por eso, debe seleccionarse un material que proporcione un buen equilibrio entre selectividad y permeabilidades. La minimización de esta relación inversamente proporcional es uno de los objetivos de la investigación sobre materiales de

membranas y, como se observa en la gráfica 4 de Robeson actualizada, se han descubierto algunos materiales que presentan mejores relaciones que los materiales convencionales.

Otro de los parámetros está relacionado, como ya se podía intuir de la teoría previa, con la presión. Se ha dicho que el gradiente de presión favorece el transporte a través de las membranas. En el diseño, la relación entre las presiones ejercidas a ambos lados de la membrana se expresa como el ratio de presión, que es el cociente entre la presión en el lado del rechazo y la presión en el lado del permeado:

$$\varphi = \frac{p_R}{p_P} \quad (\text{Eq. 7.4})$$

Un mayor ratio de presión implicará un mayor gradiente de concentraciones, lo que mejorará la eficiencia de la separación, sin embargo, muchas veces este valor debe limitarse para que los costes asociados a la creación del gradiente de presiones no se disparen. Las presiones en rechazo y permeado influyen también en los límites de la separación, ya que esta depende de las presiones parciales ajustándose a la siguiente expresión:

$$n_{iR}p_R > n_{iP}p_P \quad (\text{Eq. 7.5})$$

Donde n_{iR} y n_{iP} son las fracciones másicas del rechazo y del permeado, respectivamente. Esta expresión indica que para que haya separación, la presión parcial del componente i en el rechazo deberá ser mayor que la del permeado. Si son iguales, no habría fuerza impulsora. Esta expresión implica que el ratio entre la fracción molar del componente i en el rechazo y la del componente i en el permeado siempre será menor o igual que el ratio de presión. Además, el ratio de presiones está también limitado superiormente por la presión parcial de cada componente, que no puede ser superior a la presión de saturación del respectivo componente inferiormente, por la aplicación de vacío en el permeado.

Por último, el tercer parámetro: el punto de corte o *stage-cut*. El punto de corte es el porcentaje de la alimentación que permea a través de la membrana. Está directamente relacionado con el área de la membrana ya que, a mayor área, mayor caudal atraviesa la membrana. Aumentar el punto de corte es beneficioso para producir mayores flujos, pero a cambio de que una mayor cantidad del componente menos permeable atraviese la membrana. A nivel de proceso, el punto de corte

repercute en la pureza y en la recuperación de componentes, de forma que una mayor pureza del rechazo supondrá mayores pérdidas del componente menos permeable, mientras que si se quiere maximizar la recuperación del componente, en este caso, menos permeable, esta irá acompañada de la obtención de un rechazo menos puro. El punto de corte es importante para obtener un producto de mayor calidad (pureza) pero sin que las pérdidas supongan un problema. Como ya se comentó, las separaciones están limitadas por las características de la membrana en relación con los gases a separar así como por las presiones que se pueden aplicar, por lo que en la selección del punto de corte también debe tener en cuenta que el aumento del área supone un coste añadido y que este aumento puede dejar de ser favorable para el proceso.

7.7. Configuración de los sistemas de membranas

En la mayoría de los casos, una única membrana no es suficiente para alcanzar las especificaciones de la separación requerida (pureza y/o recuperación), por eso, los procesos que utilizan tecnología de membranas cuentan con un sistema de membranas, en el que se integran varias etapas de membranas junto a otros elementos, generalmente compresores, y recirculaciones, para mejorar la eficiencia del sistema y conseguir las corrientes deseadas.

La configuración de las membranas es la parte fundamental del diseño. Otro aspecto importante son los ratios de presión seleccionados, en base a los cuáles se determina la necesidad de compresores para poder elevar la presión de las corrientes que correspondan. La utilización de los productos también influye en el diseño del sistema, ya que determinará las necesidades de pureza de las corrientes de salida.

El sistema más sencillo, después de una única etapa de membranas, es el de dos etapas. Si lo que interesa es purificar la alimentación, el rechazo de la primera etapa será la alimentación de la segunda etapa (figura 22, (a)). Si lo que interesa es obtener una corriente de alta pureza en un componente que permea, la alimentación a la segunda etapa será el permeado de la primera (figura 22, (b)). Es común la recirculación de las corrientes que intermedias y/o de las corrientes finales, para reducir las pérdidas. Las recirculaciones más sencillas se incluyen en la siguiente figura.

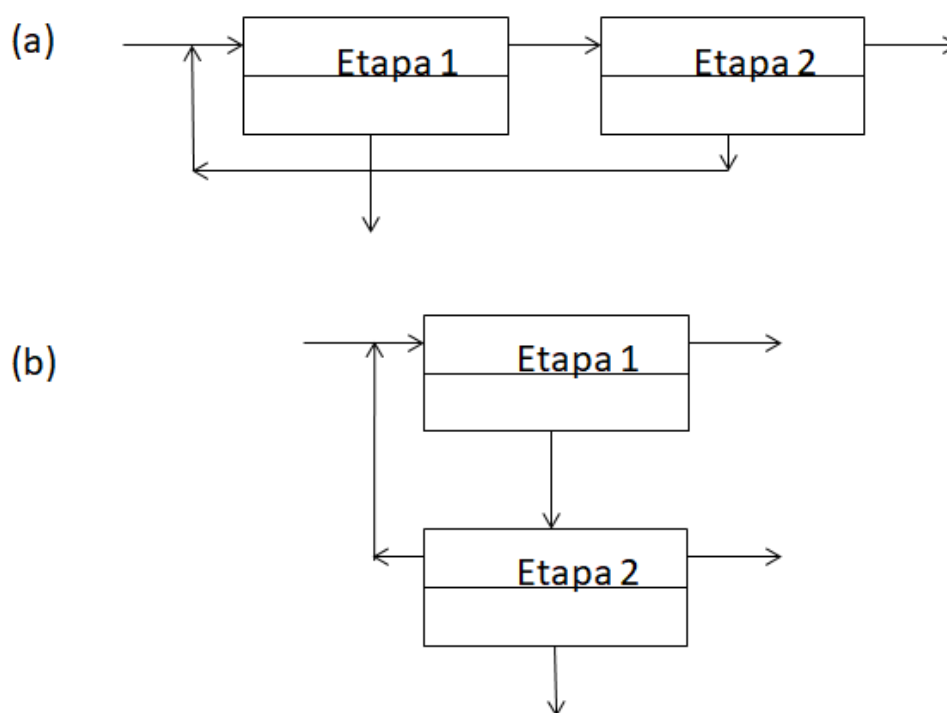


Figura 22. (a) Esquema principal con recirculación cuando lo que interesa es purificar la alimentación y (b) esquema principal con recirculación cuando el interés es obtener una corriente con un permeado de alta pureza

El siguiente tipo de configuraciones serían los sistemas de tres etapas, donde las recirculaciones también juegan un papel vital. En general, cuanto más complejo es el sistema, más exigentes son las especificaciones, por lo que el aprovechamiento de las corrientes intermedias o subproductos cobra más importancia.

El sistema de la figura 23 es conocido como sistema de dos etapas y media, diseñado por Wijmans y Baker, y está indicado para la obtención de permeados muy concentrados. Su característica principal es la particular recirculación de las corrientes de la tercera etapa, que permite recuperar el componente que quiere concentrar y reintroducir la otra corriente en el sistema, minimizando pérdidas.

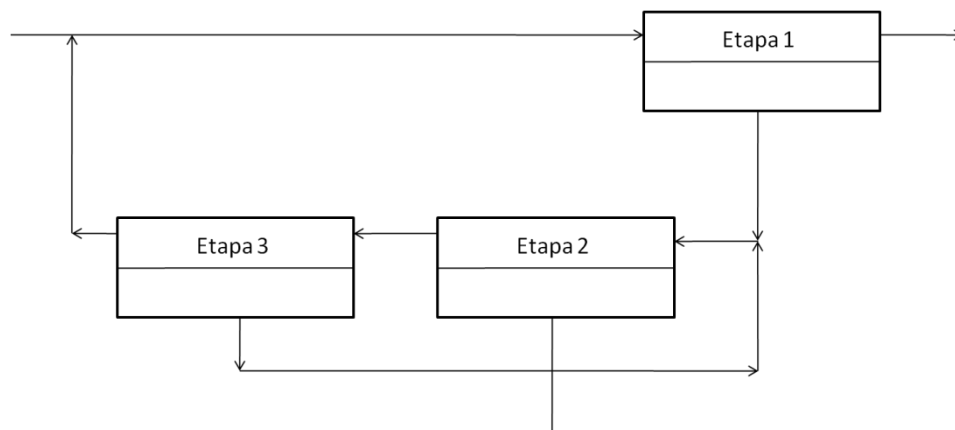


Figura 23. Esquema de la configuración de dos etapas y media con recirculación

En los procesos donde interesa tanto la obtención de un rechazo de alta pureza como la obtención de un permeado también puro, minimizando las pérdidas, se utiliza el sistema de tres etapas de la figura 24. Este es el caso del enriquecimiento de biogás, donde se quiere obtener un biogás muy puro, reducir las pérdidas de metano, el producto principal, y además obtener una corriente de permeado de elevada pureza, para poder utilizarla en las aplicaciones de bio-CO₂.

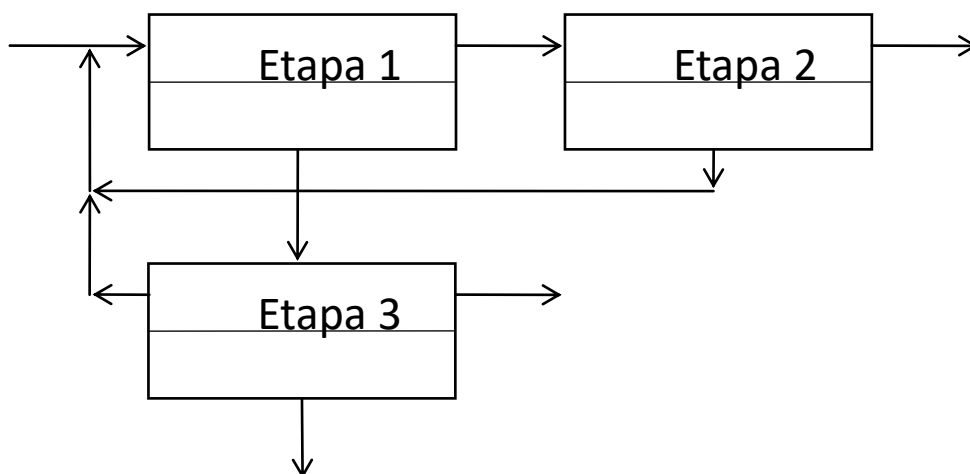


Figura 24. Esquema de la configuración de tres etapas con recirculación

Otra variante del sistema de tres etapas es el que aparece en la figura 25, para la obtención de nitrógeno del aire.

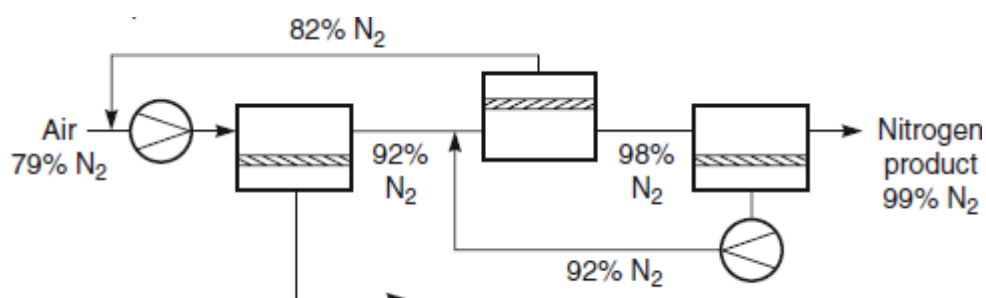


Figura 25. Sistema de tres etapas con recirculación empleado en la obtención del nitrógeno presente en el aire [24]

Dependiendo de la aplicación, se pueden encontrar sistemas de membranas combinados con otras tecnologías, como es el caso de la recuperación de hidrógeno de los gases de purga, esquema representado en la figura 26, la recuperación de hidrógeno en el proceso de refinado de petróleo, figura 27.

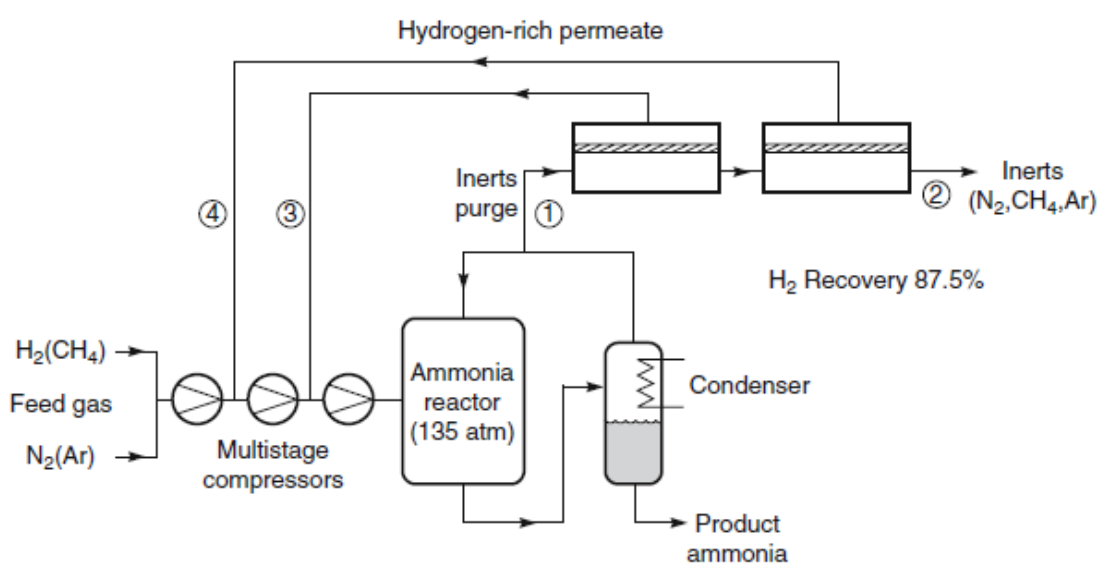


Figura 26. Proceso PRISM para recuperación de hidrógeno en la producción de amoníaco a partir de gas de síntesis [24]

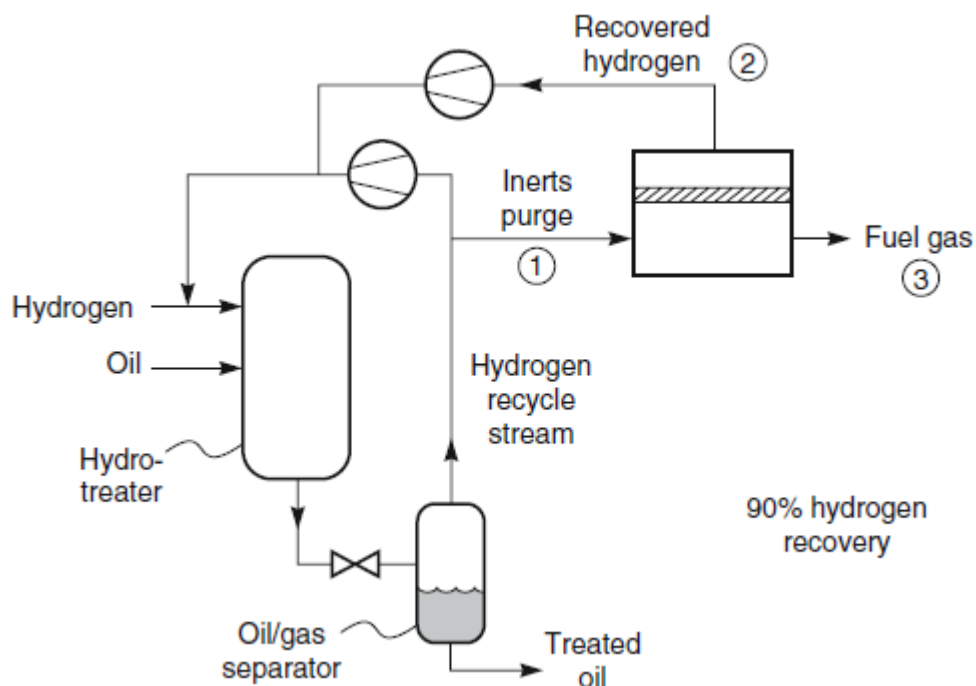


Figura 27. Proceso PRISM para recuperación de hidrógeno en refinería [24]

A escala laboratorio también se prueban nuevos procesos que utilizan la tecnología de membranas de forma integrada con otras tecnologías, como la separación hidrógeno – gas natural mediante membranas y PSA o la combinación de membranas con sistemas criogénicos.

7.8. Fabricantes de sistemas industriales de membranas

Aquí se recogen las diferentes empresas que actualmente comercializan sistemas de membranas para enriquecimiento de biogás. La etapa de pre-tratamiento puede estar incluida o no dentro del sistema. Este apartado no incluye una comparativa económica, sino técnica, para analizar las opciones que existen en el mercado a día de hoy en cuanto a prestaciones.

En las tablas 8,9 y 10 se pueden ver las diferentes empresas que actualmente comercializan este tipo de tecnología junto a las características técnicas de los módulos de membranas, las condiciones de operación del sistema, características de las membranas y de la configuración del sistema.

Tabla 8. Principales características técnicas de diversos proveedores

Proveedor	Origen	Modelo sistema	Características técnicas				
			Pureza BM (%CH ₄)	Pérdidas (%CH ₄)	Pureza CO ₂ (%)	Consumo (kWh/Nm ³ biogás)	Caudal biogás (Nm ³ /h)
Air Liquide	Francia	AL-TL	>98	0,1-0,3	>91,98	0,2-0,25	100-40
DMT	Holanda	Carborex [®] MS	97-99	0,3-0,5	>98	0,22	50-300
Eisenmann	España	-	>97,5	0,5-0,8	>98,5	0,21	100-450
Envitec	Francia	EnviThan [®]	>97	<1	-	0,24	75-450
Gastechnik Himmel GmbH	Austria	BioMem	>97	<1	-	0,2	10-1000
Pentair Haffmans	Francia	Tecnología 1	>97,5	4-5	-	0,26	100-500
		Tecnología 2	>99	0,5-1	-	0,3	100-500
		Tecnología 3	100	0	100	0,33	100-500
Prodeval	Francia	Valopur [®]	>97	<1	>95	0,22-0,28	50-880

Tabla 9. Valores de las condiciones de operación para diversos proveedores

Condiciones de operación			
Proveedor	P (bar)	T (°C)	Disponibilidad
Air Liquide	19 bar	20-40	98%
DMT	8-10 bar	10-40	>96%
Eisenmann	17 bar	25	>95%
Envitec	19	23-28	95%
Gastechnik Himmel GmbH	11 - 17 bar	20-40	97%
	9-21 bar	20-40	-
Pentair Haffmans	19 - 21 bar	20-40	-
	19 - 21 bar	20-40 (-24 CO ₂ Licuadao)	-
Prodeval	11 - 17 bar	15	97%

Tabla 10. Principales parámetros de las membranas de diversos proveedores

Características membranas					
Proveedor	Fabricante de membranas	Material de construcción de las membranas	Tipo de membrana y Dirección del flujo	Configuración etapas membranas	Vida útil membranas (años)
Air Liquide	Air Liquide (Medal*)	Polímero	Fibra hueca Tangencial	2 en serie (c/ recirculación)	15 (garantía 7)
DMT	EvoniK Company (Sepuran® CS2924)	Polímero	Fibra hueca Tangencial	3 en serie (c/ recirculación)	N/A
Eisenman	EvoniK Company (Sepuran® CS2924)	Polímero	Fibra hueca Tangencial	3 etapas en serie-paralelo (c/ recirculación)	3-7
Envitec	Sepuran® (EvoniK Company)	Polímero	Fibra hueca Tangencial	3 etapas en serie-paralelo (c/ recirculación)	(garantía 5)
Gastechnik Himmel GmbH	Sepuran® (EvoniK Company)	Polímero	Fibra hueca Tangencial	3 etapas en serie-paralelo (c/ recirculación)	-
		-	-	2 en serie (c/ recirculación)	10 (garantía 5)
Pentair Haffmans	Pentair Haffmans	-	-	3 en serie (c/ recirculación)	10 (garantía 5)
		-	-	2 en serie (c/ recirculación)	10 (garantía 5)
Prodeval	Sepuran® (EvoniK Company)	Polímero	Fibra hueca Tangencial	3 etapas en serie-paralelo (c/ recirculación)	-

8. Piloto de membranas

8.1. Descripción del piloto

El piloto utilizado en este proyecto está formado por una etapa de pre-tratamiento y una etapa de enriquecimiento de biogás con varias etapas de membranas. En la etapa de pre-tratamiento se elimina ácido sulfhídrico hasta 20 ppm y VOC y siloxanos hasta 5 mg/m³. Para ello se utilizan cuatro filtros de carbón activo conectados en serie. Estos filtros cuentan con una soplante para la inyección de aire en los filtros, mejorando la capacidad de adsorción así como con un sistema de eliminación de condensados. La adición de oxígeno es especialmente recurrente cuando el biogás tiene un contenido alto en sulfhídrico.

En esta etapa también se reduce parte del contenido de agua del biogás, que llega saturado, haciéndolo pasar a través de un separador de condensados.

Tras atravesar los filtros, el biogás se envía a un tanque en el que se mezcla con las dos recirculaciones internas de la etapa de membranas. El biogás mezclado, que resulta un poco más pobre en metano que el biogás de planta, se envía a un compresor para aumentar la presión hasta 16 bar. Cuando el biogás sale del compresor, pasa por una serie de intercambiadores de calor para eliminar más condensados, ya que la formación de agua líquida dañaría las membranas. En primer lugar, el biogás se enfría en unos aerorrefrigeradores y, a continuación, atraviesa dos intercambiadores de calor. En el primero de ellos, el biogás caliente procedente de los aerorrefrigeradores se enfría con el biogás que sale del segundo intercambiador de calor. Tras el segundo intercambiador de calor, los posibles condensados se eliminan dentro de un tanque separador.

Este biogás limpio y a una temperatura ambiente, entra en el sistema como alimentación a la primera etapa de membranas. El sistema de membranas tiene tres etapas que siguen el esquema de la figura 24. Esto permite producir un biometano de calidad apta para su inyección a red, y reducir al mismo tiempo las pérdidas de metano, obteniéndose una corriente de bio-CO₂ con una pureza que lo hace susceptible de ser utilizado como materia prima en varias aplicaciones.

Los equipos del pre-tratamiento se ubican en el exterior, mientras que las membranas van dentro de un contenedor de 6 m de largo. El esquema del proceso completo es el que aparece en la figura 28.

Ya que se trata de un proyecto de investigación, el biogás captado se retornará a planta para no modificar el circuito habitual del biogás en la misma. Como la línea de biometano de planta está a presión atmosférica y el biometano sale a alta presión, es necesario incluir un sistema de regulación

El siguiente paso fue la integración entre los equipos y entre el piloto y la planta depuradora. La integración del piloto es una de las tareas más extensas realizadas, ya que implica la coordinación entre distintas partes. Dentro de la integración, que requiere una parte previa del diseño de las instalaciones y luego la parte de construcción e instalación, se engloba el sistema de regulación de presión descrito anteriormente, las conexiones de captación y retorno del biogás a planta, para las que se ha subcontratado una ingeniería especializada, así como las conexiones con planta para el suministro de los servicios auxiliares necesarios de electricidad y conexión a internet.

Las próximas tareas pendientes son la realización de un estudio ATEX por parte de una empresa especializada, la formación del personal que operará el piloto y la puesta en marcha.

La planificación y evolución de las tareas aparece recogida en el diagrama de Gantt de la figura 29.

		2017				2018
		Sep	Oct	Nov	Dic	Ene
Tareas realizadas	Diseño disposición equipos en planta	■				
	Traslado equipos			■		
	Diseño conexiones captación/retorno biogás	■	■	■		
	Diseño sistema regulación				■	
	Integración	■	■	■	■	
Tareas previstas	Estudio ATEX					■
	Formación					■
	Puesta en marcha					■

Figura 29. Planificación de las tareas a realizar en la fase de instalación de la planta piloto

8.2.1. Definición del plan experimental

El plan experimental se ha definido en base a las especificaciones de metano y dióxido de carbono, para conocer los límites del sistema; en base al consumo energético, para valorarlo y ver qué tendencia sigue al modificar otros parámetros; y en base a la composición inicial del biogás.

El plan experimental albergará las siguientes pruebas en los 16 meses que durará la experimentación:

- Análisis del consumo energético ante variaciones en la pureza de biometano requerida, entre un 94 y un 99; ante variaciones en las pérdidas de metano admisibles (desde un 2 % hasta un 0,5 % o inferior)
- Análisis del consumo energético para variaciones en la composición del biogás desde un 55 a un 80 % de metano.

- Análisis del consumo energético ante fluctuaciones en el caudal de biogás (variaciones del 5 % en un rango de ± 20 % sobre el caudal de operación normal)
- Repetición de parte de la experimentación con membranas nuevas, para comparar la operación entre módulos nuevos y usados en cuanto a parámetros de operación y para realizar un análisis detallado de la composición de la membranas, identificando qué tipo de contaminantes la obstruyen y si coincide en membranas con diferente edad y usos pasados.
- Operación continua en condiciones óptimas para comprobar la robustez del sistema en condiciones reales.
- Pruebas de resistencia y regeneración para conocer la robustez del sistema ante un posible fallo en el pre-tratamiento (entrada de sulfhídrico por encima de los límites establecidos) y comprobar si la capacidad de regeneración se mantiene o disminuye.

9. Análisis de Impacto Ambiental

En este apartado se analiza el impacto ambiental ocasionado durante la realización del presente TFM y se analizan también los factores y el impacto ambiental de los mismos a lo largo del proyecto en el que se engloba el trabajo.

9.1. Descripción general

Este trabajo tiene como objetivo realizar un estudio técnico-económico de la tecnología de membranas para enriquecimiento de biogás. En él, también se incluye la fase de construcción de la planta piloto.

El TFM se desarrolla dentro de un proyecto de investigación cuyo objetivo es la validación de la tecnología de membranas para enriquecimiento de biogás. Tras la fase inicial de construcción y estudio técnico-económico, tendrá lugar la fase de operación, en la que experimentará con la planta piloto y, finalmente, la fase final de desmantelamiento y elaboración de conclusiones para la validación de la tecnología.

9.2. Descripción del entorno

Parte del estudio y de la validación se desarrolla en las oficinas de Cetaqua, mientras que otras tareas se llevan a cabo en la instalación depuradora en la que se ubica la planta piloto. No se observa flora ni fauna especial en los alrededores de la depuradora, que se encuentra en una zona industrial, alejada de viviendas y relativamente aislada, con comunicación por carretera.

9.3. Efectos identificados e impactos asociados

Se considera que las tareas llevadas a cabo en oficina no constituyen efectos con un impacto ambiental negativo. Para las fases relacionadas con la planta piloto, sí se identifican diferentes efectos.

En la fase de construcción se incluye el traslado y la instalación de equipos y auxiliares. En ella, se identifican como efectos que pueden causar un impacto ambiental negativo la emisión de gases y partículas contaminantes debido al transporte de los equipos y la generación de partículas, polvo y derivados del montaje de la planta piloto. El impacto ambiental asociado a estos efectos es la contaminación atmosférica. Otro efecto derivado del transporte y montaje de la planta piloto es la

generación de residuos sólidos (papel y cartón procedentes de cajas y embalajes), cuyo impacto ambiental es el aumento de los residuos.

En la fase de operación, la operación normal de la planta tiene como efecto la generación de residuos sólidos (carbón activo), que pueden derivar en la contaminación del entorno si no se gestionan adecuadamente. Sin embargo, durante esta fase también pueden tener lugar fugas de gas, cuyo impacto ambiental sería la contaminación atmosférica. En el caso de una sobrepresión en el sistema, las válvulas de seguridad enviarían el gas al exterior, contribuyendo también a la contaminación atmosférica.

En la fase de desmantelamiento, el desensamblado de los equipos y piezas y su transporte son los efectos que generan la contaminación atmosférica.

No se considera que haya un impacto sobre el paisaje, dado que se trata de una planta pequeña ubicada en una zona ya adecuada y que, tras el desmantelamiento de la planta, retornará al estado inicial.

Tampoco se considera contaminación acústica, ya que el piloto no hace ruido y, en cualquier caso, el ruido existente proviene de las instalaciones de la depuradora.

Se genera como residuo el agua eliminada por condensación, que no es contaminante, mientras que no se generan emisiones gaseosas porque el biogás que se enriquece se retorna a planta en las mismas condiciones. EL único residuos derivado de la operación normal es el carbón activo una ve saturado.

9.4. Medidas preventivas y/o correctoras

Para eliminar o minimizar los impactos ambientales identificados se proponen varias medidas preventivas y/o correctoras. Para prevenir o minimizar la contaminación atmosférica por partículas y polvo, se recomienda establecer y seguir unos protocolos de limpieza adecuados.

En el caso de los residuos sólidos papel y cartón, llevarlos a sus contenedores correspondientes para su reciclaje. En cuanto al carbón activo saturado, este deberá almacenarse debidamente hasta su entrega a un gestor autorizado para este tipo de residuos.

Un buen control y mantenimiento de la operación prevendría la aparición de fugas, evitando así la contaminación atmosférica por emisiones puntuales.

Impacto ambiental de la implantación de la tecnología de membranas

Este trabajo se engloba dentro de un proyecto de validación tecnológica, lo que podría resultar a largo plazo en la implantación industrial del proceso. Por eso, es interesante destacar que, de ser así, el uso de la tecnología de membranas para *upgrading* de biogás permitiría reducir las emisiones de GEI al utilizarse el biometano como sustituto (parcial) del gas natural. Además, la corriente de CO₂ generada sería susceptible de utilizarse como input en otros procesos o podría destinarse a CCS (Captura y Secuestro de Carbono), reduciéndose también las emisiones respecto al uso del biogás como combustible en lugar de su transformación en biometano. Podría considerarse que, globalmente, el potencial impacto ambiental de la tecnología de membranas aplicada al enriquecimiento de biogás sería positivo.

10. Análisis económico

10.1. Casos de estudio

La rentabilidad de la tecnología de membranas aplicada al *upgrading* de biogás depende principalmente de dos factores: de la capacidad de la instalación y de la aplicación del producto.

Las instalaciones de enriquecimiento de biogás se ven afectadas por la economía de escala, haciendo que la inversión por m³ de biogás tratado se reduzca a medida que aumenta la capacidad de la planta, hasta que esta relación inversión – capacidad se mantiene prácticamente constante a partir de los 1000 Nm³/h de biogás. El rango de capacidades de las plantas de enriquecimiento de biogás con tecnología de membranas puede variar desde decenas hasta miles de Nm³/h de biogás tratados y este parámetro vendrá definido por el tamaño de la depuradora cuyo biogás es enriquecido. Las depuradoras españolas son relativamente pequeñas, por lo que es más interesante realizar el análisis económico sobre instalaciones de capacidades inferiores a los 1000 Nm³/h. Además, varias instalaciones de este tipo repartidas por el resto de Europa tienen capacidades superiores a los 1000 Nm³/h con lo que los costes asociados a altas capacidades se conocen mejor que en el caso de capacidades bajas. Teniendo esto en cuenta, se han seleccionado tres escenarios a estudiar en función de la capacidad de la instalación en el rango de 10 a 1000 Nm³/h de biogás, relacionándose con caudales de biogás generados en tres depuradoras catalanas. Escenario de baja capacidad, con un caudal de biogás de 50 Nm³/h; un ejemplo de estación depuradora de baja capacidad es la EDAR de Riu Ripoll (Sabadell), con una producción de biogás de 100 Nm³/h proveniente del tratamiento de aguas residuales con una capacidad de 180.000 habitantes equivalentes. Escenario de capacidad media, con una producción de 300 Nm³/h de biogás; estación depuradora similar es la de Terrassa, con una capacidad de tratamiento de 400.000 habitantes equivalentes. Por último, escenario de alta capacidad de 700 Nm³/h de biogás tratados, podría ser un ejemplo de ella la EDAR del Prat, que tiene una capacidad de tratamiento de 1.700.000 habitantes equivalentes [31].

La aplicación del producto determinará los beneficios generados, ya que el precio de venta del biometano es diferente en función de su destino final. Para realizar el análisis económico, se evaluarán tres opciones de uso de biometano: inyección a la red de distribución de gas, venta como biometano comprimido para uso vehicular y venta como biometano licuado para uso vehicular. En los casos de aprovechamiento como biocombustible, se ha tomado como referencia la utilización de una flota de autobuses cuya capacidad dependerá del biogás disponible. Se considera que esta flota sería proporcionada por entidades gubernamentales para su utilización en el transporte urbano, por lo que su coste y el análisis del mismo quedan fuera del alcance del trabajo.

10.2. Costes

En este apartado se desglosan los costes CAPEX y OPEX de cada caso base estudiado. Dentro de cada uno, también se diferencia entre los costes asociados a la planta de pre-tratamiento y enriquecimiento de biogás, también llamada planta de *upgrading*, costes asociados a la instalación para inyección, costes asociados a la instalación para producción y venta de biometano comprimido o BCM y costes asociados a la instalación para producción y venta de biometano licuado o BML.

En la tabla 11 aparece un desglose de los posibles costes que pueden existir en un proyecto de carácter industrial y se indica la distribución de costes que aplica a cada una de las etapas de los diferentes casos base [32].

Tabla 11. Desglose con los costes asociados a un proyecto industrial

	Planta upgrading	Etapas inyección	Estación BMC c/compresión	Licuefacción	Estación BMLs/licuefacción
CAPEX					
Capital fijo					
Costes directos					
Coste equipos	sí	sí	sí	sí	sí
Instalación equipos (incluye soportes, obra civil menor)	sí	sí	sí	sí	sí
Tuberías (incluye aislamiento y pintura)	sí	sí	sí	sí	sí
Electricidad, potencia e iluminación	sí	sí	sí	sí	sí
Instrumentación y sala de control	sí	sí	sí	sí	sí
Edificios y estructuras de proceso	sí	sí	sí	sí	sí
Edificios	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

auxiliares (oficinas, laboratorio, taller)					
Almacén (materia prima, producto acabado)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Servicios y utilidades (vapor, agua, aire, contraincendios)	sí	n/a	sí	sí	sí
Terreno y adecuación del terreno	sí	sí	sí	sí	sí
Costes indirectos					
Diseño e ingeniería	sí	sí	sí	sí	sí
Contratista	sí	sí	sí	sí	sí
Contingencias	sí	sí	sí	sí	sí
Capital circulante					
Puesta en marcha	sí	sí	sí	sí	sí
Consumibles	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Materias primas (e intermedias)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Inventario inicial de producto acabado	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Fondos pagos iniciales a proveedores	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
OPEX					
Costes fijos					
Mantenimiento (mano de obra y materiales)	sí	sí	sí	sí	sí

Mano de obra	sí	sí	sí	sí	sí
Laboratorio	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Supervisión	sí	n/a	sí	sí	sí
Gastos generales	sí	sí	sí	sí	sí
Impuestos sobre el capital	n/a (*)	n/a (*)	n/a (*)	n/a (*)	n/a (*)
Impuestos locales	n/a (*)	n/a (*)	n/a (*)	n/a (*)	n/a (*)
Seguros	sí	Sí	sí	sí	sí
Licencias, royalties (patentes, PI)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Costes variables					
Materias primas	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Miscelánea materiales de operación (EPI, ropa, limpieza de la instalación)	sí	Sí	sí	sí	sí
Servicios y utilidades (vapor, agua, aire, contraincendios)	n/a	n/a	n/a	sí	n/a
Shipping y packaging	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Consumo energético	sí	sí	sí	sí	sí
Consumibles	sí	n/a	n/a	n/a	n/a

(*) No se indican aquí porque se incluyen en el análisis económico

Un método empleado comúnmente, basado en el desglose de la tabla 11, es la estimación del coste total de la instalación a partir de la estimación inicial del coste de los equipos. Este método es adecuado cuando no se tienen datos de partida y se trata de procesos conocidos y bien estudiados.

Sin embargo, tanto el enriquecimiento de biogás con tecnología de membranas como sus aplicaciones en inyección en red o biocombustibles son procesos relativamente novedosos, por lo que la estimación económica se ha hecho partiendo de bibliografía especializada sobre este tipo de instalaciones, considerándose esta metodología la más adecuada para obtener resultados más precisos.

En los siguientes apartados se recogen las bases a partir de las cuáles se han calculado CAPEX y OPEX. Finalmente, se recogen los costes totales calculados para cada caso base.

Teniendo en cuenta el tipo de proyecto y de proceso, existen varios costes que no aplican, independientemente del caso estudiado. Los edificios auxiliares tales como taller, laboratorio u oficinas no serán necesarios dado que la instalación comparte estos servicios con la depuradora. Dentro de Capital circulante, únicamente tendrá coste asociado la puesta en marcha, ya que los demás conceptos no aplican. En este proyecto no aplican tampoco el pago de Royalties, licencias, etc. ni el concepto *shipping* y *packaging*. Además, los impuestos sobre el capital, el Impuesto sobre Sociedades u otros impuestos locales se tienen en cuenta en el estudio económico posterior.

10.2.1. Costes de la planta de pre-tratamiento y enriquecimiento de biogás

Si bien la mayoría de instalaciones se construyen partiendo de que cada equipo es una unidad independiente que debe diseñarse, construirse, incluir el sistema de control, etc., el proceso de *upgrading* de biogás se construye actualmente de forma modular. Esto implica que los proveedores de esta tecnología ofrecen sistemas de *upgrading* de biogás que incorporan en un único módulo todos los equipos, conexiones e instrumentación del sistema de control correspondientes a la etapa de enriquecimiento con membranas. Generalmente, estos módulos se instalan de forma compacta dentro de un contenedor industrial.

Muchos de los proveedores de la tecnología de membranas también suministran la etapa de pre-tratamiento del biogás, adaptándola a las necesidades del sistema de membranas. De forma análoga, los sistemas de pre-tratamiento incluyen los equipos y las conexiones entre estos y entre ambas etapas y la instrumentación del sistema de control. Al tratarse de “sistemas” compuestos por varios equipos, cada uno cuenta también con su propio sistema de control.

Esta construcción modular implica que los costes asociados a la adquisición de dichos módulos no se encuentren desglosados, aunque sí se especifica qué costes se incluyen en cada cuantía.

Para la estimación de costes de la planta de *upgrading* se han utilizado los costes base que aparecen a continuación, según la capacidad de la planta.

Tabla 12. Datos base para estimación de costes de la planta de upgrading según capacidad de la planta

Caudal de biogás tratado		CAPEX	Consumo eléctrico	Consumo carbón activo	Mantenimiento anual preventivo + hot-line	Mantenimiento correctivo 2400-3200 h
(Nm ³ /h mín)	(Nm ³ /h máx)	(€)	(kW/Nm ³)	(kg/año)	(€/año)	(€/año)
50	50	680.00	0,35	1.000	26.000	8.000
300	350	1.060.000	0,29	3.000	34.000	17.000
700	700	1.625.000	0,28	5.000	38.000	20.000

El CAPEX incluye equipos, tuberías, transporte, puesta en marcha y training. Se asume terreno disponible dentro de la planta, por lo que los costes de compra/alquiler no aplican. En cuanto a la adecuación del terreno, se considera la construcción de una losa de hormigón para nivelarlo. El precio base de la losa es de 70 €/m². Se consideran las siguientes superficies ocupadas por la instalación, de menor a mayor capacidad: 88, 114,4 y 140,8 m², partiendo de la superficie en la que se ubica el piloto de enriquecimiento de membranas del proyecto COSIN.

El OPEX tiene en cuenta mantenimiento preventivo y correctivo con mano de obra y piezas incluidas, así como el coste del carbón activo para una concentración de H₂S en el biogás de entrada de 200 ppm. El coste del carbón activo incluye precio de compra de 2 €/kg y precio por disposición adecuada como residuo de 1 €/kg, asumiendo almacenamiento adecuado hasta su recogida por arte de una empresa especializada en su tratamiento como residuo.

En este proceso tampoco es necesario el almacenamiento de “materia prima” ni de “producto acabado”, ya que la planta se ajusta en cada momento al caudal de biogás producido en la depuradora y todo el biometano obtenido en el upgrading se envía a la siguiente etapa, ya sea la estación de inyección o la estación de repostaje de BMC o BML. Esto mismo aplica también a las etapas posteriores de acondicionamiento y transporte, inyección y estaciones de servicio: la materia prima viene determinada aguas arriba de la instalación y no se considera su almacenamiento. Así mismo, para disponer de los servicios y auxiliares necesarios, se realizará una conexión desde la planta depuradora.

10.2.2. Costes de la etapa de inyección

La etapa de inyección comienza en el punto de salida del biometano de la etapa de upgrading e incluye el transporte y acondicionamiento del gas hasta el puesto de inyección. Los costes directos incluyen obra civil menor, tuberías, instrumentación del sistema de control, conexionado, odorización y control calidad para inyección o *metering*, mientras que en los costes de operación se estiman en un 8 % sobre el CAPEX, considerado el mantenimiento, consumo energético de los equipos y coste de auxiliares para odorización y *metering*.

10.2.3. Costes de la estación de biometano comprimido

La estación de biometano comprimido incluye la compresión del biometano en la propia instalación, su almacenamiento temporal hasta que los vehículos reposten el biocombustible y el transporte de tubería desde la salida del biometano de la etapa de upgrading hasta su entrada en la propia estación [33].

10.2.4. Costes de la estación de biometano licuado

La estación de biometano licuado incluye el transporte del biometano a la planta de licuefacción, la propia licuefacción y los costes de almacenamiento temporal. Destaca que el biometano en este caso se transporta comprimido y la licuefacción se ubica al lado de la metanación, ya que el transporte como gas licuado solo es económicamente viable para grandes cantidades y distancias [34].

10.2.5. Capacidad de las estaciones de repostaje

Como referencia para calcular la capacidad de las plantas de repostaje de BMC y BML, se ha seleccionado el autobús como vehículo para utilizar el combustible. Para simplificación del estudio, se ha considerado que los costes asociados a la flota de autobuses no se incluyan y que se plantee el estudio como si estos formasen parte de la flota de autobuses urbanos, seleccionándose así un sistema de suministro de biocombustible en horario nocturno restringido a 10 horas [35].

Los datos relativos a consumo y necesidades de repostaje de un autobús estándar aparecen esquematizados en la figura 30. A partir de estos, se han calculado el número de autobuses a los que se podría dar servicio según la capacidad y las capacidades necesarias en las estaciones de repostaje, para abastecer a los autobuses asumiendo que los vehículos acuden a repostar de forma alternativa en lugar de acudir todos el mismo día; estos cálculos aparecen en la tabla 19.



Figura 30. Esquema con los datos relativos a consumos de autobuses urbanos utilizados en el análisis económico

Tabla 13. Capacidades de suministro de las estaciones de repostaje en función de la capacidad de la planta de producción de biometano

Caudal de biogás tratado (Nm ³ /h)	Nº buses urbanos / año	BMC		BML	
		Nº mínimo buses repostando /día teórico	Cap. Suministro máx. nec. (m ³ BMC/h)	Nº mínimo buses repostando /día	Cap. Suministro máx. nec. (m ³ BML/h)
50	5	3	0.45	1.00	0.15
300	34	17	2.55	5.00	0.75
700	80	40	6.00	12.00	1.80

10.3. Resultados y análisis de resultados

Los resultados presentados son los costes CAPEX y OPEX para cada caso de estudio así como los parámetros económicos que permiten determinar la rentabilidad de un proyecto a lo largo del tiempo. Los cálculos intermedios están recogidos en el [Anexo B](#) de este trabajo para facilitar la lectura del mismo.

Las densidades del biometano en las diferentes condiciones (condiciones normales, comprimido, licuado) aparecen en la tabla 14.

Tabla 14. Densidades del biometano a distintas condiciones de presión y temperatura

	kg/m ³	Condiciones
BM	0,718	1 atm, 0°C
BMC	161,6	250 bar, 25 °C
BML	460	1 atm, -161 °C

10.3.1. Costes

Tabla 15. Costes de limpieza y upgrading para las capacidades estudiadas

Caudal de biogás tratado Nm ³ /h	Costes	
	Planta limpieza y upgrading	
	CAPEX	OPEX
50	729,100	49,600
300	1,256,080	136,212
700	2,090,560	244,696

Tabla 16. Costes de la etapa de inyección para las capacidades estudiadas

Caudal de biogás tratado Nm ³ /h	Uso del biometano	Costes inyección	
	Inyección	CAPEX	OPEX
50	CASO A1	311,750	24,940
300	CASO B1	319,250	25,540
700	CASO C2	332,917	26,633

Tabla 17. Costes del acondicionamiento y de la estación de repostaje de BMC

Caudal de biogás tratado Nm ³ /h	Uso del biometano	Costes BMC			
		Acondicionamiento y transporte		Estación de repostaje	
	BMC	CAPEX	OPEX	CAPEX	OPEX
50	CASO A2	28,750	2,300	231,205	28,625
300	CASO B2	36,250	2,900	245,452	67,993
700	CASO C2	49,917	3,993	268,850	130,749

Tabla 18. Costes del acondicionamiento y de la estación de repostaje de BML

Caudal de biogás tratado Nm ³ /h	Uso del biometano	Costes BML			
		Acondicionamiento y transporte		Estación de repostaje	
	BMC	CAPEX	OPEX	CAPEX	OPEX
50	CASO A3	124,299	124,504	450,000	64,170
300	CASO B3	609,543	147,027	500,000	389,160
700	CASO C3	1,387,601	183,062	550,000	883,890

Tabla 19. Resumen de los costes totales para cada una de las alternativas de uso del biometano y diferentes capacidades

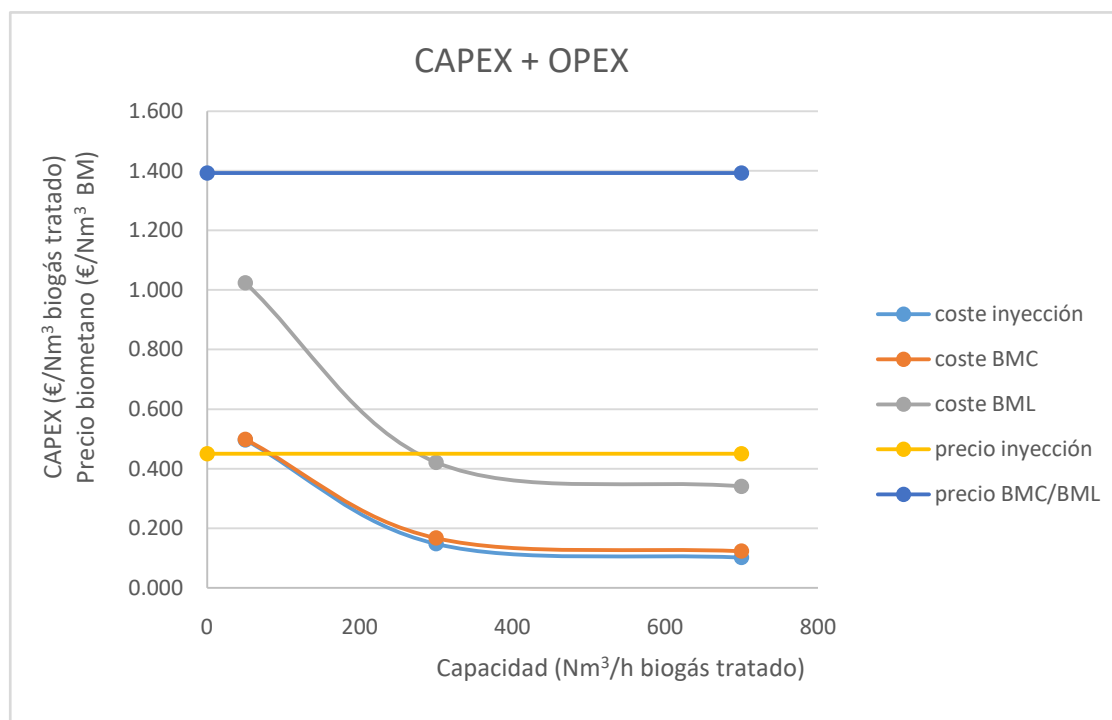
Caudal de biogás tratado (Nm ³ /h)	Costes totales					
	Inyección		BMC		BML	
	CAPEX (€)	OPEX (€/año)	CAPEX (€)	OPEX (€/año)	CAPEX (€)	OPEX (€/año)
50	1,040,850	74,540	989,055	80,525	1,303,399	238,274
300	1,575,330	161,752	1,537,782	207,105	2,365,623	672,399
700	2,423,477	271,329	2,409,327	379,438	4,028,161	1,311,648

Tabla 20. Costes CAPEX y OPEX totales para cada aplicación y capacidad expresados por unidad de volumen

Caudal de biogás tratado (Nm ³ /h)	Costes totales					
	Inyección		BMC		BML	
	CAPEX (€/Nm ³)	OPEX (€/Nm ³)	CAPEX (€/Nm ³)	OPEX (€/Nm ³)	CAPEX (€/Nm ³)	OPEX (€/Nm ³)
50	0.289	0.207	0.275	0.224	0.362	0.662
300	0.073	0.075	0.071	0.096	0.110	0.311
700	0.048	0.054	0.048	0.075	0.080	0.260

Tabla 21. Coste unitario del biometano por unidad de volumen según capacidad y aplicación

Caudal de biogás tratado (Nm ³ /h)	Inyección	BMC	BML
	CAPEX + OPEX (€/Nm ³)	CAPEX + OPEX (€/Nm ³)	CAPEX + OPEX (€/Nm ³)
50	0.496	0.498	1.024
300	0.148	0.167	0.421
700	0.102	0.123	0.340



Gráfica 5. Gráfica de costes totales CAPEX + OPEX unitarios en función de la capacidad de planta y punto de corte con el precio unitario del biometano

Se observa un aumento del precio con la capacidad, pero en la tabla 21 se puede ver que el coste por metro cúbico de biogás tratado (que es directamente proporcional al biometano producido ya que se considera la misma separación en todos los casos), disminuye con el aumento de la capacidad. También puede verse que esta diferencia es más acusada en las plantas de baja capacidad.

La tabla 20 deja ver que CAPEX y OPEX son muy similares en inyección, para el BMC, existe cierta diferencia a medida que se aumenta la capacidad, mientras que para BML la diferencia económica es todavía más acusada. Además, CAPEX y OPEX en inyección y BMC son similares, mientras que para BML, estos son del doble en baja capacidad, y del triple, para capacidades mayores. Esto indica que la opción planteada de licuar el biometano es cada vez más cara al aumentar la capacidad. Esto concuerda con que, como ya se ha demostrado, el BML es un proceso adecuado cuando se tienen grandes capacidades, por lo que el esquema planteado no sería el más adecuado. Teniendo en cuenta que el precio de biometano para inyección es inferior a la mitad del precio de BMC y BML, se observará una gran diferencia en cuanto a rentabilidad económica entre la inyección y el BMC.

En la gráfica 5 también se ve que el precio actual del biometano para inyección es algo bajo y por eso a capacidades muy bajas se tendrían pérdidas. Sin embargo, en el caso del coste de BMC y BML, este precio sí permite obtener rentabilidades mayores. Si el BM de inyección se vendiese al precio del

BMC, la inyección podría ser económicamente viable en plantas de baja capacidad, pero con el precio actual, esto solo sería posible a partir de 100 Nm³/h antes.

10.3.2. Parámetros económicos

Los parámetros económicos utilizados en el análisis son el VAN, el TIR y el Payback. Para los cálculos se han tomado los siguientes valores como referencia: vida útil de la planta de 10 años, con un valor residual de cero y sobre la que se aplica un 30 % de impuestos sobre el BAT, teniendo en cuenta el Impuesto de Sociedades así como otros tipos de impuestos que puedan aplicar, como impuestos locales específicos. Se han considerado una inflación anual del 2 % y una tasa de descuento o actualización del 3 %. En cuanto al préstamo, se ha considerado una financiación del 40 % de la inversión inicial, que es directamente el CAPEX calculado, a devolver en cinco años y con una tasa de interés anual de un 7,8 %.

Para el precio del biometano para inyección en red se ha considerado 25,95 €/MW, teniendo en cuenta un que el poder calorífico medio del biometano está marcado por la legislación en 11,76 kWh/Nm³. El precio para el biometano como combustible vehicular es de 0.8084 €/kg tanto para BMC como BML.

Por otro lado, se han considerado dos métodos de financiación distintos: financiación interna y financiación externa a través de un préstamo bancario. El motivo radica en que este estudio económico se realiza sobre un proceso que todavía se encuentra en desarrollo, probándose a escala semi-industrial, pero que es susceptible de comercialización.

Los centros tecnológicos, como en el caso de Cetaqua, son los responsables de llevar a cabo estas pruebas y determinar la viabilidad económica del proceso. En estos casos, se presentan los resultados para atraer a los clientes potenciales y continuar con el desarrollo de la tecnología. Esto implica que no se pueda conocer el tipo de financiación que tendrá el cliente, por lo que se considera el caso más favorable, donde la totalidad de la financiación procede de capital interno del propio cliente.

Sin embargo, es habitual que al menos parte de la financiación sea externa, por lo que es interesante comparar la viabilidad económica de los mismos procesos en función del tipo de financiación. Para representar esta opción, se ha seleccionado un tipo de financiación común como lo es el préstamo bancario. Para calcular las cuotas para la devolución del préstamo se ha utilizado el Método francés, cuyos cálculos asociados también se pueden consultar en el [Anexo B](#).

Tabla 22. Ingresos por ventas calculados para inyección

Caudal de biogás tratado	Inyección		
	CAPEX (€)	OPEX (€/año)	Ingresos por ventas (€)
50	1,040,850	74,540	68,664
300	1,575,330	161,752	411,982
700	2,423,477	271,329	961,292

Tabla 23. Parámetros económicos calculados para inyección sin préstamo

Caudal de biogás tratado Nm ³ /h	Uso del biometano	VAN	TIR	Payback
	Inyección			
50	CASO A1	- 822,426.08 €	-	-
300	CASO B1	434,943.99 €	8%	7
700	CASO C2	2,650,814.31 €	20%	5

Tabla 24. Parámetros económicos calculados para inyección con préstamo

Caudal de biogás tratado Nm ³ /h	Uso del biometano	VAN	TIR	Payback
	Inyección			
50	CASO A1	- 889,191.14 €	-	-
300	CASO B1	333,894.85 €	7%	8
700	CASO C2	2,495,361.02 €	19%	5

Tabla 25. Ingresos por ventas calculados para BMC

Caudal de biogás tratado	BMC		
	CAPEX (€)	OPEX (€/año)	Ingresos por ventas (€)
50	989,055	80,525	130,597
300	1,537,782	207,105	783,582
700	2,409,327	379,438	1,828,358

Tabla 26. Parámetros económicos calculados para BMC sin préstamo

Caudal de biogás tratado Nm ³ /h	Uso del biometano	VAN	TIR	Payback
	BMC			
50	CASO A2	- 420,625.38 €	-	-
300	CASO B2	2,579,790.73 €	28%	4
700	CASO C2	7,585,627.01 €	45%	3

Tabla 27. Parámetros económicos calculados para BMC con préstamo

Caudal de biogás tratado Nm ³ /h	Uso del biometano	VAN	TIR	Payback
	BMC			
50	CASO A2	- 484,068.07 €	-	-
300	CASO B2	3,767,807.09 €	27%	5
700	CASO C2	7,431,081.36 €	44%	4

Tabla 28. Ingresos por ventas para BML

Caudal de biogás tratado	Inyección		Ingresos por ventas (€)
	CAPEX (€)	OPEX (€/año)	
50	1,303,399	238,274	130,597
300	2,365,623	672,399	783,582
700	4,028,161	1,311,648	1,828,358

Tabla 29. Parámetros económicos calculados para BML sin préstamo

Caudal de biogás tratado Nm ³ /h	Uso del biometano	VAN	TIR	Payback
	BMC			
50	CASO A3	- 1,701,489.92 €	-	-
300	CASO B3	- 1,124,305.17 €	-	-
700	CASO C3	194,084.44 €	4%	9

Tabla 30. Parámetros económicos calculados para BML con préstamo

Caudal de biogás tratado Nm ³ /h	Uso del biometano	VAN	TIR	Payback
	BMC			
50	CASO A3	- 1,785,096.11 €	-	-
300	CASO B3	- 1,276,047.48 €	-	-
700	CASO C3	- 64,300.94 €	3%	9

La misma tendencia se observa en todas las aplicaciones del biometano, y es que para baja capacidad, ninguna de las alternativas es rentable, además, en el caso de BML, la planta de capacidad

media tampoco sería rentable para el proceso propuesto; en cuanto al TIR, allí donde el VAN queda positivo, se observa que en plantas de capacidad media, este es también positivo, pero no lo suficientemente elevado como para considerar que se tratasen de buenas inversiones, ya que el margen es muy estrecho, mientras que en las plantas de capacidad media-alta o alta se alcanzan valores comunes del TIR en el caso de inyección (tablas 23 y 24), mientras que en el caso de BMC, el TIR es demasiado elevado, especialmente en alta capacidad (tablas 26 y 27). Los paybacks confirman esta baja rentabilidad, obteniéndose valores muy elevados para los TIR más bajos, esto es, cuando la rentabilidad es tan baja, se tardará mucho tiempo en recuperar la inversión y comenzar a tener beneficios. Como ejemplo más extremo, el caso del BML (tablas 29 y 30), donde para altas capacidades el proceso comenzaría a ser rentable, sin embargo, los beneficios comenzarían en el año 9, situación insostenible si la vida útil de la planta se estima en 10 años.

La opción del BMC es la más rentable, seguida de la inyección. Sin embargo, la obtención de unas tasas de retorno tan elevadas podría indicar una subestimación del coste, lo que concordaría con que los costes para inyección y BMC saliesen iguales.

En cuanto al tipo de financiación, apenas afecta independientemente de la capacidad o del tipo de aplicación, ya que se obtienen TIR muy similares, mientras la diferencia en los paybacks es de un año. Esto puede considerarse positivo de cara a atraer empresas dispuestas a invertir en esta nueva tecnología y en estas nuevas aplicaciones del biometano.

En general, se han subestimado los costes, despreciando algunos que, en el cómputo total, sí tendrían impacto en los resultados económicos. Esta subestimación es mayor al aumentar la capacidad de la planta. La principal causa de esto se debe a la falta de datos. El desarrollo de la tecnología de membranas depende fuertemente del sector industrial, y son las empresas privadas quienes realizan los avances en el campo de la escalabilidad del proceso, por lo que el acceso a datos es muy restringido. Además, en España la apuesta por la producción de biogás es limitada y el apoyo al aprovechamiento del biogás es escaso; en cuanto al biometano, solo cuenta con una única planta que inyecte a red. Todo esto tiene como consecuencia que, de la ya escasa apuesta por el biogás y el biometano que sufre el país, las plantas existentes sean de baja capacidad, por lo que es difícil realizar una buena aproximación al realizar los escalados de las plantas basándose más en suposiciones que en datos reales. Esta subestimación también puede observarse en el apartado de costes (tabla 21), donde los costes unitarios obtenidos son inferiores a los reportados hasta ahora.

Sin embargo, el hecho de que los resultados hayan sido positivos e incluso demasiado optimistas, implica que existe margen de beneficio, en especial en media y gran escala. Esto es alentador porque existe potencial en España para poder implantar este proceso y utilizar el biometano, siendo no solo respetuoso con el medio ambiente, sino económicamente rentable.

Por último, mencionar que, aunque el uso de BML para gran capacidad parece rentable a priori, debe de tenerse en cuenta que se ha considerado un caso optimista en el que el acondicionamiento y distribución de biocombustible se encuentran al lado de las instalaciones de producción y enriquecimiento de biogás, que el uso de BML es interesante bajo demanda de grandes volúmenes, que quizás son muy elevados para las plantas que se han estudiado, y que este aumento en la capacidad de la planta y de la estación de repostaje implicaría la necesidad de licuar el biometano primero, y luego transportarlo, siendo ambas acciones mucho más caras que la compresión planteada en el piloto.

Conclusiones

A partir del estudio técnico-económico realizado se puede concluir que la tecnología de membranas es una tecnología adecuada para el enriquecimiento de biogás procedente de lodos de depuración de aguas residuales. Esta tecnología es idónea para la producción de biometano de una forma respetuosa con el medioambiente, constituyendo una buena opción para contribuir a frenar el cambio climático, reduciendo las emisiones de GEI y sustituyendo la utilización de combustibles fósiles, concretamente, del gas natural.

La inyección no resulta económicamente viable a capacidades muy bajas, la rentabilidad del proceso se encontraría a partir de capacidades medias, mientras que la venta como biocombustible comprimido resulta hoy en día económicamente rentable en el rango de capacidades de planta medias-altas, y se puede esperar la obtención de mayores beneficios a partir de la optimización energética del proceso. El proceso de obtención de BML siempre será más caro, por lo que quizás para estas capacidades tan bajas inferiores a los 1000 Nm³/h esta opción no sea la más acertada.

La tecnología de membranas es una tecnología comercial atractiva por su sencillez y versatilidad, capaz de producir corrientes de biometano y dióxido de carbono muy puras, presentando unas pérdidas de metano muy bajas. Actualmente, sus costes de inversión y de operación no son del todo bajos, pero presenta un gran potencial de mejora que pasa por el aumento de la eficiencia energética, la optimización de los módulos de membranas industriales y, a escala laboratorio, por el desarrollo de materiales con mejores propiedades físico-químicas.

Dado que la membrana puede ser dañada por algunos de los contaminantes del biogás, es necesario colocar una etapa de pre-tratamiento previa a las membranas. Uno de los retos actuales es también la optimización de esta etapa de pre-tratamiento, pero la tarea se complica al no existir sistemas de monitorización adecuados.

Aunque el biometano se abre paso rápidamente en algunos países europeos como Alemania o Suecia, España continúa a la cola tanto en producción de biogás como de biometano, contando con únicamente una planta que inyecta el biometano producido a la red de distribución de gas.

El apoyo del Gobierno de España a la promoción de las energías renovables, en especial al biogás, es muy limitado, y el biometano apenas se menciona. A esto se suma la falta de incentivos económicos o fiscales efectivos por producir o utilizar este tipo de energías renovables.

Desde la Comisión Europea se apuesta por el uso del biometano para conseguir migrar hacia un modelo energético “verde” y de autosuficiencia energética, pero la realidad es muy diferente entre los países miembros. La falta de un marco legislativo adecuado está frenando la evolución de esta tecnología aplicada y de sus usos en España y, aunque desde la CE se apueste por una normativa única de referencia, la realidad es que será muy difícil conseguirlo a corto plazo dadas las grandes diferencias a nivel técnico, económico y normativo entre los diferentes países.

En definitiva, el uso de la tecnología de membranas para enriquecimiento de biogás procedente de lodos de depuradora es técnicamente viable, presentando un gran potencial en cuanto a mejora de la eficiencia energética y al escalado industrial, siendo necesaria una validación de la tecnología que en España todavía comienza. Desde el punto de vista medioambiental, es también una tecnología preferible a otras alternativas. Para que el proceso de enriquecimiento sea viable económicamente, será necesario proporcionar los incentivos adecuados, diseñar un sistema de control que permita controlar la calidad del biometano correctamente y crear un marco regulatorio en el que la normativa se ajuste a límites razonables.

La tecnología de membranas tendrá cabida en el mercado debido al gran interés del biometano, ya sea para inyectarlo a red como para su utilización como combustible, por lo que se trata de un camino en el que todavía quedan diferentes aspectos que mejorar pero que

El gran interés que des hay en el biometano, por las ventajas que ofrece en cuanto a valorización de residuos y como sustituto del gas natural, hace que el desarrollo industrial de los sistemas de membranas y la mejora de la rentabilidad del proceso aseguren su colocación estratégica en el mercado de las energías renovables.

Coste asociado al TFM

En este apartado se resume el coste asociado al TFM, que recoge tres tipos de costes: costes del personal asignado al Proyecto dentro del que se realiza el presente TFM, costes de equipos y costes correspondientes a las subcontrataciones necesarias para llevar a cabo las diferentes tareas de la fase de instalación del piloto. El presupuesto total y su desglose aparecen en la tabla 31.

Tabla 31. Desglose de costes asociados al proyecto y coste total

Personal	Coste horario (€/h)	Dedicación (h)	Coste (€)
Técnico asociado	19	560	10640
Responsable del proyecto	30	640	19200
Equipo			Coste (€)
Materiales y equipos para instalación servicios auxiliares (instalación eléctrica, internet)			15000
Subcontratación			Coste (€)
Transporte equipos			3000
Montaje equipos			8000
Conexiones captación/retorno y sistema de regulación de presión			35000
Analíticas biogás			15000
TOTAL (€)			105840 €

Bibliografía

[1] M. Castro, M. Martín, N. Moya y T. Serna, *Sostenibilidad energética de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales*, (2013), Aqualogy Aqua Ambiente, Murcia. Recuperado de: <http://congresos.um.es/iiefb/iiefb2013/paper/viewFile/27441/12461>

[2] Ley Orgánica 8/2013, del 9 de diciembre, para el fomento del uso de biocarburantes y otros combustibles renovables con fines de transporte, Boletín Oficial del Estado, núm. 313, de 31 de diciembre de 2013. Recuperado de: <https://goo.gl/vsXcJz>.

[3] Gobierno de España, Ministerio de Agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente, Calidad y Evaluación ambiental, *Valorización y reciclaje material*, (2011). Recuperado de:

<http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Tratamientos-biologicos-biometanizacion.aspx>

[4] A. Pascual, B. Ruiz, P. Gómez y X. Flotats. *Situación y Potencial de generación de biogás*. (2011). IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). Madrid. Recuperado de: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e16_biogas_db43a675.pdf

[5] Gobierno de España, Ministerio de Agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente. Calidad y Evaluación ambiental, *Lodos de depuración de aguas residuales*. (Fecha de consulta: 13/10/17) Recuperado de:

<http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/lodos-depuradora/>

[6] BOE-A-2011-15496, Resolución de 22 de septiembre de 2011, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se modifica el protocolo de detalle PD-01 «medición» de las normas de gestión técnica del sistema gasista, Boletín Oficial del Estado, núm. 238, de 3 de octubre de 2011.

[7] Y. Gu , Y. Li , X. Li , P. Luo , H. Wanga , X. Wangb , J. Wu y F. Li, *Energy self-sufficient wastewater treatment plants: feasibilities and challenges*, (2017), Elsevier Ltd. Recuperado de: <https://goo.gl/CVsbhg>

[8] EBA, EBA Biomethane & Biogas Report 2015 published! (Fecha de consulta: 26/12/17). Recuperado de:

<http://european-biogas.eu/2015/12/16/biogasreport2015/>

[9] Comisión Europea, Estrategias y objetivos climáticos, *Paquete de medidas sobre clima y energía hasta 2020*, (2017). Recuperado de:

https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_es

[10] Comisión Europea, Energía, *Plan Nacional de acción de eficiencia energética 2017-2020*, (2017). Recuperado de:

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/es_annual_report_2017_en.pdf

[11] Comisión Europea, Energía, *Plan Nacional de acción de eficiencia energética 2017-2020*, (2017). Recuperado de:

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/es_annual_report_2017_en.pdf

[12] Real Decreto 1494/2011, de 24 de octubre, Boletín Oficial del Estado, núm. 270, de 9 de noviembre de 2011, páginas 116658 a 116666. Recuperado de:

http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/proyectos-clima/RD_1494-2011_LES_tcm7-181534.pdf

[13] Gobierno de España, Ministerio de Ciencia e Innovación. Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás (2010). Recuperado de:

[http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/7559B244B63EB155C125753F0058E255/\\$FILE/Cap1.pdf](http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/7559B244B63EB155C125753F0058E255/$FILE/Cap1.pdf)

[14] Gobierno de España, Ministerio de Ciencia e Innovación, Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás. Capítulo 1. (2030). Recuperado de:

[http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/7559B244B63EB155C125753F0058E255/\\$FILE/Cap1.pdf](http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/7559B244B63EB155C125753F0058E255/$FILE/Cap1.pdf)

[15] [Martin Miltner, Alexander Makaruk, Michael Harasek. Review on available biogas upgrading technologies and innovations towards advanced solutions \(2017\), Elsevier.](#)

[16] F. Bauer, C. Hulteberg, T. Persson y Daniel Tamm, *Biogas upgrading, Review of commercial technologies*, Svenskt Gastekniskt CenterAB, (2013). Recuperado de:

http://vav.griffel.net/filer/C_SGC2013-270.pdf

[17] Energiforsk, Biogas upgrading – technical review, Report 2016:275 (2016). Recuperado de: http://vav.griffel.net/filer/C_Energiforsk2016-275.pdf

- [18] Cryo Pur, Transforming biogás into bio-LNG and liquid CO₂ (2017). Recuperado de: <https://www.biogas2020.se/wp-content/uploads/2017/11/nr-8-201711cryo-pur-presentation-skive.pdf>
- [19] T. Kohler, M.Bruentrup, R.D.Key y T. Edvardsson, *Choose the best refrigeration technology for small-scale LNG production*, HYDROCARBON PROCESSING, (2014), Oklahoma. Recuperado de: https://www.linde-engineering.com/internet.global.lindeengineering.global/de/images/41469_ePrint.pdf20_129829.pdf
- [20] The linde group, *Leading standardised small- to mid-scale LNG plants*. Recuperado de: https://www.linde-engineering.com/internet.global.lindeengineering.global/en/images/Star_LNG19_166489.pdf?v=5.0
- [21] The linde group, *LNG Technology*. Recuperado de: https://www.linde-engineering.com/internet.global.lindeengineering.global/en/images/LNG_1_1_e_13_150dpi_NB19_4577.pdf?v=8.0
- [22] ERT (Refrigeration Technology GmbH), *Pure liquid methane from biogas and natural gas: components for LBG/LNG filling stations*. Recuperado de: http://www.ertgmbh.de/images/Downloads/LNG_Fueling_E.pdf
- [23] A. Fauzi, K. Chandra y T.Matsuura, *Gas separation membranes*, (2015), Springer, Suiza.
- [24] R. W. Baker, *Membrane Technology and Applications*, WILEY, (2012), Tercera edición, California.
- [25] J.M. de Benito, *Desarrollo de nuevas membranas compuestas para la separación de iones metálicos y aplicaciones electroquímicas*, Universidad Autónoma de Barcelona, (2006). Recuperado de: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/3233/jmb1de1.pdf?sequence=1>
- [26] P. Bernardo, E. Drioli andt G. Golemm, *Membrane Gas Separation: A review/State of the Art*, (2009)
- [27] L. M. Robeson, *Journal of Membrane Science*, *Lehigh University*, (2008). Recuperado de: [dns2.asia.edu.tw/~ysho/YSHO-English/1000%20CE/PDF/J%20Mem%20Sci320,%20390.pdf](https://www.dns2.asia.edu.tw/~ysho/YSHO-English/1000%20CE/PDF/J%20Mem%20Sci320,%20390.pdf)
- [28] Synder Filtration, *Nanofiltration: Spiral-Wound Elements* (Fecha de consulta: 08/01/18). Rcuperado de: <http://synderfiltration.com/nanofiltration/spiral-wound-elements/>

[29] Norfamilabinti Che Mat, Yuecun Lou and G Glenn Lipscomb, *Hollow fiber membrane modules*, (2014)

[30] ForwardOsmosisTech,, “According to Osmosis Energy UK, Pressure Retarded Osmosis using hollow fibers is now a viable means of energy production”, (2017). (Fecha de consulta: 08/01/18). Recuperado de: <http://www.forwardosmosistech.com/according-to-osmosis-energy-pressure-retarded-osmosis-using-hollow-fibers-is-now-a-viable-means-of-energy-production/>

[31] I. casado, *Digestiones y cogeneraciones en Catalunya*, Generalitat de Catalunya, Departamt de Medi Ambient i Habitatge, ESAMUR,Agencia Catalana del Agua, Digestiones y cogeneraciones en Catalunya, (2011). Recuperado de: <http://www.esamur.com/public/file/ponencia120.pdf>

[32] J. M. Coulson , J. F. Richardson, R. K. Sinnott,, *Chemical Engineering*, Elsevier, (1983), Cuarta edición, Oxford.

[33] G. Mitchell, *Building a Business Case for Compressed Natural Gas in Fleet Applications*, National Renewable Energy Laboratory, (2015). Recuperado de:

https://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/business_case_cng_fleets.pdf

[34] B. Songhurst, *Floating Liquefaction (FLNG): Potential for Wider Deployment*, Oxford Institute for Energy Studies, (2016). Recuperado de:

https://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/business_case_cng_fleets.pdf

[35] Conferencia y exhibición GasShow2012, *Liquefied-to-Compressed Natural Gas Opportunities & Strategies*, CRYOSTAR, (2012). Recuperado de:

<http://www.pimot.eu/attachments/article/369/07%20CryoStar%20presentation%20EN.pdf>

[36] Norma UNE-EN 16723-1:2017, *Gas natural y biometano para uso en transporte y biometano para inyección en la red de gas natural. Parte 1: Especificaciones para la inyección de biometano en la red de gas natural*,(2017)

[37] BOE-A-2013-185, Resolución de 21 de diciembre de 2012, de la Dirección General de Política Energética y Minas, por la que se modifica el protocolo de detalle PD-01 «medición» de las normas de gestión técnica del sistema gasista, Boletín Oficial del Estado, núm. 6, de 7 de enero de 2013.

Anexo A

Tabla comparativa entre las normativas española y europea en materia de calidad de biometano y recomendaciones para su medición y monitorización

Anexo B

Cálculos justificativos de los parámetros económicos VAN, TIR y Payback.

En este anexo se recogen en formato tabla los cálculos justificativos por los cuales se han calculado los parámetros económicos para la evaluación económica: VAN, TIR y Payback.

Tabla 33. Cálculos auxiliares del balance económico para inyección sin préstamo, baja capacidad

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	68,663.70 €	76,030.80 €	- 7,367.10 €	104,085.00 €	- 111,452.10 €
2	70,036.97 €	77,551.42 €	- 7,514.44 €	104,085.00 €	- 111,599.44 €
3	71,437.71 €	79,102.44 €	- 7,664.73 €	104,085.00 €	- 111,749.73 €
4	72,866.47 €	80,684.49 €	- 7,818.03 €	104,085.00 €	- 111,903.03 €
5	74,323.80 €	82,298.18 €	- 7,974.39 €	104,085.00 €	- 112,059.39 €
6	75,810.27 €	83,944.15 €	- 8,133.87 €	104,085.00 €	- 112,218.87 €
7	77,326.48 €	85,623.03 €	- 8,296.55 €	104,085.00 €	- 112,381.55 €
8	78,873.01 €	87,335.49 €	- 8,462.48 €	104,085.00 €	- 112,547.48 €
9	80,450.47 €	89,082.20 €	- 8,631.73 €	104,085.00 €	- 112,716.73 €
10	82,059.48 €	90,863.84 €	- 8,804.37 €	104,085.00 €	- 112,889.37 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	- €	- 111,452.10 €	- 33,435.63 €	- 78,016.47 €	104,085.00 €
2	- €	- 111,599.44 €	- 33,479.83 €	- 78,119.61 €	104,085.00 €
3	- €	- 111,749.73 €	- 33,524.92 €	- 78,224.81 €	104,085.00 €
4	- €	- 111,903.03 €	- 33,570.91 €	- 78,332.12 €	104,085.00 €
5	- €	- 112,059.39 €	- 33,617.82 €	- 78,441.57 €	104,085.00 €
6	- €	- 112,218.87 €	- 33,665.66 €	- 78,553.21 €	104,085.00 €
7	- €	- 112,381.55 €	- 33,714.47 €	- 78,667.09 €	104,085.00 €
8	- €	- 112,547.48 €	- 33,764.24 €	- 78,783.24 €	104,085.00 €
9	- €	- 112,716.73 €	- 33,815.02 €	- 78,901.71 €	104,085.00 €
10	- €	- 112,889.37 €	- 33,866.81 €	- 79,022.56 €	104,085.00 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 1,040,850.00 €	- 1,040,850.00 €	- 1,040,850.00 €		
1	26,068.53 €	25,309.25 €	- 1,015,540.75 €		
2	25,965.39 €	24,474.87 €	- 991,065.88 €		
3	25,860.19 €	23,665.74 €	- 967,400.14 €		
4	25,752.88 €	22,881.10 €	- 944,519.04 €		
5	25,643.43 €	22,120.25 €	- 922,398.79 €		
6	25,531.79 €	21,382.47 €	- 901,016.32 €		
7	25,417.91 €	20,667.09 €	- 880,349.23 €		
8	25,301.76 €	19,973.44 €	- 860,375.78 €		
9	25,183.29 €	19,300.89 €	- 841,074.89 €		
10	25,062.44 €	18,648.81 €	- 822,426.08 €		

Tabla 34. Cálculos auxiliares del balance económico para inyección sin préstamo, media capacidad

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	411,982.20 €	164,987.04 €	246,995.16 €	157,533.00 €	89,462.16 €
2	420,221.84 €	168,286.78 €	251,935.06 €	157,533.00 €	94,402.06 €
3	428,626.28 €	171,652.52 €	256,973.76 €	157,533.00 €	99,440.76 €
4	437,198.81 €	175,085.57 €	262,113.24 €	157,533.00 €	104,580.24 €
5	445,942.78 €	178,587.28 €	267,355.50 €	157,533.00 €	109,822.50 €
6	454,861.64 €	182,159.02 €	272,702.61 €	157,533.00 €	115,169.61 €
7	463,958.87 €	185,802.20 €	278,156.67 €	157,533.00 €	120,623.67 €
8	473,238.05 €	189,518.25 €	283,719.80 €	157,533.00 €	126,186.80 €
9	482,702.81 €	193,308.61 €	289,394.20 €	157,533.00 €	131,861.20 €
10	492,356.87 €	197,174.79 €	295,182.08 €	157,533.00 €	137,649.08 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	- €	89,462.16 €	26,838.65 €	62,623.51 €	157,533.00 €
2	- €	94,402.06 €	28,320.62 €	66,081.44 €	157,533.00 €
3	- €	99,440.76 €	29,832.23 €	69,608.54 €	157,533.00 €
4	- €	104,580.24 €	31,374.07 €	73,206.17 €	157,533.00 €
5	- €	109,822.50 €	32,946.75 €	76,875.75 €	157,533.00 €
6	- €	115,169.61 €	34,550.88 €	80,618.73 €	157,533.00 €
7	- €	120,623.67 €	36,187.10 €	84,436.57 €	157,533.00 €
8	- €	126,186.80 €	37,856.04 €	88,330.76 €	157,533.00 €
9	- €	131,861.20 €	39,558.36 €	92,302.84 €	157,533.00 €
10	- €	137,649.08 €	41,294.72 €	96,354.36 €	157,533.00 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 1,575,330.00 €	- 1,575,330.00 €	- 1,575,330.00 €		
1	220,156.51 €	213,744.19 €	- 1,355,173.49 €		
2	223,614.44 €	210,778.06 €	- 1,131,559.04 €		
3	227,141.54 €	207,866.68 €	- 904,417.51 €		
4	230,739.17 €	205,008.76 €	- 673,678.34 €		
5	234,408.75 €	202,203.05 €	- 439,269.59 €		
6	238,151.73 €	199,448.32 €	- 201,117.86 €		
7	241,969.57 €	196,743.40 €	40,851.71 €		
8	245,863.76 €	194,087.12 €	286,715.47 €		
9	249,835.84 €	191,478.37 €	536,551.31 €		
10	253,887.36 €	188,916.04 €	790,438.66 €		

Tabla 35. Cálculos auxiliares del balance económico para inyección sin préstamo, alta capacidad

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	961,291.80 €	276,755.92 €	684,535.88 €	242,347.67 €	442,188.21 €
2	980,517.64 €	282,291.04 €	698,226.60 €	242,347.67 €	455,878.93 €
3	1,000,127.99 €	287,936.86 €	712,191.13 €	242,347.67 €	469,843.46 €
4	1,020,130.55 €	293,695.60 €	726,434.95 €	242,347.67 €	484,087.29 €
5	1,040,533.16 €	299,569.51 €	740,963.65 €	242,347.67 €	498,615.98 €
6	1,061,343.82 €	305,560.90 €	755,782.92 €	242,347.67 €	513,435.26 €
7	1,082,570.70 €	311,672.12 €	770,898.58 €	242,347.67 €	528,550.92 €
8	1,104,222.11 €	317,905.56 €	786,316.55 €	242,347.67 €	543,968.89 €
9	1,126,306.56 €	324,263.67 €	802,042.89 €	242,347.67 €	559,695.22 €
10	1,148,832.69 €	330,748.94 €	818,083.74 €	242,347.67 €	575,736.08 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	- €	442,188.21 €	132,656.46 €	309,531.75 €	242,347.67 €
2	- €	455,878.93 €	136,763.68 €	319,115.25 €	242,347.67 €
3	- €	469,843.46 €	140,953.04 €	328,890.42 €	242,347.67 €
4	- €	484,087.29 €	145,226.19 €	338,861.10 €	242,347.67 €
5	- €	498,615.98 €	149,584.80 €	349,031.19 €	242,347.67 €
6	- €	513,435.26 €	154,030.58 €	359,404.68 €	242,347.67 €
7	- €	528,550.92 €	158,565.27 €	369,985.64 €	242,347.67 €
8	- €	543,968.89 €	163,190.67 €	380,778.22 €	242,347.67 €
9	- €	559,695.22 €	167,908.57 €	391,786.65 €	242,347.67 €
10	- €	575,736.08 €	172,720.82 €	403,015.25 €	242,347.67 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 2,423,476.67 €	- 2,423,476.67 €	- 2,423,476.67 €		
1	551,879.42 €	535,805.26 €	- 1,871,597.25 €		
2	561,462.92 €	529,232.65 €	- 1,310,134.33 €		
3	571,238.09 €	522,763.77 €	- 738,896.24 €		
4	581,208.77 €	516,396.46 €	- 157,687.48 €		
5	591,378.86 €	510,128.60 €	433,691.38 €		
6	601,752.35 €	503,958.12 €	1,035,443.73 €		
7	612,333.31 €	497,883.01 €	1,647,777.04 €		
8	623,125.89 €	491,901.33 €	2,270,902.92 €		
9	634,134.32 €	486,011.15 €	2,905,037.24 €		
10	645,362.92 €	480,210.62 €	3,550,400.16 €		

Tabla 36. Cálculos sobre intereses derivados del préstamo para inyección, tres capacidades

Año	Término amortizativo	Cuota de interés	Cuota de amortización	Total amortizado	Capital vivo
0	0	0	0	0	416,340
1	103,726	32,475	71,251	71,251	345,089
2	103,726	26,917	76,809	148,061	268,279
3	103,726	20,926	82,800	230,861	185,479
4	103,726	14,467	89,259	320,119	96,221
5	103,726	7,505	96,221	416,340	-
Año	Término amortizativo	Cuota de interés	Cuota de amortización	Total amortizado	Capital vivo
0	0	0	0	0	630,132
1	156,990	49,150	107,839	107,839	522,293
2	156,990	40,739	116,251	224,090	406,042
3	156,990	31,671	125,318	349,408	280,724
4	156,990	21,896	135,093	484,502	145,630
5	156,990	11,359	145,630	630,132	-
Año	Término amortizativo	Cuota de interés	Cuota de amortización	Total amortizado	Capital vivo
0	0	0	0	0	969,391
1	241,512	75,612	165,899	165,899	803,491
2	241,512	62,672	178,839	344,739	624,652
3	241,512	48,723	192,789	537,527	431,863
4	241,512	33,685	207,826	745,354	224,037
5	241,512	17,475	224,037	969,391	-

Tabla 37. Cálculos auxiliares del balance económico para inyección con préstamo, baja capacidad

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	68,663.70 €	76,030.80 €	- 7,367.10 €	104,085.00 €	- 111,452.10 €
2	70,036.97 €	77,551.42 €	- 7,514.44 €	104,085.00 €	- 111,599.44 €
3	71,437.71 €	79,102.44 €	- 7,664.73 €	104,085.00 €	- 111,749.73 €
4	72,866.47 €	80,684.49 €	- 7,818.03 €	104,085.00 €	- 111,903.03 €
5	74,323.80 €	82,298.18 €	- 7,974.39 €	104,085.00 €	- 112,059.39 €
6	75,810.27 €	83,944.15 €	- 8,133.87 €	104,085.00 €	- 112,218.87 €
7	77,326.48 €	85,623.03 €	- 8,296.55 €	104,085.00 €	- 112,381.55 €
8	78,873.01 €	87,335.49 €	- 8,462.48 €	104,085.00 €	- 112,547.48 €
9	80,450.47 €	89,082.20 €	- 8,631.73 €	104,085.00 €	- 112,716.73 €
10	82,059.48 €	90,863.84 €	- 8,804.37 €	104,085.00 €	- 112,889.37 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	32,474.52 €	- 143,926.62 €	- 43,177.99 €	- 100,748.63 €	104,085.00 €
2	26,916.91 €	- 138,516.35 €	- 41,554.90 €	- 96,961.44 €	104,085.00 €
3	20,925.80 €	- 132,675.53 €	- 39,802.66 €	- 92,872.87 €	104,085.00 €
4	14,467.39 €	- 126,370.41 €	- 37,911.12 €	- 88,459.29 €	104,085.00 €
5	7,505.22 €	- 119,564.60 €	- 35,869.38 €	- 83,695.22 €	104,085.00 €
6	- €	- 112,218.87 €	- 33,665.66 €	- 78,553.21 €	104,085.00 €
7	- €	- 112,381.55 €	- 33,714.47 €	- 78,667.09 €	104,085.00 €
8	- €	- 112,547.48 €	- 33,764.24 €	- 78,783.24 €	104,085.00 €
9	- €	- 112,716.73 €	- 33,815.02 €	- 78,901.71 €	104,085.00 €
10	- €	- 112,889.37 €	- 33,866.81 €	- 79,022.56 €	104,085.00 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 1,040,850.00 €	- 1,040,850.00 €	- 1,040,850.00 €		
1	3,336.37 €	3,239.19 €	- 1,037,610.81 €		
2	7,123.56 €	6,714.63 €	- 1,030,896.18 €		
3	11,212.13 €	10,260.69 €	- 1,020,635.49 €		
4	15,625.71 €	13,883.24 €	- 1,006,752.25 €		
5	20,389.78 €	17,588.40 €	- 989,163.85 €		
6	25,531.79 €	21,382.47 €	- 967,781.38 €		
7	25,417.91 €	20,667.09 €	- 947,114.29 €		
8	25,301.76 €	19,973.44 €	- 927,140.84 €		
9	25,183.29 €	19,300.89 €	- 907,839.95 €		
10	25,062.44 €	18,648.81 €	- 889,191.14 €		

Tabla 38. Cálculos auxiliares del balance económico para inyección con préstamo, capacidad media

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	411,982.20 €	164,987.04 €	246,995.16 €	157,533.00 €	89,462.16 €
2	420,221.84 €	168,286.78 €	251,935.06 €	157,533.00 €	94,402.06 €
3	428,626.28 €	171,652.52 €	256,973.76 €	157,533.00 €	99,440.76 €
4	437,198.81 €	175,085.57 €	262,113.24 €	157,533.00 €	104,580.24 €
5	445,942.78 €	178,587.28 €	267,355.50 €	157,533.00 €	109,822.50 €
6	454,861.64 €	182,159.02 €	272,702.61 €	157,533.00 €	115,169.61 €
7	463,958.87 €	185,802.20 €	278,156.67 €	157,533.00 €	120,623.67 €
8	473,238.05 €	189,518.25 €	283,719.80 €	157,533.00 €	126,186.80 €
9	482,702.81 €	193,308.61 €	289,394.20 €	157,533.00 €	131,861.20 €
10	492,356.87 €	197,174.79 €	295,182.08 €	157,533.00 €	137,649.08 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	49,150.30 €	40,311.86 €	12,093.56 €	28,218.30 €	157,533.00 €
2	40,738.83 €	53,663.23 €	16,098.97 €	37,564.26 €	157,533.00 €
3	31,671.27 €	67,769.49 €	20,330.85 €	47,438.65 €	157,533.00 €
4	21,896.44 €	82,683.80 €	24,805.14 €	57,878.66 €	157,533.00 €
5	11,359.17 €	98,463.33 €	29,539.00 €	68,924.33 €	157,533.00 €
6	- €	115,169.61 €	34,550.88 €	80,618.73 €	157,533.00 €
7	- €	120,623.67 €	36,187.10 €	84,436.57 €	157,533.00 €
8	- €	126,186.80 €	37,856.04 €	88,330.76 €	157,533.00 €
9	- €	131,861.20 €	39,558.36 €	92,302.84 €	157,533.00 €
10	- €	137,649.08 €	41,294.72 €	96,354.36 €	157,533.00 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 1,575,330.00 €	- 1,575,330.00 €	- 1,575,330.00 €		
1	185,751.30 €	180,341.07 €	- 1,389,578.70 €		
2	195,097.26 €	183,897.88 €	- 1,194,481.43 €		
3	204,971.65 €	187,578.09 €	- 989,509.79 €		
4	215,411.66 €	191,390.47 €	- 774,098.13 €		
5	226,457.33 €	195,344.08 €	- 547,640.79 €		
6	238,151.73 €	199,448.32 €	- 309,489.06 €		
7	241,969.57 €	196,743.40 €	- 67,519.50 €		
8	245,863.76 €	194,087.12 €	178,344.26 €		
9	249,835.84 €	191,478.37 €	428,180.10 €		
10	253,887.36 €	188,916.04 €	682,067.46 €		

Tabla 39. Cálculos auxiliares del balance económico para inyección con préstamo, alta capacidad

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	961,291.80 €	276,755.92 €	684,535.88 €	242,347.67 €	442,188.21 €
2	980,517.64 €	282,291.04 €	698,226.60 €	242,347.67 €	455,878.93 €
3	1,000,127.99 €	287,936.86 €	712,191.13 €	242,347.67 €	469,843.46 €
4	1,020,130.55 €	293,695.60 €	726,434.95 €	242,347.67 €	484,087.29 €
5	1,040,533.16 €	299,569.51 €	740,963.65 €	242,347.67 €	498,615.98 €
6	1,061,343.82 €	305,560.90 €	755,782.92 €	242,347.67 €	513,435.26 €
7	1,082,570.70 €	311,672.12 €	770,898.58 €	242,347.67 €	528,550.92 €
8	1,104,222.11 €	317,905.56 €	786,316.55 €	242,347.67 €	543,968.89 €
9	1,126,306.56 €	324,263.67 €	802,042.89 €	242,347.67 €	559,695.22 €
10	1,148,832.69 €	330,748.94 €	818,083.74 €	242,347.67 €	575,736.08 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	75,612.47 €	366,575.74 €	109,972.72 €	256,603.02 €	242,347.67 €
2	62,672.33 €	393,206.60 €	117,961.98 €	275,244.62 €	242,347.67 €
3	48,722.86 €	421,120.60 €	126,336.18 €	294,784.42 €	242,347.67 €
4	33,685.33 €	450,401.96 €	135,120.59 €	315,281.37 €	242,347.67 €
5	17,474.87 €	481,141.11 €	144,342.33 €	336,798.78 €	242,347.67 €
6	- €	513,435.26 €	154,030.58 €	359,404.68 €	242,347.67 €
7	- €	528,550.92 €	158,565.27 €	369,985.64 €	242,347.67 €
8	- €	543,968.89 €	163,190.67 €	380,778.22 €	242,347.67 €
9	- €	559,695.22 €	167,908.57 €	391,786.65 €	242,347.67 €
10	- €	575,736.08 €	172,720.82 €	403,015.25 €	242,347.67 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 2,423,476.67 €	- 2,423,476.67 €	- 2,423,476.67 €		
1	498,950.69 €	484,418.14 €	- 1,924,525.98 €		
2	517,592.29 €	487,880.37 €	- 1,406,933.69 €		
3	537,132.09 €	491,551.95 €	- 869,801.61 €		
4	557,629.04 €	495,446.18 €	- 312,172.57 €		
5	579,146.44 €	499,576.81 €	266,973.87 €		
6	601,752.35 €	503,958.12 €	868,726.22 €		
7	612,333.31 €	497,883.01 €	1,481,059.53 €		
8	623,125.89 €	491,901.33 €	2,104,185.42 €		
9	634,134.32 €	486,011.15 €	2,738,319.74 €		
10	645,362.92 €	480,210.62 €	3,383,682.66 €		

Tabla 40. Cálculos auxiliares del balance económico para BMC sin préstamo, baja capacidad

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	130,597.02 €	82,135.93 €	48,461.09 €	98,905.51 €	- 50,444.42 €
2	133,208.96 €	83,778.65 €	49,430.31 €	98,905.51 €	- 49,475.20 €
3	135,873.14 €	85,454.22 €	50,418.91 €	98,905.51 €	- 48,486.60 €
4	138,590.60 €	87,163.31 €	51,427.29 €	98,905.51 €	- 47,478.22 €
5	141,362.41 €	88,906.58 €	52,455.84 €	98,905.51 €	- 46,449.67 €
6	144,189.66 €	90,684.71 €	53,504.96 €	98,905.51 €	- 45,400.56 €
7	147,073.46 €	92,498.40 €	54,575.05 €	98,905.51 €	- 44,330.46 €
8	150,014.93 €	94,348.37 €	55,666.56 €	98,905.51 €	- 43,238.96 €
9	153,015.22 €	96,235.34 €	56,779.89 €	98,905.51 €	- 42,125.62 €
10	156,075.53 €	98,160.04 €	57,915.48 €	98,905.51 €	- 40,990.03 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	- €	- 50,444.42 €	- 15,133.33 €	- 35,311.10 €	98,905.51 €
2	- €	- 49,475.20 €	- 14,842.56 €	- 34,632.64 €	98,905.51 €
3	- €	- 48,486.60 €	- 14,545.98 €	- 33,940.62 €	98,905.51 €
4	- €	- 47,478.22 €	- 14,243.47 €	- 33,234.75 €	98,905.51 €
5	- €	- 46,449.67 €	- 13,934.90 €	- 32,514.77 €	98,905.51 €
6	- €	- 45,400.56 €	- 13,620.17 €	- 31,780.39 €	98,905.51 €
7	- €	- 44,330.46 €	- 13,299.14 €	- 31,031.32 €	98,905.51 €
8	- €	- 43,238.96 €	- 12,971.69 €	- 30,267.27 €	98,905.51 €
9	- €	- 42,125.62 €	- 12,637.69 €	- 29,487.94 €	98,905.51 €
10	- €	- 40,990.03 €	- 12,297.01 €	- 28,693.02 €	98,905.51 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 989,055.11 €	- 989,055.11 €	- 989,055.11 €		
1	63,594.41 €	61,742.15 €	- 925,460.70 €		
2	64,272.87 €	60,583.34 €	- 861,187.83 €		
3	64,964.89 €	59,452.08 €	- 796,222.94 €		
4	65,670.76 €	58,347.62 €	- 730,552.18 €		
5	66,390.74 €	57,269.24 €	- 664,161.44 €		
6	67,125.12 €	56,216.23 €	- 597,036.32 €		
7	67,874.19 €	55,187.93 €	- 529,162.12 €		
8	68,638.24 €	54,183.66 €	- 460,523.88 €		
9	69,417.57 €	53,202.79 €	- 391,106.31 €		
10	70,212.49 €	52,244.69 €	- 320,893.81 €		

Tabla 41. Cálculos auxiliares del balance económico para BMC sin préstamo, capacidad media

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	783,582.12 €	211,247.11 €	572,335.01 €	153,778.18 €	418,556.84 €
2	799,253.76 €	215,472.05 €	583,781.71 €	153,778.18 €	430,003.54 €
3	815,238.84 €	219,781.49 €	595,457.35 €	153,778.18 €	441,679.17 €
4	831,543.61 €	224,177.12 €	607,366.49 €	153,778.18 €	453,588.32 €
5	848,174.49 €	228,660.66 €	619,513.82 €	153,778.18 €	465,735.65 €
6	865,137.98 €	233,233.88 €	631,904.10 €	153,778.18 €	478,125.92 €
7	882,440.74 €	237,898.55 €	644,542.18 €	153,778.18 €	490,764.01 €
8	900,089.55 €	242,656.52 €	657,433.03 €	153,778.18 €	503,654.85 €
9	918,091.34 €	247,509.66 €	670,581.69 €	153,778.18 €	516,803.51 €
10	936,453.17 €	252,459.85 €	683,993.32 €	153,778.18 €	530,215.14 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	- €	418,556.84 €	125,567.05 €	292,989.79 €	153,778.18 €
2	- €	430,003.54 €	129,001.06 €	301,002.48 €	153,778.18 €
3	- €	441,679.17 €	132,503.75 €	309,175.42 €	153,778.18 €
4	- €	453,588.32 €	136,076.50 €	317,511.82 €	153,778.18 €
5	- €	465,735.65 €	139,720.69 €	326,014.95 €	153,778.18 €
6	- €	478,125.92 €	143,437.78 €	334,688.15 €	153,778.18 €
7	- €	490,764.01 €	147,229.20 €	343,534.80 €	153,778.18 €
8	- €	503,654.85 €	151,096.46 €	352,558.40 €	153,778.18 €
9	- €	516,803.51 €	155,041.05 €	361,762.46 €	153,778.18 €
10	- €	530,215.14 €	159,064.54 €	371,150.60 €	153,778.18 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 1,537,781.76 €	- 1,537,781.76 €	- 1,537,781.76 €		
1	446,767.96 €	433,755.30 €	- 1,091,013.80 €		
2	454,780.65 €	428,674.38 €	- 636,233.15 €		
3	462,953.60 €	423,668.12 €	- 173,279.55 €		
4	471,290.00 €	418,735.06 €	298,010.45 €		
5	479,793.13 €	413,873.77 €	777,803.58 €		
6	488,466.32 €	409,082.86 €	1,266,269.90 €		
7	497,312.98 €	404,360.96 €	1,763,582.88 €		
8	506,336.57 €	399,706.76 €	2,269,919.45 €		
9	515,540.63 €	395,118.97 €	2,785,460.09 €		
10	524,928.78 €	390,596.31 €	3,310,388.86 €		

Figura 31. Cálculos auxiliares del balance económico para BMC sin préstamo, alta capacidad

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	1,828,358.28 €	387,026.97 €	1,441,331.31 €	240,932.68 €	1,200,398.63 €
2	1,864,925.45 €	394,767.51 €	1,470,157.94 €	240,932.68 €	1,229,225.26 €
3	1,902,223.95 €	402,662.86 €	1,499,561.10 €	240,932.68 €	1,258,628.41 €
4	1,940,268.43 €	410,716.11 €	1,529,552.32 €	240,932.68 €	1,288,619.64 €
5	1,979,073.80 €	418,930.44 €	1,560,143.37 €	240,932.68 €	1,319,210.68 €
6	2,018,655.28 €	427,309.05 €	1,591,346.23 €	240,932.68 €	1,350,413.55 €
7	2,059,028.38 €	435,855.23 €	1,623,173.16 €	240,932.68 €	1,382,240.48 €
8	2,100,208.95 €	444,572.33 €	1,655,636.62 €	240,932.68 €	1,414,703.94 €
9	2,142,213.13 €	453,463.78 €	1,688,749.35 €	240,932.68 €	1,447,816.67 €
10	2,185,057.39 €	462,533.05 €	1,722,524.34 €	240,932.68 €	1,481,591.66 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	- €	1,200,398.63 €	360,119.59 €	840,279.04 €	240,932.68 €
2	- €	1,229,225.26 €	368,767.58 €	860,457.68 €	240,932.68 €
3	- €	1,258,628.41 €	377,588.52 €	881,039.89 €	240,932.68 €
4	- €	1,288,619.64 €	386,585.89 €	902,033.75 €	240,932.68 €
5	- €	1,319,210.68 €	395,763.20 €	923,447.48 €	240,932.68 €
6	- €	1,350,413.55 €	405,124.07 €	945,289.49 €	240,932.68 €
7	- €	1,382,240.48 €	414,672.14 €	967,568.33 €	240,932.68 €
8	- €	1,414,703.94 €	424,411.18 €	990,292.76 €	240,932.68 €
9	- €	1,447,816.67 €	434,345.00 €	1,013,471.67 €	240,932.68 €
10	- €	1,481,591.66 €	444,477.50 €	1,037,114.16 €	240,932.68 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 2,409,326.82 €	- 2,409,326.82 €	- 2,409,326.82 €		
1	1,081,211.72 €	1,049,720.12 €	- 1,328,115.10 €		
2	1,101,390.36 €	1,038,166.05 €	- 226,724.74 €		
3	1,121,972.57 €	1,026,763.84 €	895,247.83 €		
4	1,142,966.43 €	1,015,510.87 €	2,038,214.26 €		
5	1,164,380.16 €	1,004,404.55 €	3,202,594.42 €		
6	1,186,222.17 €	993,442.39 €	4,388,816.59 €		
7	1,208,501.01 €	982,621.92 €	5,597,317.61 €		
8	1,231,225.44 €	971,940.73 €	6,828,543.04 €		
9	1,254,404.35 €	961,396.48 €	8,082,947.40 €		
10	1,278,046.84 €	950,986.88 €	9,360,994.24 €		

Tabla 42. Cálculos sobre intereses derivados del préstamo para BMC, tres capacidades

Año	Término amortizativo	Cuota de interés	Cuota de amortización	Total amortizado	Capital vivo
0	0	0	0	0	395,622
1	98,564	30,859	67,706	67,706	327,916
2	98,564	25,577	72,987	140,693	254,929
3	98,564	19,884	78,680	219,373	176,249
4	98,564	13,747	84,817	304,189	91,433
5	98,564	7,132	91,433	395,622	-
Año	Término amortizativo	Cuota de interés	Cuota de amortización	Total amortizado	Capital vivo
0	0	0	0	0	615,113
1	153,248	47,979	105,269	105,269	509,844
2	153,248	39,768	113,480	218,749	396,364
3	153,248	30,916	122,331	341,080	274,032
4	153,248	21,375	131,873	472,953	142,159
5	153,248	11,088	142,159	615,113	-
Año	Término amortizativo	Cuota de interés	Cuota de amortización	Total amortizado	Capital vivo
0	0	0	0	0	963,731
1	240,102	75,171	164,931	164,931	798,800
2	240,102	62,306	177,795	342,726	621,005
3	240,102	48,438	191,663	534,389	429,342
4	240,102	33,489	206,613	741,002	222,729
5	240,102	17,373	222,729	963,731	-

Tabla 43. Cálculos auxiliares del balance económico para BMC con préstamo, baja capacidad

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	130,597.02 €	82,135.93 €	48,461.09 €	98,905.51 €	- 50,444.42 €
2	133,208.96 €	83,778.65 €	49,430.31 €	98,905.51 €	- 49,475.20 €
3	135,873.14 €	85,454.22 €	50,418.91 €	98,905.51 €	- 48,486.60 €
4	138,590.60 €	87,163.31 €	51,427.29 €	98,905.51 €	- 47,478.22 €
5	141,362.41 €	88,906.58 €	52,455.84 €	98,905.51 €	- 46,449.67 €
6	144,189.66 €	90,684.71 €	53,504.96 €	98,905.51 €	- 45,400.56 €
7	147,073.46 €	92,498.40 €	54,575.05 €	98,905.51 €	- 44,330.46 €
8	150,014.93 €	94,348.37 €	55,666.56 €	98,905.51 €	- 43,238.96 €
9	153,015.22 €	96,235.34 €	56,779.89 €	98,905.51 €	- 42,125.62 €
10	156,075.53 €	98,160.04 €	57,915.48 €	98,905.51 €	- 40,990.03 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	30,858.52 €	- 81,302.94 €	- 24,390.88 €	- 56,912.06 €	98,905.51 €
2	25,577.47 €	- 75,052.67 €	- 22,515.80 €	- 52,536.87 €	98,905.51 €
3	19,884.49 €	- 68,371.09 €	- 20,511.33 €	- 47,859.76 €	98,905.51 €
4	13,747.46 €	- 61,225.68 €	- 18,367.70 €	- 42,857.97 €	98,905.51 €
5	7,131.74 €	- 53,581.42 €	- 16,074.42 €	- 37,506.99 €	98,905.51 €
6	- €	- 45,400.56 €	- 13,620.17 €	- 31,780.39 €	98,905.51 €
7	- €	- 44,330.46 €	- 13,299.14 €	- 31,031.32 €	98,905.51 €
8	- €	- 43,238.96 €	- 12,971.69 €	- 30,267.27 €	98,905.51 €
9	- €	- 42,125.62 €	- 12,637.69 €	- 29,487.94 €	98,905.51 €
10	- €	- 40,990.03 €	- 12,297.01 €	- 28,693.02 €	98,905.51 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 989,055.11 €	- 989,055.11 €	- 989,055.11 €		
1	41,993.45 €	40,770.34 €	- 947,061.66 €		
2	46,368.64 €	43,706.89 €	- 900,693.02 €		
3	51,045.75 €	46,714.09 €	- 849,647.27 €		
4	56,047.54 €	49,797.51 €	- 793,599.73 €		
5	61,398.52 €	52,962.90 €	- 732,201.21 €		
6	67,125.12 €	56,216.23 €	- 665,076.09 €		
7	67,874.19 €	55,187.93 €	- 597,201.90 €		
8	68,638.24 €	54,183.66 €	- 528,563.65 €		
9	69,417.57 €	53,202.79 €	- 459,146.08 €		
10	70,212.49 €	52,244.69 €	- 388,933.59 €		

Figura 32. Cálculos auxiliares del balance económico para BMC con préstamo, capacidad media

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	783,582.12 €	211,247.11 €	572,335.01 €	153,778.18 €	418,556.84 €
2	799,253.76 €	215,472.05 €	583,781.71 €	153,778.18 €	430,003.54 €
3	815,238.84 €	219,781.49 €	595,457.35 €	153,778.18 €	441,679.17 €
4	831,543.61 €	224,177.12 €	607,366.49 €	153,778.18 €	453,588.32 €
5	848,174.49 €	228,660.66 €	619,513.82 €	153,778.18 €	465,735.65 €
6	865,137.98 €	233,233.88 €	631,904.10 €	153,778.18 €	478,125.92 €
7	882,440.74 €	237,898.55 €	644,542.18 €	153,778.18 €	490,764.01 €
8	900,089.55 €	242,656.52 €	657,433.03 €	153,778.18 €	503,654.85 €
9	918,091.34 €	247,509.66 €	670,581.69 €	153,778.18 €	516,803.51 €
10	936,453.17 €	252,459.85 €	683,993.32 €	153,778.18 €	530,215.14 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	47,978.79 €	370,578.05 €	111,173.41 €	259,404.63 €	153,778.18 €
2	39,767.81 €	390,235.72 €	117,070.72 €	273,165.01 €	153,778.18 €
3	30,916.38 €	410,762.79 €	123,228.84 €	287,533.95 €	153,778.18 €
4	21,374.53 €	432,213.78 €	129,664.13 €	302,549.65 €	153,778.18 €
5	11,088.43 €	454,647.22 €	136,394.17 €	318,253.06 €	153,778.18 €
6	- €	478,125.92 €	143,437.78 €	334,688.15 €	153,778.18 €
7	- €	490,764.01 €	147,229.20 €	343,534.80 €	153,778.18 €
8	- €	503,654.85 €	151,096.46 €	352,558.40 €	153,778.18 €
9	- €	516,803.51 €	155,041.05 €	361,762.46 €	153,778.18 €
10	- €	530,215.14 €	159,064.54 €	371,150.60 €	153,778.18 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 1,537,781.76 €	- 1,537,781.76 €	- 1,537,781.76 €		
1	413,182.81 €	401,148.36 €	- 1,124,598.95 €		
2	426,943.18 €	402,434.90 €	- 697,655.77 €		
3	441,312.13 €	403,863.11 €	- 256,343.64 €		
4	456,327.82 €	405,441.36 €	199,984.18 €		
5	472,031.23 €	407,178.29 €	672,015.42 €		
6	488,466.32 €	409,082.86 €	1,160,481.74 €		
7	497,312.98 €	404,360.96 €	1,657,794.72 €		
8	506,336.57 €	399,706.76 €	2,164,131.29 €		
9	515,540.63 €	395,118.97 €	2,679,671.92 €		
10	524,928.78 €	390,596.31 €	3,204,600.70 €		

Tabla 44. Cálculos auxiliares del balance económico para BMC coin préstamo, alta capacidad

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	-	- €
1	1,828,358.28 €	387,026.97 €	1,441,331.31 €	240,932.68 €	1,200,398.63 €
2	1,864,925.45 €	394,767.51 €	1,470,157.94 €	240,932.68 €	1,229,225.26 €
3	1,902,223.95 €	402,662.86 €	1,499,561.10 €	240,932.68 €	1,258,628.41 €
4	1,940,268.43 €	410,716.11 €	1,529,552.32 €	240,932.68 €	1,288,619.64 €
5	1,979,073.80 €	418,930.44 €	1,560,143.37 €	240,932.68 €	1,319,210.68 €
6	2,018,655.28 €	427,309.05 €	1,591,346.23 €	240,932.68 €	1,350,413.55 €
7	2,059,028.38 €	435,855.23 €	1,623,173.16 €	240,932.68 €	1,382,240.48 €
8	2,100,208.95 €	444,572.33 €	1,655,636.62 €	240,932.68 €	1,414,703.94 €
9	2,142,213.13 €	453,463.78 €	1,688,749.35 €	240,932.68 €	1,447,816.67 €
10	2,185,057.39 €	462,533.05 €	1,722,524.34 €	240,932.68 €	1,481,591.66 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	75,171.00 €	1,125,227.63 €	337,568.29 €	787,659.34 €	240,932.68 €
2	62,306.41 €	1,166,918.85 €	350,075.65 €	816,843.19 €	240,932.68 €
3	48,438.38 €	1,210,190.03 €	363,057.01 €	847,133.02 €	240,932.68 €
4	33,488.65 €	1,255,130.98 €	376,539.30 €	878,591.69 €	240,932.68 €
5	17,372.84 €	1,301,837.84 €	390,551.35 €	911,286.49 €	240,932.68 €
6	- €	1,350,413.55 €	405,124.07 €	945,289.49 €	240,932.68 €
7	- €	1,382,240.48 €	414,672.14 €	967,568.33 €	240,932.68 €
8	- €	1,414,703.94 €	424,411.18 €	990,292.76 €	240,932.68 €
9	- €	1,447,816.67 €	434,345.00 €	1,013,471.67 €	240,932.68 €
10	- €	1,481,591.66 €	444,477.50 €	1,037,114.16 €	240,932.68 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 2,409,326.82 €	- 2,409,326.82 €	- 2,409,326.82 €		
1	1,028,592.03 €	998,633.03 €	- 1,380,734.80 €		
2	1,057,775.87 €	997,055.21 €	- 322,958.92 €		
3	1,088,065.70 €	995,734.25 €	765,106.78 €		
4	1,119,524.37 €	994,682.90 €	1,884,631.15 €		
5	1,152,219.17 €	993,914.38 €	3,036,850.32 €		
6	1,186,222.17 €	993,442.39 €	4,223,072.49 €		
7	1,208,501.01 €	982,621.92 €	5,431,573.50 €		
8	1,231,225.44 €	971,940.73 €	6,662,798.94 €		
9	1,254,404.35 €	961,396.48 €	7,917,203.29 €		
10	1,278,046.84 €	950,986.88 €	9,195,250.14 €		

Tabla 45. Cálculos auxiliares del balance económico para BML sin préstamo, baja capacidad

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	130,597.02 €	243,039.94 €	- 112,442.92 €	130,339.89 €	- 242,782.81 €
2	133,208.96 €	247,900.74 €	- 114,691.78 €	130,339.89 €	- 245,031.67 €
3	135,873.14 €	252,858.75 €	- 116,985.61 €	130,339.89 €	- 247,325.50 €
4	138,590.60 €	257,915.93 €	- 119,325.32 €	130,339.89 €	- 249,665.21 €
5	141,362.41 €	263,074.24 €	- 121,711.83 €	130,339.89 €	- 252,051.72 €
6	144,189.66 €	268,335.73 €	- 124,146.07 €	130,339.89 €	- 254,485.96 €
7	147,073.46 €	273,702.44 €	- 126,628.99 €	130,339.89 €	- 256,968.88 €
8	150,014.93 €	279,176.49 €	- 129,161.57 €	130,339.89 €	- 259,501.46 €
9	153,015.22 €	284,760.02 €	- 131,744.80 €	130,339.89 €	- 262,084.69 €
10	156,075.53 €	290,455.22 €	- 134,379.70 €	130,339.89 €	- 264,719.59 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	- €	- 242,782.81 €	- 72,834.84 €	- 169,947.97 €	130,339.89 €
2	- €	- 245,031.67 €	- 73,509.50 €	- 171,522.17 €	130,339.89 €
3	- €	- 247,325.50 €	- 74,197.65 €	- 173,127.85 €	130,339.89 €
4	- €	- 249,665.21 €	- 74,899.56 €	- 174,765.65 €	130,339.89 €
5	- €	- 252,051.72 €	- 75,615.52 €	- 176,436.20 €	130,339.89 €
6	- €	- 254,485.96 €	- 76,345.79 €	- 178,140.17 €	130,339.89 €
7	- €	- 256,968.88 €	- 77,090.66 €	- 179,878.22 €	130,339.89 €
8	- €	- 259,501.46 €	- 77,850.44 €	- 181,651.02 €	130,339.89 €
9	- €	- 262,084.69 €	- 78,625.41 €	- 183,459.28 €	130,339.89 €
10	- €	- 264,719.59 €	- 79,415.88 €	- 185,303.71 €	130,339.89 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 1,303,398.91 €	- 1,303,398.91 €	- 1,303,398.91 €		
1	- 39,608.08 €	- 38,454.44 €	- 1,341,853.35 €		
2	- 41,182.28 €	- 38,818.24 €	- 1,380,671.60 €		
3	- 42,787.96 €	- 39,157.05 €	- 1,419,828.64 €		
4	- 44,425.76 €	- 39,471.71 €	- 1,459,300.35 €		
5	- 46,096.31 €	- 39,763.09 €	- 1,499,063.44 €		
6	- 47,800.28 €	- 40,031.98 €	- 1,539,095.42 €		
7	- 49,538.32 €	- 40,279.19 €	- 1,579,374.61 €		
8	- 51,311.13 €	- 40,505.48 €	- 1,619,880.09 €		
9	- 53,119.39 €	- 40,711.59 €	- 1,660,591.68 €		
10	- 54,963.82 €	- 40,898.24 €	- 1,701,489.92 €		

Tabla 46. Cálculos auxiliares del balance económico para BML sin préstamo, capacidad media

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	783,582.12 €	685,846.67 €	97,735.45 €	236,562.35 €	- 138,826.89 €
2	799,253.76 €	699,563.60 €	99,690.16 €	236,562.35 €	- 136,872.18 €
3	815,238.84 €	713,554.87 €	101,683.97 €	236,562.35 €	- 134,878.38 €
4	831,543.61 €	727,825.97 €	103,717.65 €	236,562.35 €	- 132,844.70 €
5	848,174.49 €	742,382.49 €	105,792.00 €	236,562.35 €	- 130,770.35 €
6	865,137.98 €	757,230.14 €	107,907.84 €	236,562.35 €	- 128,654.51 €
7	882,440.74 €	772,374.74 €	110,066.00 €	236,562.35 €	- 126,496.35 €
8	900,089.55 €	787,822.23 €	112,267.32 €	236,562.35 €	- 124,295.03 €
9	918,091.34 €	803,578.68 €	114,512.66 €	236,562.35 €	- 122,049.68 €
10	936,453.17 €	819,650.25 €	116,802.92 €	236,562.35 €	- 119,759.43 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	- €	- 138,826.89 €	- 41,648.07 €	- 97,178.82 €	236,562.35 €
2	- €	- 136,872.18 €	- 41,061.65 €	- 95,810.53 €	236,562.35 €
3	- €	- 134,878.38 €	- 40,463.51 €	- 94,414.86 €	236,562.35 €
4	- €	- 132,844.70 €	- 39,853.41 €	- 92,991.29 €	236,562.35 €
5	- €	- 130,770.35 €	- 39,231.10 €	- 91,539.24 €	236,562.35 €
6	- €	- 128,654.51 €	- 38,596.35 €	- 90,058.15 €	236,562.35 €
7	- €	- 126,496.35 €	- 37,948.90 €	- 88,547.44 €	236,562.35 €
8	- €	- 124,295.03 €	- 37,288.51 €	- 87,006.52 €	236,562.35 €
9	- €	- 122,049.68 €	- 36,614.90 €	- 85,434.78 €	236,562.35 €
10	- €	- 119,759.43 €	- 35,927.83 €	- 83,831.60 €	236,562.35 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 2,365,623.45 €	- 2,365,623.45 €	- 2,365,623.45 €		
1	139,383.52 €	135,323.81 €	- 2,226,239.93 €		
2	140,751.82 €	132,672.09 €	- 2,085,488.11 €		
3	142,147.48 €	130,085.08 €	- 1,943,340.63 €		
4	143,571.06 €	127,561.02 €	- 1,799,769.58 €		
5	145,023.10 €	125,098.20 €	- 1,654,746.47 €		
6	146,504.19 €	122,694.95 €	- 1,508,242.28 €		
7	148,014.90 €	120,349.66 €	- 1,360,227.38 €		
8	149,555.82 €	118,060.75 €	- 1,210,671.56 €		
9	151,127.57 €	115,826.70 €	- 1,059,543.99 €		
10	152,730.74 €	113,646.02 €	- 906,813.24 €		

Tabla 47. Cálculos auxiliares del balance económico para BML sin préstamo, alta capacidad

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	1,828,358.28 €	1,337,881.25 €	490,477.03 €	402,816.14 €	87,660.90 €
2	1,864,925.45 €	1,364,638.87 €	500,286.58 €	402,816.14 €	97,470.44 €
3	1,902,223.95 €	1,391,931.65 €	510,292.31 €	402,816.14 €	107,476.17 €
4	1,940,268.43 €	1,419,770.28 €	520,498.15 €	402,816.14 €	117,682.01 €
5	1,979,073.80 €	1,448,165.69 €	530,908.12 €	402,816.14 €	128,091.98 €
6	2,018,655.28 €	1,477,129.00 €	541,526.28 €	402,816.14 €	138,710.14 €
7	2,059,028.38 €	1,506,671.58 €	552,356.80 €	402,816.14 €	149,540.66 €
8	2,100,208.95 €	1,536,805.01 €	563,403.94 €	402,816.14 €	160,587.80 €
9	2,142,213.13 €	1,567,541.11 €	574,672.02 €	402,816.14 €	171,855.88 €
10	2,185,057.39 €	1,598,891.93 €	586,165.46 €	402,816.14 €	183,349.32 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	- €	87,660.90 €	26,298.27 €	61,362.63 €	402,816.14 €
2	- €	97,470.44 €	29,241.13 €	68,229.31 €	402,816.14 €
3	- €	107,476.17 €	32,242.85 €	75,233.32 €	402,816.14 €
4	- €	117,682.01 €	35,304.60 €	82,377.41 €	402,816.14 €
5	- €	128,091.98 €	38,427.59 €	89,664.38 €	402,816.14 €
6	- €	138,710.14 €	41,613.04 €	97,097.10 €	402,816.14 €
7	- €	149,540.66 €	44,862.20 €	104,678.47 €	402,816.14 €
8	- €	160,587.80 €	48,176.34 €	112,411.46 €	402,816.14 €
9	- €	171,855.88 €	51,556.76 €	120,299.12 €	402,816.14 €
10	- €	183,349.32 €	55,004.80 €	128,344.52 €	402,816.14 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 4,028,161.39 €	- 4,028,161.39 €	- 4,028,161.39 €		
1	464,178.77 €	450,659.00 €	- 3,563,982.62 €		
2	471,045.44 €	444,005.51 €	- 3,092,937.18 €		
3	478,049.46 €	437,482.97 €	- 2,614,887.72 €		
4	485,193.55 €	431,088.18 €	- 2,129,694.17 €		
5	492,480.52 €	424,818.03 €	- 1,637,213.65 €		
6	499,913.24 €	418,669.47 €	- 1,137,300.42 €		
7	507,494.60 €	412,639.55 €	- 629,805.81 €		
8	515,227.60 €	406,725.42 €	- 114,578.21 €		
9	523,115.25 €	400,924.28 €	408,537.04 €		
10	531,160.66 €	395,233.42 €	939,697.71 €		

Tabla 48. Cálculos sobre intereses derivados del préstamo para BML, tres capacidades

Año	Término amortizativo	Cuota de interés	Cuota de amortización	Total amortizado	Capital vivo
0	0	0	0	0	521,360
1	129,890	40,666	89,224	89,224	432,135
2	129,890	33,707	96,184	185,408	335,952
3	129,890	26,204	103,686	289,094	232,266
4	129,890	18,117	111,774	400,868	120,492
5	129,890	9,398	120,492	521,360	-
Año	Término amortizativo	Cuota de interés	Cuota de amortización	Total amortizado	Capital vivo
0	0	0	0	0	946,249
1	235,746	73,807	161,939	161,939	784,310
2	235,746	61,176	174,570	336,509	609,740
3	235,746	47,560	188,187	524,696	421,554
4	235,746	32,881	202,865	727,561	218,689
5	235,746	17,058	218,689	946,249	-
Año	Término amortizativo	Cuota de interés	Cuota de amortización	Total amortizado	Capital vivo
0	0	0	0	0	1,611,265
1	401,427	125,679	275,748	275,748	1,335,517
2	401,427	104,170	297,256	573,004	1,038,260
3	401,427	80,984	320,442	893,447	717,818
4	401,427	55,990	345,437	1,238,884	372,381
5	401,427	29,046	372,381	1,611,265	-

Tabla 49. Cálculos auxiliares del balance económico para BML con préstamo, baja capacidad

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	130,597.02 €	243,039.94 €	- 112,442.92 €	130,339.89 €	- 242,782.81 €
2	133,208.96 €	247,900.74 €	- 114,691.78 €	130,339.89 €	- 245,031.67 €
3	135,873.14 €	252,858.75 €	- 116,985.61 €	130,339.89 €	- 247,325.50 €
4	138,590.60 €	257,915.93 €	- 119,325.32 €	130,339.89 €	- 249,665.21 €
5	141,362.41 €	263,074.24 €	- 121,711.83 €	130,339.89 €	- 252,051.72 €
6	144,189.66 €	268,335.73 €	- 124,146.07 €	130,339.89 €	- 254,485.96 €
7	147,073.46 €	273,702.44 €	- 126,628.99 €	130,339.89 €	- 256,968.88 €
8	150,014.93 €	279,176.49 €	- 129,161.57 €	130,339.89 €	- 259,501.46 €
9	153,015.22 €	284,760.02 €	- 131,744.80 €	130,339.89 €	- 262,084.69 €
10	156,075.53 €	290,455.22 €	- 134,379.70 €	130,339.89 €	- 264,719.59 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	40,666.05 €	- 283,448.85 €	- 85,034.66 €	- 198,414.20 €	130,339.89 €
2	33,706.55 €	- 278,738.22 €	- 83,621.47 €	- 195,116.75 €	130,339.89 €
3	26,204.22 €	- 273,529.73 €	- 82,058.92 €	- 191,470.81 €	130,339.89 €
4	18,116.71 €	- 267,781.92 €	- 80,334.58 €	- 187,447.35 €	130,339.89 €
5	9,398.37 €	- 261,450.09 €	- 78,435.03 €	- 183,015.06 €	130,339.89 €
6	- €	- 254,485.96 €	- 76,345.79 €	- 178,140.17 €	130,339.89 €
7	- €	- 256,968.88 €	- 77,090.66 €	- 179,878.22 €	130,339.89 €
8	- €	- 259,501.46 €	- 77,850.44 €	- 181,651.02 €	130,339.89 €
9	- €	- 262,084.69 €	- 78,625.41 €	- 183,459.28 €	130,339.89 €
10	- €	- 264,719.59 €	- 79,415.88 €	- 185,303.71 €	130,339.89 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 1,303,398.91 €	- 1,303,398.91 €	- 1,303,398.91 €		
1	- 68,074.31 €	- 66,091.56 €	- 1,369,490.47 €		
2	- 64,776.86 €	- 61,058.41 €	- 1,430,548.88 €		
3	- 61,130.92 €	- 55,943.45 €	- 1,486,492.32 €		
4	- 57,107.46 €	- 50,739.23 €	- 1,537,231.56 €		
5	- 52,675.17 €	- 45,438.07 €	- 1,582,669.63 €		
6	- 47,800.28 €	- 40,031.98 €	- 1,622,701.61 €		
7	- 49,538.32 €	- 40,279.19 €	- 1,662,980.80 €		
8	- 51,311.13 €	- 40,505.48 €	- 1,703,486.28 €		
9	- 53,119.39 €	- 40,711.59 €	- 1,744,197.87 €		
10	- 54,963.82 €	- 40,898.24 €	- 1,785,096.11 €		

Figura 33. Cálculos auxiliares del balance económico para BML con préstamo, capacidad media

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	783,582.12 €	685,846.67 €	97,735.45 €	236,562.35 €	- 138,826.89 €
2	799,253.76 €	699,563.60 €	99,690.16 €	236,562.35 €	- 136,872.18 €
3	815,238.84 €	713,554.87 €	101,683.97 €	236,562.35 €	- 134,878.38 €
4	831,543.61 €	727,825.97 €	103,717.65 €	236,562.35 €	- 132,844.70 €
5	848,174.49 €	742,382.49 €	105,792.00 €	236,562.35 €	- 130,770.35 €
6	865,137.98 €	757,230.14 €	107,907.84 €	236,562.35 €	- 128,654.51 €
7	882,440.74 €	772,374.74 €	110,066.00 €	236,562.35 €	- 126,496.35 €
8	900,089.55 €	787,822.23 €	112,267.32 €	236,562.35 €	- 124,295.03 €
9	918,091.34 €	803,578.68 €	114,512.66 €	236,562.35 €	- 122,049.68 €
10	936,453.17 €	819,650.25 €	116,802.92 €	236,562.35 €	- 119,759.43 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	73,807.45 €	- 212,634.34 €	- 63,790.30 €	- 148,844.04 €	236,562.35 €
2	61,176.22 €	- 198,048.40 €	- 59,414.52 €	- 138,633.88 €	236,562.35 €
3	47,559.75 €	- 182,438.13 €	- 54,731.44 €	- 127,706.69 €	236,562.35 €
4	32,881.19 €	- 165,725.89 €	- 49,717.77 €	- 116,008.13 €	236,562.35 €
5	17,057.71 €	- 147,828.06 €	- 44,348.42 €	- 103,479.64 €	236,562.35 €
6	- €	- 128,654.51 €	- 38,596.35 €	- 90,058.15 €	236,562.35 €
7	- €	- 126,496.35 €	- 37,948.90 €	- 88,547.44 €	236,562.35 €
8	- €	- 124,295.03 €	- 37,288.51 €	- 87,006.52 €	236,562.35 €
9	- €	- 122,049.68 €	- 36,614.90 €	- 85,434.78 €	236,562.35 €
10	- €	- 119,759.43 €	- 35,927.83 €	- 83,831.60 €	236,562.35 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 2,365,623.45 €	- 2,365,623.45 €	- 2,365,623.45 €		
1	87,718.31 €	85,163.40 €	- 2,277,905.15 €		
2	97,928.47 €	92,306.97 €	- 2,179,976.68 €		
3	108,855.66 €	99,618.35 €	- 2,071,121.03 €		
4	120,554.22 €	107,110.86 €	- 1,950,566.81 €		
5	133,082.70 €	114,798.31 €	- 1,817,484.10 €		
6	146,504.19 €	122,694.95 €	- 1,670,979.91 €		
7	148,014.90 €	120,349.66 €	- 1,522,965.01 €		
8	149,555.82 €	118,060.75 €	- 1,373,409.18 €		
9	151,127.57 €	115,826.70 €	- 1,222,281.62 €		
10	152,730.74 €	113,646.02 €	- 1,069,550.87 €		

Tabla 50. Cálculos auxiliares del balance económico para BML con préstamo, capacidad alta

Año	Ingresos por ventas	Costes producción	Beneficio Bruto	Amortización	BAIT
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	1,828,358.28 €	1,337,881.25 €	490,477.03 €	402,816.14 €	87,660.90 €
2	1,864,925.45 €	1,364,638.87 €	500,286.58 €	402,816.14 €	97,470.44 €
3	1,902,223.95 €	1,391,931.65 €	510,292.31 €	402,816.14 €	107,476.17 €
4	1,940,268.43 €	1,419,770.28 €	520,498.15 €	402,816.14 €	117,682.01 €
5	1,979,073.80 €	1,448,165.69 €	530,908.12 €	402,816.14 €	128,091.98 €
6	2,018,655.28 €	1,477,129.00 €	541,526.28 €	402,816.14 €	138,710.14 €
7	2,059,028.38 €	1,506,671.58 €	552,356.80 €	402,816.14 €	149,540.66 €
8	2,100,208.95 €	1,536,805.01 €	563,403.94 €	402,816.14 €	160,587.80 €
9	2,142,213.13 €	1,567,541.11 €	574,672.02 €	402,816.14 €	171,855.88 €
10	2,185,057.39 €	1,598,891.93 €	586,165.46 €	402,816.14 €	183,349.32 €
Año	Intereses	BAT	Impuestos	Beneficio Neto	Depreciación
0	- €	- €	- €	- €	- €
1	125,678.64 €	- 38,017.74 €	- 11,405.32 €	- 26,612.42 €	402,816.14 €
2	104,170.29 €	- 6,699.85 €	- 2,009.96 €	- 4,689.90 €	402,816.14 €
3	80,984.29 €	26,491.87 €	7,947.56 €	18,544.31 €	402,816.14 €
4	55,989.79 €	61,692.22 €	18,507.67 €	43,184.56 €	402,816.14 €
5	29,045.71 €	99,046.26 €	29,713.88 €	69,332.38 €	402,816.14 €
6	- €	138,710.14 €	41,613.04 €	97,097.10 €	402,816.14 €
7	- €	149,540.66 €	44,862.20 €	104,678.47 €	402,816.14 €
8	- €	160,587.80 €	48,176.34 €	112,411.46 €	402,816.14 €
9	- €	171,855.88 €	51,556.76 €	120,299.12 €	402,816.14 €
10	- €	183,349.32 €	55,004.80 €	128,344.52 €	402,816.14 €
Año	Flujos de caja	Flujos de caja actualizados	Flujo de caja acumulado		
0	- 4,028,161.39 €	- 4,028,161.39 €	- 4,028,161.39 €		
1	376,203.72 €	365,246.33 €	- 3,651,957.67 €		
2	398,126.24 €	375,272.17 €	- 3,253,831.43 €		
3	421,360.45 €	385,604.50 €	- 2,832,470.98 €		
4	446,000.70 €	396,265.84 €	- 2,386,470.28 €		
5	472,148.52 €	407,279.46 €	- 1,914,321.76 €		
6	499,913.24 €	418,669.47 €	- 1,414,408.52 €		
7	507,494.60 €	412,639.55 €	- 906,913.92 €		
8	515,227.60 €	406,725.42 €	- 391,686.32 €		
9	523,115.25 €	400,924.28 €	131,428.94 €		
10	531,160.66 €	395,233.42 €	662,589.60 €		