



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Potencial de producción de biogás a partir de residuos orgánicos
generados en buques de la Armada*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Manuel Álvarez-Dardet García de Veas

DIRECTORES: Lorena González Gil
Leticia Pérez Rial

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Potencial de producción de biogás a partir de residuos orgánicos
generados en buques de la Armada*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General.

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado analiza el potencial de producción de biogás mediante digestión anaerobia de residuos orgánicos generados en buques de la Armada Española, tomando como referencia el B.A.C. Cantabria, el LHD Juan Carlos I y la fragata Méndez Núñez. Los residuos estudiados fueron la fracción orgánica de residuos de comedor (FORSU), los lodos de depuradora y el aceite de cocina usado. La metodología combinó la estimación teórica del potencial de producción de metano a partir del análisis elemental de las muestras con tres ensayos experimentales realizados en laboratorio en condiciones mesófilas y termófilas. Los resultados muestran que el aceite de cocina usado fue el sustrato con mayor valor teórico, alcanzando 1 005 mL CH₄/g SV. Asimismo, la codigestión mejoró claramente el rendimiento de los lodos, obteniéndose la mayor producción experimental con la mezcla de lodo, aceite y FORSU, que alcanzó 552 mL CH₄/g SV. Además, el régimen termófilo permitió superar los valores obtenidos a menor temperatura, manteniendo una estabilidad adecuada del proceso. A escala de buque, el Juan Carlos I podría generar teóricamente hasta 412 320 L/día de biogás a partir de sus residuos orgánicos, lo que confirma el interés energético de esta tecnología en el entorno naval.

PALABRAS CLAVE

Biogás, Residuos orgánicos, Digestión anaerobia, Armada española, Economía circular.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis dos tutoras, por todo el esfuerzo, la dedicación y el tiempo que han invertido para que este trabajo pudiera salir adelante. Su apoyo constante, su orientación y su confianza durante todo este proceso han sido fundamentales para el desarrollo de este TFG. Sin su ayuda, su implicación y su guía, este trabajo no habría sido posible.

También quiero agradecer de corazón a mi familia, especialmente a mis padres, mi hermana y mis abuelos, por haber estado siempre a mi lado. Desde pequeño me han apoyado tanto en los buenos momentos como en los más difíciles, y gracias a ese respaldo constante he podido llegar hasta aquí. En especial, quiero dar las gracias a mi abuelo, por haberme acercado a esta bonita profesión y por toda la motivación que me ha transmitido a lo largo de estos años para afrontar el camino en la escuela con ilusión y esfuerzo.

Este trabajo supone además el cierre de una etapa muy importante de mi vida. Con él finalizan cinco años en la Escuela Naval Militar y también mi formación en el grado de Ingeniería Mecánica, una etapa llena de aprendizaje, esfuerzo, sacrificio y crecimiento personal. Mirando atrás, han sido años intensos que me han permitido formarme no solo como futuro Oficial de la Armada, sino también íntegramente como persona.

Por último, quiero agradecer a Alexandra su apoyo diario, su cariño y su capacidad para hacerme feliz y motivarme cada día. Su compañía durante este tiempo ha sido muy importante para mí y ha sido un gran apoyo para seguir adelante hasta el final.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	5
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos	8
1.1 Introducción	8
1.2 Motivación y objetivos.....	9
2 Estado del arte	10
2.1 Contexto energético y valorización de residuos orgánicos	10
2.1.1 Alternativas para la valorización de residuos orgánicos.....	10
2.1.2 Economía circular para la gestión de residuos orgánicos	10
2.1.3 Autonomía energética y reducción de la huella ambiental	12
2.1.4 Potencial de producción de biogás en España	13
2.2 Digestión anaerobia como tecnología de valorización energética	14
2.2.1 Definición y principios generales de la digestión anaerobia	14
2.2.2 Etapas del proceso de digestión anaerobia	14
2.2.3 Microorganismos implicados en el proceso	16
2.2.4 Tipologías de reactores anaerobios	16
2.3 Codigestión anaerobia como estrategia de optimización	18
2.3.1 Concepto y fundamentos de la codigestión anaerobia.....	18
2.3.2 Características relevantes de los residuos orgánicos generados en buques	19
2.3.3 Estrategias de mezcla y optimización de proporciones	19
2.4 Parámetros operativos y criterios de diseño del proceso de digestión anaerobia	20
2.4.1 Temperatura de operación, pH y alcalinidad	20
2.4.2 Estabilidad del proceso y criterios de control	21
2.4.3 Tiempo de retención hidráulica y carga orgánica aplicada	22
2.4.4 Criterios generales de diseño y dimensionamiento	22
2.5 Tratamiento, calidad y aplicaciones energéticas del biogás.....	23
2.5.1 Composición	23
2.5.2 Alternativas de aprovechamiento energético	24
2.5.3 Procesos de limpieza y depuración	25
2.5.4 Purificación del biogás en metano	26
2.6 Digestión anaerobia en buques	27
2.6.1 Aplicación real de la digestión anaerobia en buques	27

2.6.2 Limitaciones del diseño en entorno naval	27
2.6.3 Arquitectura y estabilidad de la planta	27
2.6.4 Aplicaciones y acondicionamiento del biogás.....	28
3 Desarrollo del TFG.....	29
3.1 Sistema AMPTS para la evaluación del potencial bioquímico de metano	29
3.1.1 Potencial bioquímico del metano.....	29
3.1.2 Variables clave.....	30
3.1.3 Sistemas automáticos: Equipo AMPTS III.....	30
3.1.4 Interpretación de resultados	32
3.2 Digestión anaerobia mesófila de residuos orgánicos ricos en carbohidratos, proteínas y lípidos (experimento 1).....	33
3.2.1 Descripción del experimento	33
3.2.2 Configuración de los reactores	33
3.2.3 Cálculos previos para la preparación de los reactores	35
3.2.4 Preparación de las botellas y puesta en marcha.....	36
3.2.5 Finalización del experimento y registro de resultados	38
3.2.6 Determinación de la alcalinidad	39
3.3 Digestión anaerobia mesófila de residuos orgánicos procedentes de buques de la Armada (experimento 2).....	40
3.3.1 Descripción del experimento	40
3.3.2 Análisis para seleccionar los sustratos de mayor interés	42
3.3.3 Configuración de los reactores	43
3.3.4 Cálculos previos para la preparación de las botellas	43
3.3.5 Preparación de las botellas y puesta en marcha.....	45
3.4 Digestión anaerobia termófila de residuos orgánicos procedentes de buques de la Armada (experimento 3).....	45
3.4.1 Descripción del experimento	45
3.4.2 Configuración de los reactores	46
3.4.3 Cálculos previos para la preparación de las botellas	46
3.4.4 Preparación de las botellas y puesta en marcha.....	48
3.5 Análisis elemental CHNS de las muestras	49
3.5.1 Preparación del análisis	49
3.5.2 Procedimiento de análisis	50
3.5.3 Cálculo teórico de producción de metano	51
3.5.4 Cálculo teórico del poder calorífico superior	54
4 Resultados	56

4.1 Resultados de la digestión de residuos orgánicos ricos en carbohidratos, proteínas y grasas a temperatura mesófila (experimento 1).....	56
4.1.1 Volumen acumulado de metano	56
4.1.2 Caudal de metano	58
4.1.3 Producción media total de metano.....	59
4.1.4 Producción neta corregida por el blanco.....	60
4.1.5 Producción neta por gramo de sólido volátil del sustrato	61
4.2 Resultados de la digestión de residuos orgánicos procedentes de buques de la Armada a temperatura mesófila (experimento 2).....	62
4.2.1 Volumen acumulado de metano	62
4.2.2 Caudal de metano	64
4.2.3 Producción media total de metano.....	65
4.2.4 Producción neta corregida por el blanco.....	67
4.2.5 Producción neta por gramo de sólido volátil del sustrato	67
4.3 Resultados de la digestión de residuos orgánicos procedentes de buques de la Armada a temperatura termófila (experimento 3).....	68
4.3.1 Volumen acumulado de metano	68
4.3.2 Caudal de metano	70
4.3.3 Producción media total de metano.....	72
4.3.4 Producción neta corregida por el blanco.....	72
4.3.5 Producción neta por gramo de sólido volátil del sustrato	73
4.4 Resultado de los análisis de alcalinidad	74
4.4.1 Experimento 1	74
4.4.2 Experimento 2.....	75
4.4.3 Experimento 3.....	76
4.5 Resultados de los cálculos teóricos del potencial energético de las muestras	77
4.5.1 Producción de metano y biogás	77
4.5.2 Producción de energía.....	79
4.6 Potencial de producción de biogás en buques de la Armada	79
4.6.1 Potencial de producción de la FORSU	79
4.6.2 Potencial de producción del aceite.....	81
4.6.3 Potencial de producción del lodo.....	82
4.6.4 Potencial de producción del conjunto de sustratos	83
4.7 Comparación entre valores experimentales, teóricos y bibliográficos	84
4.7.1 Comparación correspondiente al experimento 1	84
4.7.2 Comparación correspondiente al experimento 2	84

4.7.3 Comparación correspondiente al experimento 3	85
5 Conclusiones y líneas futuras	87
5.1 Conclusiones	87
5.2 Líneas futuras	88
6 Bibliografía.....	90
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas, Ambientales	94
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	96
Anexo III: Declaración de uso de inteligencia artificial.....	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Diagrama de la economía circular del biogás [7].	11
Figura 2-2 Aplicaciones de 31 Mt DM de digestato [11].	12
Figura 2-3 Generación y tratamiento de residuos municipales en España, Perfil Ambiental de España 2024 [13].	13
Figura 2-4 Distribución porcentual de las plantas de biogás en España por comunidad autónoma (elaboración propia a partir de [14]).	13
Figura 2-5 Etapas y microorganismos en la digestión anaerobia [17].	15
Figura 2-6 Reactores de flujo pistón, desplazamiento vertical y horizontal [19].	17
Figura 2-7 Reactor de lecho expandido/fluidizado [19].	17
Figura 2-8 Reactor CSTR [19].	18
Figura 2-9 Análisis comparativo de residuos orgánicos para procesos de codigestión [4].	19
Figura 2-10 Niveles de la instrumentación en plantas anaerobias [25].	21
Figura 2-11 Componentes de una planta de biogás [28].	23
Figura 2-12 Componentes del biogás según su origen [29].	24
Figura 2-13 Aplicaciones del biogás [29].	25
Figura 2-14 Biofiltro para la eliminación de sulfuro de hidrógeno [29].	26
Figura 3-1 Equipo AMPTS III Light [37].	30
Figura 3-2 Equipo AMPTS III Light conectado [37].	31
Figura 3-3 Principio de funcionamiento del Equipo AMPTS III Light [36].	32
Figura 3-4 Inóculo empleado procedente de un digestor de una EDAR gallega (elaboración propia).	33
Figura 3-5 Celulosa y gelatina empleada en el experimento (elaboración propia).	34
Figura 3-6 Aceite de cocina usado empleado en el experimento tras su filtración (elaboración propia).	35
Figura 3-7 Botella de nitrógeno del laboratorio de investigación del CUD (elaboración propia).	37
Figura 3-8 Inyección manual de nitrógeno para purgar el oxígeno (elaboración propia).	37
Figura 3-9 Equipo AMPTS con las nueve botellas en funcionamiento (elaboración propia).	38
Figura 3-10 Botellas extraídas y obtención de muestras de cada una de ellas (elaboración propia).	39
Figura 3-11 Método de lectura del pH según la adición de H ₂ SO ₄ (elaboración propia).	39
Figura 3-12 Buque Patiño [39].	41
Figura 3-13 Obtención de lodos en el buque Patiño (elaboración propia).	41
Figura 3-14 Restos de comida transformados en papilla (elaboración propia).	42
Figura 3-15 Análisis de sólidos volátiles (elaboración propia).	43
Figura 3-16 Llenado de agua por el orificio del equipo AMPTS III (elaboración propia).	48

Figura 3-17 Obtención de la parte sólida de las muestras mediante centrifugación (elaboración propia).	49
Figura 3-18 Secado en horno a 105 °C (elaboración propia).	49
Figura 3-19 Muestras listas para ser mandadas a analizar (elaboración propia).	50
Figura 4-1 Gráfica de volumen acumulado de metano por día (elaboración propia).	57
Figura 4-2 Costras flotantes en las botellas de aceite (elaboración propia).	58
Figura 4-3 Gráfica de caudal de metano por día (elaboración propia).	58
Figura 4-4 Gráfica de producción media total de metano por grupos (elaboración propia).	59
Figura 4-5 Gráfica de volumen acumulado neto corregido por el blanco (elaboración propia).	61
Figura 4-6 Gráfica de volumen de metano por cada gramo de SV (elaboración propia).	62
Figura 4-7 Gráfica de volumen acumulado de metano por día (elaboración propia).	63
Figura 4-8 Gráfica de caudal de metano por día (elaboración propia).	65
Figura 4-9 Gráfica de producción media total de metano por grupos (elaboración propia).	66
Figura 4-10 Gráfica de volumen de metano acumulado neto corregido por el blanco (elaboración propia).	67
Figura 4-11 Gráfica de volumen de metano por gramo de SV (elaboración propia).	68
Figura 4-12 Gráfica de volumen acumulado de metano por día (elaboración propia).	69
Figura 4-13 Gráfica de caudal de metano por día (elaboración propia).	71
Figura 4-14 Gráfica de producción media total de metano por grupos (elaboración propia).	72
Figura 4-15 Gráfica de volumen acumulado neto corregido por el blanco (elaboración propia).	73
Figura 4-16 Gráfica de volumen de metano por gramo de SV (elaboración propia).	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Composición elemental y concentración de sólidos volátiles de la gelatina (elaboración propia).	51
Tabla 3-2 Potencial teórico de metano y biogás de la gelatina (elaboración propia).	54
Tabla 3-3 Poder calorífico superior teórico (PCS) de la gelatina (elaboración propia).	55
Tabla 4-1 Valores de alcalinidad total (AT) y ratio AGV/AT al final del experimento 1 (elaboración propia).	75
Tabla 4-2 Valores de alcalinidad total (AT) y ratio AGV/AT al final del experimento 2 (elaboración propia).	76
Tabla 4-3 Valores de alcalinidad total (AT) y ratio AGV/AT al final del experimento 3 (elaboración propia).	77
Tabla 4-4 Composición elemental y concentración de sólidos volátiles de las muestras analizadas (elaboración propia).	78
Tabla 4-5 Potencial teórico de metano y biogás de las muestras analizadas (elaboración propia).	78
Tabla 4-6 Poder calorífico superior teórico (PCS) de las muestras analizadas (elaboración propia).	79
Tabla 4-7 Cantidad de la FORSU generada en buques de la Armada (elaboración propia).	80
Tabla 4-8 Potencial de producción de la FORSU (elaboración propia).	80
Tabla 4-9 Cantidad de aceite generado en buques de la Armada (elaboración propia).	81
Tabla 4-10 Potencial de producción del aceite (elaboración propia).	81
Tabla 4-11 Cantidad de aguas negras generada en buques de la Armada (elaboración propia).	82
Tabla 4-12 Potencial de producción de las aguas negras (elaboración propia).	83
Tabla 4-13 Potencial de producción de biogás en buques de la Armada (elaboración propia).	83
Tabla 4-14 Poder calorífico del biogás en buques de la Armada (elaboración propia).	83
Tabla 4-15 Comparación entre el BMP experimental, el BMP teórico y el valor bibliográfico esperado para los sustratos del experimento 1 (elaboración propia).	84
Tabla 4-16 Comparación entre el BMP experimental, el BMP teórico y el valor bibliográfico esperado para los sustratos del experimento 2 (elaboración propia).	85
Tabla 4-17 Comparación entre el BMP experimental, el BMP teórico y el valor bibliográfico esperado para los sustratos del experimento 3 (elaboración propia).	86

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La generación de residuos orgánicos y aguas residuales constituye un problema inherente a cualquier actividad humana continuada, y los buques de la Armada Española no son una excepción. Durante sus periodos de navegación y operación, estos buques generan de forma constante residuos orgánicos procedentes principalmente de los servicios de cocina y comedor, así como aguas residuales domésticas que deben ser tratadas a bordo conforme a la normativa ambiental vigente. Tradicionalmente, la gestión de estos flujos se ha abordado desde una perspectiva de eliminación segura, priorizando el cumplimiento normativo y la operatividad del buque, pero sin considerar en profundidad su potencial como recurso energético [1].

En el contexto actual de transición energética y sostenibilidad ambiental, como es el caso del Pacto Verde Europeo [2], este enfoque puramente eliminativo resulta cada vez menos alineado con los principios de eficiencia y valorización de recursos. La necesidad de reducir la huella ambiental de las actividades humanas, junto con el incremento del coste energético y la dependencia de combustibles fósiles, ha impulsado el desarrollo de tecnologías orientadas a transformar residuos en fuentes de energía renovable. La actual inestabilidad energética, marcada por las tensiones geopolíticas en torno a Irán y por la vulnerabilidad del estrecho de Ormuz como principal cuello de botella del transporte mundial de hidrocarburos, pone de manifiesto la necesidad de avanzar hacia soluciones que refuercen la autonomía energética y reduzcan la dependencia de los combustibles fósiles. En este marco, la digestión anaerobia se presenta como una alternativa tecnológica madura y contrastada para la valorización de residuos orgánicos biodegradables, al permitir la conversión de la materia orgánica en biogás, un vector energético con altas concentraciones de metano (entre 45 % y 80 %) y con múltiples aplicaciones [3].

Los buques de la Armada generan diariamente cantidades significativas de residuos orgánicos sólidos, principalmente restos de comida, así como una carga orgánica relevante contenida en las aguas residuales tratadas en las plantas de tratamiento a bordo. Estos flujos representan una fuente potencial de energía que, hasta la fecha, no ha sido explotada de manera sistemática en el ámbito naval. La gestión habitual de los residuos orgánicos a bordo se basa en su trituración, almacenamiento temporal, descarga en puerto o eliminación conforme a las disposiciones internacionales, mientras que las aguas residuales son tratadas para cumplir los requisitos de vertido, sin una recuperación energética asociada.

Desde un punto de vista ingenieril, esta situación plantea una oportunidad clara de mejora: transformar un problema logístico y ambiental en una fuente de energía aprovechable a bordo. La valorización energética de los residuos orgánicos permitiría reducir la cantidad de residuos a gestionar, minimizar impactos ambientales y contribuir, aunque sea parcialmente, al suministro energético del buque. En un entorno como el naval, caracterizado por limitaciones de espacio, necesidad de fiabilidad

operativa y dependencia energética, cualquier contribución a la autosuficiencia energética adquiere un valor estratégico adicional.

En este contexto, uno de los desafíos más relevantes es optimizar la producción de biogás utilizando únicamente los residuos disponibles a bordo, teniendo en cuenta que tanto la cantidad generada como el espacio para instalar equipos auxiliares son limitados. Para ello, resulta imprescindible caracterizar adecuadamente los residuos orgánicos sólidos generados en los buques, así como la carga orgánica asociada a las aguas residuales tratadas en las plantas TAR (tratamiento de aguas residuales), y evaluar su potencial de valorización mediante digestión anaerobia. Asimismo, deben considerarse estrategias como la codigestión, ampliamente utilizadas en instalaciones terrestres, con el objetivo de mejorar la estabilidad del proceso y aumentar la producción de biogás [4].

1.2 Motivación y objetivos

La motivación de este Trabajo Fin de Grado surge, por tanto, de la convergencia de varios factores: la necesidad de una gestión más sostenible de los residuos generados en buques de la Armada, el potencial energético no aprovechado de dichos residuos, y la madurez alcanzada por la digestión anaerobia como tecnología de valorización. Frente a un modelo tradicional centrado exclusivamente en la eliminación, este trabajo propone un enfoque orientado a la recuperación de energía, alineado con los principios de economía circular y eficiencia energética.

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es evaluar el potencial de producción de biogás a partir de los residuos orgánicos generados en buques de la Armada Española, considerando tanto los residuos sólidos de comedor como la carga orgánica asociada a las aguas residuales tratadas a bordo. Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Determinar experimentalmente el potencial de producción de metano de los residuos orgánicos generados a bordo, mediante ensayos de digestión anaerobia en condiciones controladas de laboratorio.
- Estudiar distintas mezclas de codigestión entre los residuos seleccionados y a diferentes temperaturas de operación, con el fin de identificar las combinaciones de sustratos y las condiciones de proceso más favorables para aumentar la producción de metano y mejorar la estabilidad de la digestión anaerobia.
- Analizar la estabilidad de los reactores empleados en cada experimento mediante la determinación en laboratorio de la alcalinidad, con el fin de evaluar el equilibrio del proceso de digestión anaerobia.
- Determinar, a partir del análisis elemental de cada sustrato analizado, el potencial teórico de los residuos orgánicos generados a bordo para diferentes buques de la Armada Española, calculando su producción teórica de biogás y el poder calorífico asociado a su aprovechamiento energético.

En definitiva, este trabajo pretende sentar las bases técnicas para la integración de sistemas de digestión anaerobia en buques de la Armada, aportando una visión rigurosa sobre su potencial de producción de biogás.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Contexto energético y valorización de residuos orgánicos

2.1.1 Alternativas para la valorización de residuos orgánicos

La valorización de residuos orgánicos puede abordarse mediante distintas rutas tecnológicas, fundamentalmente de tipo biológico, térmico o químico, orientadas a la obtención de energía en forma de calor, electricidad o combustibles. Dentro de las alternativas biológicas, la digestión anaerobia destaca por su capacidad para transformar materia orgánica biodegradable en biogás [5]. Asimismo, la fermentación alcohólica constituye otro proceso biológico, basado en la degradación de residuos ricos en azúcares y almidones para la producción de bioetanol [6]. Por último, el compostaje representa una vía de valorización material, en la que la materia orgánica se estabiliza mediante procesos aerobios para obtener productos fertilizantes [7].

Las rutas termoquímicas incluyen la combustión directa, ampliamente utilizada para la generación de energía térmica a partir de biomasa sólida. Otras opciones son la gasificación, que produce un gas combustible mediante la aplicación de altas temperaturas, y la pirólisis, en la que la descomposición térmica en ausencia de oxígeno da lugar a bioaceites y carbón vegetal. En el ámbito de los procesos químicos, la transesterificación es la principal vía para la obtención de biodiésel a partir de aceites y grasas [5].

La elección de la tecnología más adecuada depende en gran medida del contenido de humedad del residuo. Mientras que los procesos térmicos requieren biomasa seca para ser eficientes, las tecnologías biológicas resultan especialmente apropiadas para residuos con elevada humedad, permitiendo su aprovechamiento energético de forma eficaz. Por ello, la digestión anaerobia se plantea como la tecnología más adecuada para la valorización de los residuos orgánicos generados en buques, debido principalmente a su elevado grado de humedad. Esta tecnología, además de presentar una mejor adecuación al tratamiento de residuos húmedos, presenta una mayor flexibilidad de implantación a distintas escalas y menores exigencias energéticas asociadas al acondicionamiento previo del residuo. Además, permite obtener biogás como fuente de energía renovable y aprovechar el digestato resultante, favoreciendo así una gestión más eficiente e integrada de los residuos en entornos con espacio y condiciones operativas limitadas [8].

2.1.2 Economía circular para la gestión de residuos orgánicos

La economía circular se consolida como un elemento clave al permitir el cierre del ciclo de los residuos orgánicos mediante su transformación en productos de valor añadido. Este planteamiento

sustituye los modelos tradicionales de gestión por esquemas de carácter restaurativo, en los que los residuos orgánicos se revalorizan como materias primas secundarias [9]. La integración de la gestión de residuos con la producción energética in situ favorece un uso más eficiente de los materiales disponibles, reduce la necesidad de tratamientos finales de eliminación y contribuye al desarrollo de cadenas productivas más resilientes y competitivas [3]. Tal y como se puede observar en la Figura 2-1, la gestión de residuos orgánicos en plantas de biogás se consolida como estrategia clave en el marco de la economía circular.

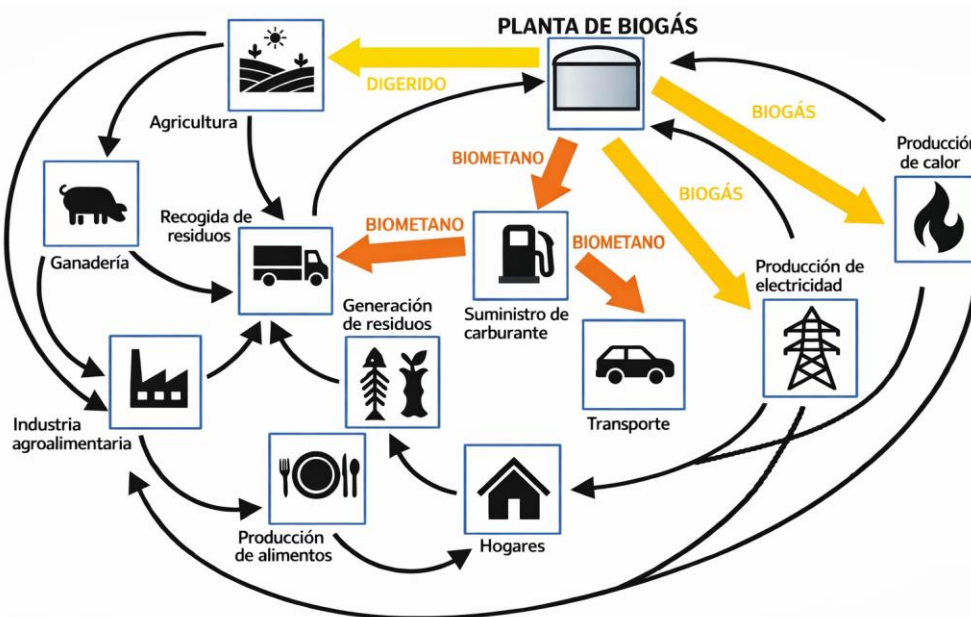


Figura 2-1 Diagrama de la economía circular del biogás [7].

La producción de biogás a partir de residuos orgánicos generados permite obtener un recurso energético versátil que puede destinarse a múltiples aplicaciones. En el ámbito industrial, resulta adecuado para procesos que requieren altas temperaturas y puede aportar carbono de origen renovable. En el sector de la edificación, el biometano permite la sustitución del gas natural y un aprovechamiento directo de la infraestructura gasista existente, evitando la necesidad de inversiones adicionales en nuevas redes. En cuanto a la movilidad, se presenta como una alternativa renovable competitiva para el transporte pesado y marítimo, con reducciones significativas de emisiones. [10].

Bajo el enfoque de residuo cero, el tratamiento de residuos genera, además de biogás, distintos flujos, como el digestato y el CO₂ biogénico. El digestato, rico en nutrientes, puede sustituir parcialmente a los fertilizantes sintéticos, mientras que el CO₂ recuperado constituye una materia prima de interés industrial. Por ejemplo, con 31 millones de toneladas de materia seca de digestato se podría conseguir lo observado en la Figura 2-2. Asimismo, el proceso permite recuperar parte del agua contenida en el residuo inicial para su reutilización en riego, contribuyendo a una gestión más eficiente del ciclo hídrico [3].

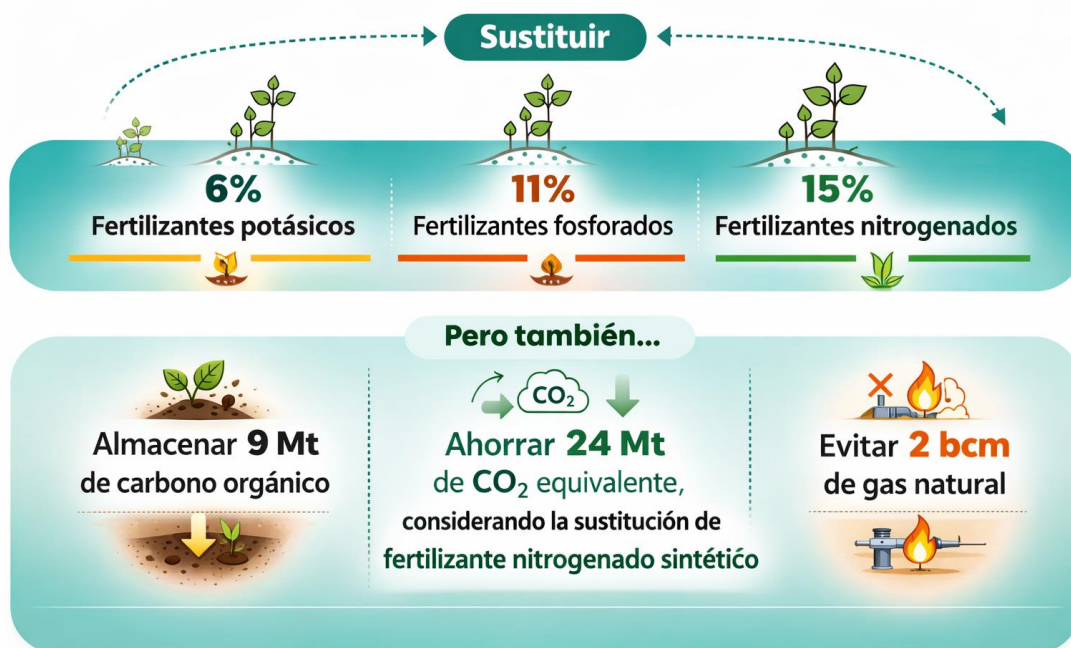


Figura 2-2 Aplicaciones de 31 Mt DM de digestato [11].

2.1.3 Autonomía energética y reducción de la huella ambiental

Aprovechar energéticamente los residuos representa una oportunidad clara para afrontar al mismo tiempo dos retos actuales: la presión sobre el suministro energético y el deterioro ambiental. Utilizar estos flujos como fuente de energía permite reducir la dependencia de combustibles fósiles y sus emisiones asociadas de extracción, producción y quema de combustible. Además, evita emisiones contaminantes que se generarían si los residuos se gestionaran de forma inadecuada. En este sentido, generar energía a partir de los propios residuos permite reforzar la autonomía energética al reducir la dependencia de suministros externos, un aspecto especialmente relevante en momentos de inestabilidad política en las zonas de mayor producción de combustibles fósiles. También, aumentar la autonomía energética resulta de gran interés en entornos aislados y con limitaciones logísticas, como es el caso de los buques.

Una ventaja técnica relevante del biogás frente a otras fuentes renovables, como la solar o la eólica, es su capacidad de almacenamiento, lo que permite una gestión flexible y programable del suministro energético. Esta característica resulta especialmente ventajosa en entornos donde la continuidad del suministro es crítica, ya que garantiza disponibilidad energética incluso en ausencia de condiciones ambientales favorables, reduciendo así la dependencia de aportes externos y mejorando la resiliencia operativa del sistema [12].

En paralelo, la reducción de la huella ambiental constituye una prioridad en la gestión de residuos, tanto por las emisiones asociadas a su degradación incontrolada como por la necesidad de disminuir el consumo de combustibles fósiles. Esta cuestión resulta especialmente relevante en España, donde el depósito en vertedero sigue siendo la principal vía de tratamiento de los residuos municipales, por delante de opciones de valorización material o energética. En este contexto, una gestión más eficiente de la fracción orgánica permitiría no solo reducir emisiones, sino también aprovechar su potencial energético mediante su conversión en biogás, contribuyendo así a un modelo más sostenible y circular. Esta situación se refleja en la Figura 2-3, elaborada a partir del Perfil Ambiental de España 2024, donde se observa el predominio del vertedero en el tratamiento de los residuos municipales en España [13].

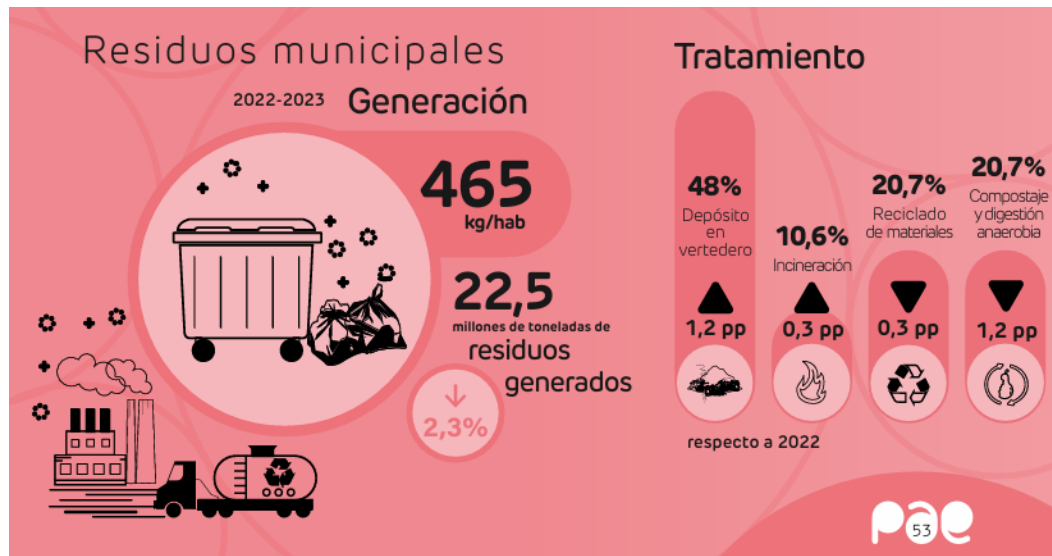


Figura 2-3 Generación y tratamiento de residuos municipales en España, Perfil Ambiental de España 2024 [13].

2.1.4 Potencial de producción de biogás en España

España dispone de uno de los mayores potenciales de producción de biogás de Europa gracias a la disponibilidad de residuos agrarios, ganaderos, industriales y municipales; sin embargo, el desarrollo del sector sigue todavía por debajo de su capacidad real y del alcanzado por otros países europeos. En 2025 se contabilizaron 270 plantas de biogás operativas, con una producción estimada de 4,098 GWh, 1,519 GWh de calor generado y 1,107 GWh de electricidad producida, en un contexto históricamente dominado por instalaciones ligadas a estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) y vertederos. Esta situación contrasta con los objetivos del PNIEC 2023-2030, que fija una meta de 20 TWh/año de biogás para 2030, frente a una producción actual que se ha mantenido durante la última década en una horquilla aproximada de 4 TWh anuales, lo que pone de manifiesto el amplio margen de crecimiento existente. En 2025, Cataluña se mantuvo líder en el sector, representando el 22 % de las plantas de biogás españolas, como aparece en la Figura 2-4. [14]

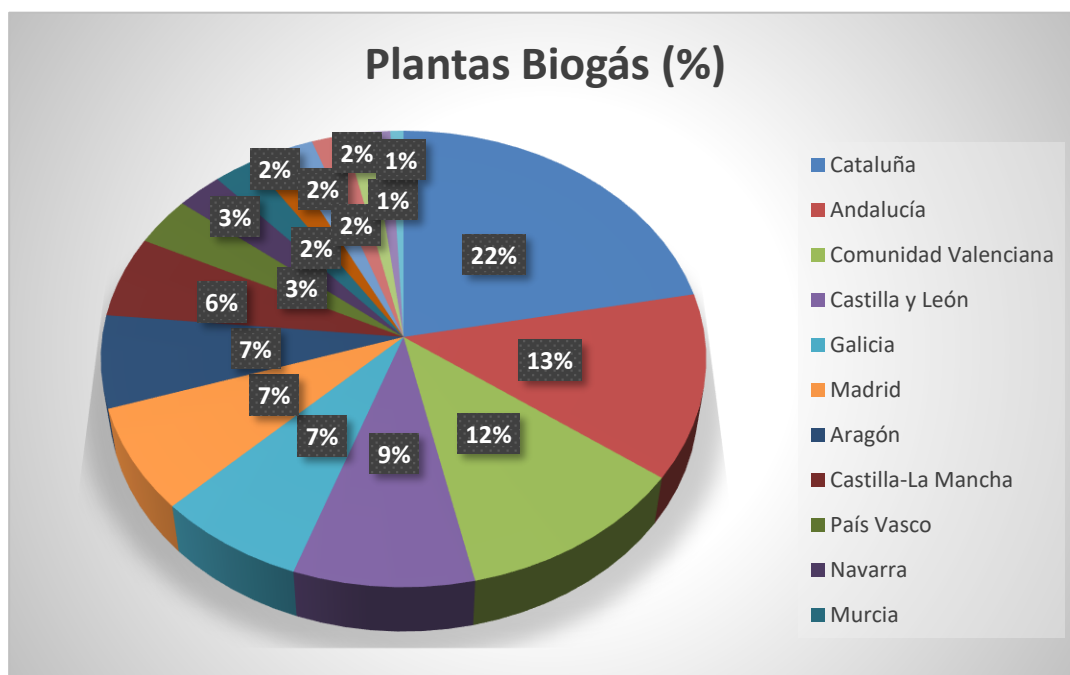


Figura 2-4 Distribución porcentual de las plantas de biogás en España por comunidad autónoma (elaboración propia a partir de [14]).

La Hoja de Ruta del Biogás identifica el desarrollo de esta tecnología como una oportunidad estratégica para España y plantea medidas destinadas a su impulso y promoción sostenible dentro del proceso de transición energética, destacando su capacidad para integrar la generación de energía renovable con la economía circular y la gestión de residuos orgánicos [7]. No obstante, persisten barreras relevantes como la complejidad administrativa, la viabilidad económica de los proyectos y la gestión del digerido. En este contexto, el biogás destaca no solo por su interés energético, sino también por su contribución a la gestión sostenible de residuos, la reducción de emisiones de metano y el impulso de la economía circular, lo que refuerza la relevancia de trabajos centrados en la valorización de residuos orgánicos mediante digestión anaerobia [14].

2.2 Digestión anaerobia como tecnología de valorización energética

2.2.1 Definición y principios generales de la digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico complejo que se desarrolla en ausencia de oxígeno molecular, mediante el cual la materia orgánica biodegradable se transforma en biogás, compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), y en un efluente estabilizado rico en nutrientes conocido como digestato. Esta tecnología se basa en la actividad metabólica conjunta de bacterias y arqueas que actúan en un medio anaerobio, donde se crean las condiciones necesarias para la conversión de la biomasa orgánica [5].

El correcto desarrollo del proceso depende de la acción coordinada de distintos grupos de microorganismos, en los que los productos generados por unas poblaciones sirven como sustrato para las siguientes. Esta interacción entre comunidades microbianas permite que la materia orgánica compleja se degrade de forma progresiva hasta transformarse en compuestos que pueden ser utilizados directamente en la producción de metano [15].

La eficiencia de la biometanización está relacionada con el control de parámetros operativos como el pH y la temperatura. Los microorganismos implicados, especialmente los metanógenos, son sensibles a variaciones en las condiciones del proceso y a la presencia de sustancias inhibitoras como el amoníaco. En conjunto, la digestión anaerobia destaca por su capacidad para reducir de forma significativa la carga contaminante, generando además una cantidad de lodos inferior a la de los sistemas aerobios tradicionales [16].

2.2.2 Etapas del proceso de digestión anaerobia

La digestión anaerobia se basa en la actuación sucesiva de distintos grupos de microorganismos organizados en cuatro etapas diferenciadas, como se puede observar en la Figura 2-5. Este proceso anaerobio permite la conversión progresiva de la materia orgánica en biogás [16] [17].

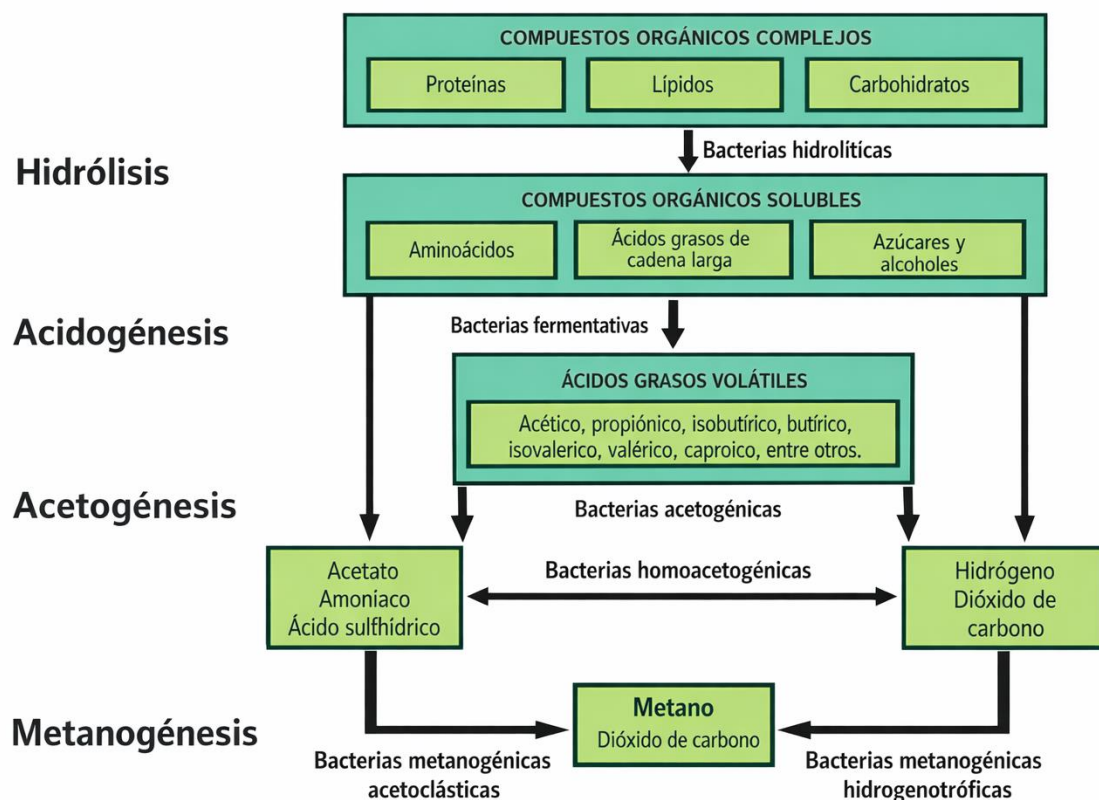


Figura 2-5 Etapas y microorganismos en la digestión anaerobia [17].

La primera etapa es la hidrólisis, en la que enzimas extracelulares rompen los compuestos orgánicos complejos, como carbohidratos, lípidos y proteínas, y los transforman en moléculas más simples y solubles, entre ellas azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. Esta fase suele limitar la velocidad global del proceso cuando se trabajan sustratos con un elevado contenido de materia orgánica o de complicada degradación.

La segunda etapa es la acidogénesis, considerada generalmente la más rápida del proceso. En ella, bacterias fermentativas convierten los productos solubles obtenidos en la hidrólisis en compuestos orgánicos intermedios, principalmente ácidos grasos volátiles como el acético, propiónico y butírico, además de alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono. Estos productos representan una fracción clave de la materia orgánica en transformación dentro del sistema.

Posteriormente tiene lugar la acetogénesis, durante la cual los compuestos generados en la fase anterior son transformados por bacterias acetogénicas en precursores directos del metano, fundamentalmente acetato, hidrógeno y dióxido de carbono. Para que esta etapa se desarrolle de forma estable, es necesario evitar la acumulación de hidrógeno en el medio, lo que se consigue mediante su consumo continuo por otros microorganismos presentes en el proceso.

Finalmente, en la metanogénesis, arqueas anaerobias estrictas producen metano a partir de los compuestos generados en las etapas previas. La mayor parte del metano se forma a partir del acetato, mientras que el resto se obtiene mediante la reducción del dióxido de carbono utilizando hidrógeno. Esta última etapa es la más sensible a desequilibrios operativos, por lo que requiere un control adecuado del pH y la temperatura para garantizar la estabilidad del proceso.

2.2.3 *Microorganismos implicados en el proceso*

La degradación anaerobia de la materia orgánica es un proceso biológico llevado a cabo por un consorcio de bacterias y arqueas metanógenas, que se agrupan tradicionalmente en cuatro categorías tróficas según su función en las etapas del proceso (Figura 2-5). En primer lugar, las bacterias hidrolíticas descomponen los polímeros orgánicos complejos en compuestos más simples. Posteriormente, las bacterias acidogénicas transforman estos productos en ácidos grasos volátiles e hidrógeno, que son convertidos en acetato por las bacterias acetogénicas. Finalmente, las arqueas metanógenas producen metano a partir de los sustratos generados, completando la transformación progresiva de la materia orgánica [18].

De forma complementaria, el proceso puede analizarse desde un enfoque metabólico que distingue tres grupos microbianos clave para evaluar la estabilidad del sistema y la competencia por los sustratos finales: bacterias homoacetogénicas, bacterias sulfatorreductoras y arqueas metanógenas. Las primeras contribuyen a la formación de acetato, mientras que las bacterias sulfatorreductoras pueden competir con las arqueas por el acetato y el hidrógeno en presencia de sulfatos, favoreciendo la generación de sulfuro de hidrógeno y afectando a la calidad del biogás [17].

El correcto desarrollo de la biometanización requiere la actuación coordinada y equilibrada de todos estos grupos microbianos. El conocimiento de la estructura y funcionamiento de esta comunidad resulta esencial para garantizar la estabilidad del proceso y optimizar la conversión de la materia orgánica en productos de valor energético [3].

2.2.4 *Tipologías de reactores anaerobios*

Los reactores anaerobios pueden clasificarse en dos grandes categorías: sistemas convencionales y sistemas de alto rendimiento.

Los sistemas convencionales destacan por su diseño sencillo y su operación poco compleja, aunque esta simplicidad implica la necesidad de tiempos de retención hidráulica elevados y conlleva rendimientos más bajos. No existe un control de los microorganismos existentes en el interior del sistema, de modo que el tiempo de permanencia del líquido y de la biomasa coincide. Se destacan tres tipos [19]:

- Los sistemas de bajo coste sin un modelo de flujo definido agrupan configuraciones muy básicas, son de construcción simple y normalmente operan sin agitación ni control térmico. Estas instalaciones requieren tiempos de retención prolongados, generalmente de varias decenas de días, para garantizar una degradación suficiente de la materia orgánica. Se encuentran de manera general en el medio rural.
- El reactor de flujo pistón se puede observar en la Figura 2-6. Este tipo de reactor resulta especialmente adecuado para el tratamiento de residuos sólidos, con bajo contenido en humedad, y ha servido de base para diseños usados en la fracción orgánica de los residuos domésticos.

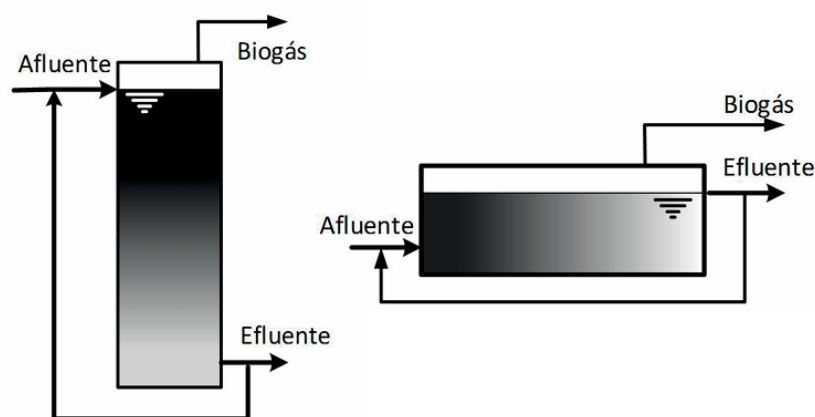


Figura 2-6 Reactores de flujo pistón, desplazamiento vertical y horizontal [19].

- El reactor de tanque agitado responde al esquema de reactor continuo de mezcla (CSTR). Se trata del más común en el sector, su amplia implantación se debe a la facilidad tanto de diseño como de operación, siendo habitual en el tratamiento de lodos de depuradora y residuos orgánicos de origen industrial, agropecuario o municipal.

Los sistemas de alto rendimiento se caracterizan por incorporar estrategias de retención de biomasa, lo que permite separar el tiempo de retención celular del hidráulico y trabajar con mayores cargas orgánicas, incrementando la eficiencia global del tratamiento. Se destacan cuatro tipos [19]:

- El reactor discontinuo secuencial se emplea principalmente en el tratamiento de residuos sólidos no bombeables, funcionando mediante ciclos sucesivos de alimentación, digestión y vaciado.
- El reactor de lecho granular expandido se basa en el crecimiento de los microorganismos en forma de gránulos densos, para el tratamiento de aguas residuales.
- El reactor de lecho expandido/fluidizado, véase en la Figura 2-7, combina un sistema trifásico gas-sólido-líquido con técnicas de inmovilización microbiana. En estos reactores, la biomasa no se encuentra en suspensión libre, sino adherida a partículas soporte de alta densidad, formando una biopelícula que se mantiene en suspensión gracias al flujo ascendente del fluido.

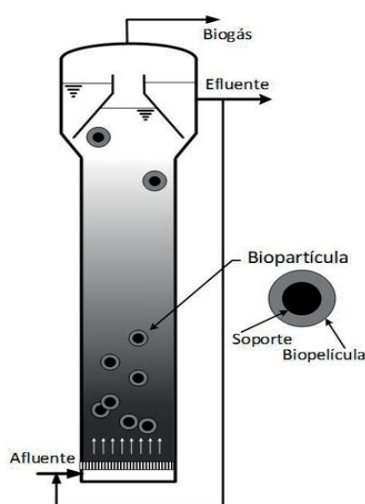


Figura 2-7 Reactor de lecho expandido/fluidizado [19].

Tras analizar las distintas configuraciones de reactores anaerobios, el reactor de tanque agitado continuo (CSTR), mostrado en la Figura 2-8, se considera la opción más adecuada para su implantación en un buque de medio o gran desplazamiento destinado al tratamiento de lodos, aceites de cocina usados y restos orgánicos de comedor. Esta elección se justifica por su buena adaptación a residuos heterogéneos con presencia de sólidos y grasas, su capacidad de homogeneización mediante agitación, su operación continua y su mayor estabilidad frente a variaciones en la carga orgánica. Además, permite un control más sencillo del proceso y resulta una alternativa robusta y factible para el entorno naval [19].

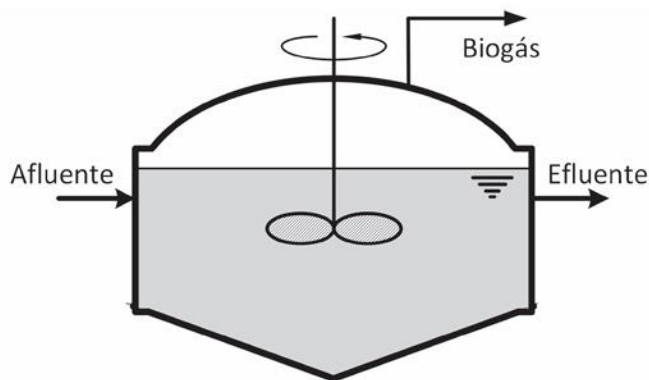


Figura 2-8 Reactor CSTR [19].

2.3 Codigestión anaerobia como estrategia de optimización

2.3.1 Concepto y fundamentos de la codigestión anaerobia

La codigestión consiste en el tratamiento anaerobio conjunto de residuos de distinto origen y composición, como deyecciones ganaderas, lodos de depuración o residuos alimentarios. Este enfoque técnico se basa en aprovechar la complementariedad entre sustratos para lograr procesos más eficientes, estables y viables desde el punto de vista económico. Una de sus ventajas es la capacidad de la mezcla para amortiguar las variaciones temporales y espaciales en la composición de los residuos tratados. Asimismo, la combinación de diferentes corrientes permite corregir limitaciones propias de determinados sustratos, como déficits nutricionales o una baja capacidad tampón, que pueden dificultar o incluso impedir su digestión anaerobia cuando se procesan de forma aislada [4].

En la actualidad, la codigestión anaerobia se considera una estrategia especialmente eficaz para compensar la escasez de nutrientes en residuos de baja carga orgánica. Este equilibrio nutricional se traduce en una mayor velocidad de degradación de la materia orgánica y, como consecuencia, en un aumento significativo de la producción de biogás. Además, la codigestión aporta ventajas operativas y económicas adicionales, como la reducción de costes mediante el uso compartido de infraestructuras y una mayor optimización de la recuperación de energía renovable [20].

En la Figura 2-9 se presentan las propiedades comparativas de diversos sustratos susceptibles de emplearse en codigestión. Las flechas orientadas en sentidos opuestos ponen de manifiesto una posible complementariedad entre ellos, ya que las limitaciones de un residuo pueden verse compensadas por las características del otro. A su vez, las flechas de igual tonalidad permiten establecer comparaciones directas entre los sustratos analizados. En cuanto a la alcalinidad de los lodos de depuradora, su marcada variabilidad dificulta realizar una comparación precisa [4].

	Deyecciones ganaderas	Lodos de depuración	Fracción orgánica de residuos municipales
Micro y macronutrientes	↑	↑	↓
Relación C/N	↓	↑ ↓	↑
Capacidad tampón (alcalinidad)	↑		↓
Materia orgánica biodegradable	↓	↑ ↓	↑

Figura 2-9 Análisis comparativo de residuos orgánicos para procesos de codigestión [4].

2.3.2 Características relevantes de los residuos orgánicos generados en buques

Los residuos orgánicos generados en buques presentan características fisicoquímicas muy diferentes entre sí, lo que condiciona su comportamiento en procesos de digestión y codigestión. Entre los parámetros más relevantes destacan el contenido en sólidos volátiles, el pH, la humedad, la composición en carbohidratos, proteínas y lípidos, así como la presencia de compuestos que puedan dificultar la estabilidad del proceso.

La fracción orgánica de residuos de comedor destaca por su elevada biodegradabilidad y su alto contenido en materia orgánica, con concentraciones apreciables de grasas, proteínas y carbohidratos, así como una elevada concentración de sólidos volátiles. Sin embargo, su pH naturalmente ácido puede favorecer desequilibrios si no se controla adecuadamente [21]. Los lodos de depuradora generados a bordo presentan, por el contrario, una fracción orgánica más limitada, un contenido de humedad muy elevado y una menor relación entre sólidos volátiles y totales, lo que reduce su potencial cuando se tratan de forma aislada [22]. En el caso del aceite de cocina usado, su alto contenido en lípidos le confiere una elevada densidad energética y un gran potencial de producción de metano, aunque también puede generar problemas de estabilidad asociados a la acumulación de ácidos grasos de cadena larga [23].

Estas diferencias justifican el interés de la codigestión, ya que la combinación de lodos, FORSU y aceite permite compensar las limitaciones de cada sustrato por separado. Mientras que los lodos aportan humedad y capacidad tampón, la FORSU contribuye con materia orgánica fácilmente degradable y el aceite incrementa el potencial energético global de la mezcla. Esta complementariedad puede traducirse en una mejora del equilibrio nutricional, de la estabilidad del proceso y del rendimiento energético final [4] [23].

2.3.3 Estrategias de mezcla y optimización de proporciones

La optimización de las mezclas en codigestión anaerobia es un aspecto clave para maximizar la producción de biogás y mantener la estabilidad del proceso. En el presente trabajo, este análisis se enfoca específicamente en los residuos orgánicos generados a bordo de los buques, principalmente lodos de depuradora, fracción orgánica de residuos de comedor y aceite de cocina usado, por ser las corrientes con mayor interés para su aprovechamiento energético. Además, se estudia la glicerina como sustrato complementario debido a su elevado potencial de producción de biogás, si bien su posible aplicación estaría más vinculada a una instalación en tierra que a su almacenamiento o generación habitual a bordo. A continuación, se presentan algunas estrategias de mezcla aplicables a los residuos estudiados:

- En la codigestión de lodos de depuradora con residuos alimentarios, proporciones cercanas al 65:35 % (en base a sólidos volátiles) han demostrado mejorar de forma significativa tanto

la generación de biogás como la eliminación de sólidos volátiles frente a la monodigestión. Además, la aplicación de una pre-fermentación del residuo alimentario contribuye a una mayor estabilidad durante la fase de arranque del digestor [21].

- Los aceites y grasas residuales destacan por su alto contenido lipídico y su elevado potencial energético. No obstante, los estudios indican que las proporciones óptimas en mezclas con lodos de EDAR se sitúan en rangos moderados, generalmente entre el 40 y el 60 % (en base a sólidos volátiles), ya que valores superiores suelen generar problemas operativos como flotación de lodos, espumas y limitaciones en la transferencia de masa [20].
- La glicerina cruda se presenta como un co-sustrato altamente eficaz debido a su elevada biodegradabilidad anaerobia. Pequeñas adiciones, del orden del 0,5–1,2 % (en volumen), permiten incrementos sustanciales en la producción de metano. Sin embargo, una dosificación excesiva puede provocar la acumulación de ácidos grasos volátiles y la acidificación del medio, afectando negativamente a la actividad metanogénica [20].

Finalmente, el régimen de operación condiciona el rendimiento del proceso. Los residuos alimentarios muestran mejores resultados en condiciones termófilas, mientras que la glicerina cruda, los residuos agrícolas y los FOG (grasas, aceites y materia grasa) presentan mayor estabilidad en régimen mesófilo. En conjunto, la correcta selección de co-sustratos y proporciones de mezcla resulta clave para optimizar la producción de biogás y garantizar un funcionamiento estable del sistema [20].

2.4 Parámetros operativos y criterios de diseño del proceso de digestión anaerobia

2.4.1 Temperatura de operación, pH y alcalinidad

La temperatura es uno de los parámetros más influyentes en la digestión anaerobia, ya que determina qué grupos de microorganismos se desarrollan y permanecen activos en el digestor. Por lo general, el proceso se lleva a cabo en condiciones isotérmicas, operando en regímenes mesofílicos, alrededor de 35 °C, o termofílicos, en torno a 55 °C. Dado que la microbiota anaerobia es especialmente sensible a las variaciones térmicas, para garantizar un funcionamiento estable resulta fundamental que los cambios de temperatura se mantengan dentro de márgenes muy reducidos, habitualmente inferiores a 3 °C. Aunque el régimen termofílico permite acelerar la hidrólisis y reducir los tiempos de retención, también exige un control más cuidadoso debido a su mayor vulnerabilidad frente a perturbaciones [19].

La producción de metano tiene lugar dentro de un intervalo de pH relativamente estrecho, comprendido entre 6,5 y 8,5, siendo más favorable cuando el pH se sitúa entre 7,0 y 8,0. Valores inferiores a 6,0 o superiores a 8,5 provocan una inhibición severa del proceso y pueden comprometer seriamente la estabilidad del digestor si no se corrigen a tiempo. La acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) tiende a reducir el pH, mientras que la liberación de amoníaco durante la degradación de proteínas puede elevarlo, por lo que el seguimiento continuo de este parámetro resulta esencial [24].

La alcalinidad refleja la capacidad tampón del sistema y está asociada principalmente al equilibrio entre dióxido de carbono y bicarbonato. Valores comprendidos entre 2000 y 2500 mg/L permiten mantener el pH dentro de rangos adecuados. La estabilidad del proceso suele evaluarse mediante la relación alcalinidad intermedia/alcalinidad total (AI/AT), donde la AI mide de forma indirecta la acumulación de ácidos grasos volátiles, mientras que la AT representa la capacidad tampón total del sistema para neutralizar dichos ácidos. Valores de AI/AT inferiores a 0,25 indican un funcionamiento estable, mientras que valores superiores a 0,3 alertan de posibles desequilibrios, y relaciones cercanas o superiores a 0,8 están asociadas a la inhibición de la población metanogénica y a una acidificación inminente del reactor [16].

2.4.2 Estabilidad del proceso y criterios de control

La monitorización de variables operativas es esencial para garantizar la estabilidad y mejorar la eficiencia de los digestores anaerobios. Entre los indicadores más utilizados se encuentran la producción de biogás, los ácidos grasos volátiles (AGV), la alcalinidad, el pH y el hidrógeno. Los AGV son especialmente relevantes al ser intermediarios clave del proceso anaerobio, ya que su acumulación indica de forma directa situaciones de desequilibrio, aunque su análisis resulta complejo y costoso. Por su parte, el hidrógeno puede actuar como indicador temprano de inestabilidad, ya que su acumulación refleja alteraciones en el equilibrio microbiológico del proceso, mientras que una disminución en la producción de biogás puede asociarse a inhibición o pérdida de actividad metanogénica. En los últimos años se han propuesto indicadores indirectos, como el carbono no soluble y el carbono no ácido, con el objetivo de detectar de manera anticipada la desestabilización del digestor. No obstante, no existe consenso sobre un único parámetro óptimo de control, concluyéndose que la combinación de varios indicadores proporciona un seguimiento más fiable del proceso [25].

La instrumentación empleada en la digestión anaerobia puede agruparse en tres niveles, como se muestra en la Figura 2-10, según su disponibilidad y coste: instrumentación básica, basada en sensores sencillos y de bajo mantenimiento como el caudal de alimentación; instrumentación intermedia, que incluye equipos de mayor complejidad como los sensores de hidrógeno; e instrumentación avanzada, asociada a la monitorización de AGV y otras variables de análisis complejo. En los esquemas de control avanzado, la variable manipulable más habitual es el caudal de alimentación, cuya regulación permite ajustar indirectamente la velocidad de carga orgánica al estar relacionada inversamente con el tiempo de retención hidráulica [25].

Instrumentación básica (mediciones convencionales)	
✓	Caudal de alimentación
✓	Caudal de recirculación
✓	pH de entrada
✓	pH en el digestor
✓	Temperatura en la entrada
✓	Temperatura en el digestor
✓	Caudal de biogás
Instrumentación media (mediciones asumibles)	
✓	Composición del biogás (%CH ₄ , %CO ₂)
✓	Hidrógeno en la fase gas
✓	Presión total en la fase gas
Instrumentación avanzada (mediciones costosas)	
✓	Alcalinidad total y de bicarbonatos
✓	AGVs
✓	DQO
✓	SST

Figura 2-10 Niveles de la instrumentación en plantas anaerobias [25].

En la práctica, el control de los procesos anaerobios se limita mayoritariamente a la automatización de las operaciones básicas necesarias para su funcionamiento autónomo. Este enfoque, apoyado en sistemas de supervisión, permite al operador fijar las consignas de operación y se conoce como control convencional. Aunque existen numerosas propuestas de mejora en la bibliografía, la mayoría persiguen mantener una o varias variables de proceso en torno a valores de referencia predefinidos [25].

2.4.3 Tiempo de retención hidráulica y carga orgánica aplicada

El tiempo de retención hidráulico (TRH) es la relación entre el volumen útil del reactor y el caudal de alimentación, y representa el tiempo medio de permanencia del fluido en el sistema. Un concepto clave es el tiempo de retención mínimo o crítico, que se alcanza cuando la velocidad de salida de los microorganismos iguala su velocidad de crecimiento en el interior del reactor. Si el sistema opera por debajo de este umbral, se produce el denominado lavado de población, por el cual la concentración de microorganismos activos disminuye hasta desaparecer, deteniéndose el proceso de biometanización [26].

La Carga Orgánica Aplicada expresa la cantidad de sólidos volátiles alimentados diariamente al digestor por unidad de volumen del reactor. Estos sólidos corresponden a la fracción orgánica biodegradable, susceptible de digestión. La Carga Orgánica Aplicada es un parámetro fundamental en el dimensionamiento del sistema y suele definirse para evitar fallos operativos. El límite superior de esta carga está generalmente condicionado por la acumulación de compuestos tóxicos, especialmente amoníaco [27].

La selección conjunta de ambos parámetros depende de las características del sustrato tratado. Para la fracción orgánica de residuos alimentarios urbanos se recomiendan cargas bajas, inferiores a 2 g SV/L, junto con tiempos del orden de 25 días, debido a su elevada concentración de materia orgánica. En cambio, los lodos de EDAR suelen permitir tiempos más cortos, alrededor de 17 días, con cargas de hasta 2,35 g SV/L. Aunque un aumento de la carga incrementa la disponibilidad de carbono, valores excesivos pueden provocar la acumulación de ácidos grasos volátiles y dañar componentes como los sistemas de agitación. Por ello, tiempos comprendidos entre 20 y 30 días suelen asociarse a una codigestión estable y a una producción sostenida de biogás [20].

2.4.4 Criterios generales de diseño y dimensionamiento

El dimensionado de una planta de digestión anaerobia tiene como finalidad definir el volumen mínimo necesario para tratar un caudal determinado y alcanzar la eliminación prevista de materia orgánica. Este análisis se fundamenta en criterios de ingeniería de la reacción, mediante balances de materia aplicados al sustrato, la biomasa y los productos del proceso. Debido a su complejidad, el diseño se apoya en dos modelos teóricos extremos: el reactor de mezcla completa, donde el contenido es homogéneo y equivalente al efluente, y el reactor de flujo pistón, en el que el sustrato avanza de forma secuencial sin mezclado [26].

Se destacan los siguientes elementos con sus requerimientos de diseño, véase en la Figura 2-11 [3]:

- Depósito afluente: debe disponer de un volumen suficiente para almacenar la cantidad de sustrato generada diariamente. Se suele dimensionar para una capacidad equivalente a tres días de funcionamiento por motivos de seguridad y continuidad.
- Digestor anaerobio: su volumen se calcula a partir del tiempo de retención hidráulica óptimo, incorporando un margen adicional de seguridad del 25 %. Habitualmente, los digestores presentan geometría cilíndrica y son estancos al aire y al agua, por lo que resulta fundamental considerar adecuadamente la superficie de aislamiento térmico de paredes y base.
- Depósito del efluente (digestato): el efluente generado tras el proceso debe almacenarse de forma temporal, siendo habitual un dimensionado equivalente a una capacidad de dos días.
- Gasómetro: constituye el sistema de almacenamiento del biogás producido antes de su aprovechamiento energético. Su volumen se determina en función del rendimiento

energético del proceso, considerando generalmente una capacidad de almacenamiento a dos días de producción.

- La antorcha y la válvula de seguridad son elementos de protección del sistema de biogás. La antorcha quema el gas cuando no puede almacenarse o utilizarse, mientras que la válvula libera biogás para evitar sobrepresiones si fallan otros dispositivos de control.
- Triturador: equipo imprescindible cuando se tratan residuos sólidos de tamaño elevado y no homogéneo. Debe dimensionarse para el volumen diario de residuos generados, añadiendo un 25 % adicional para compensar los incrementos de volumen asociados al proceso de triturado.
- El equipo de aprovechamiento energético permite utilizar el biogás generado, generalmente mediante aplicaciones térmicas, como calefacción o secado, o a través de sistemas de cogeneración que producen simultáneamente energía eléctrica y calor mediante su combustión.

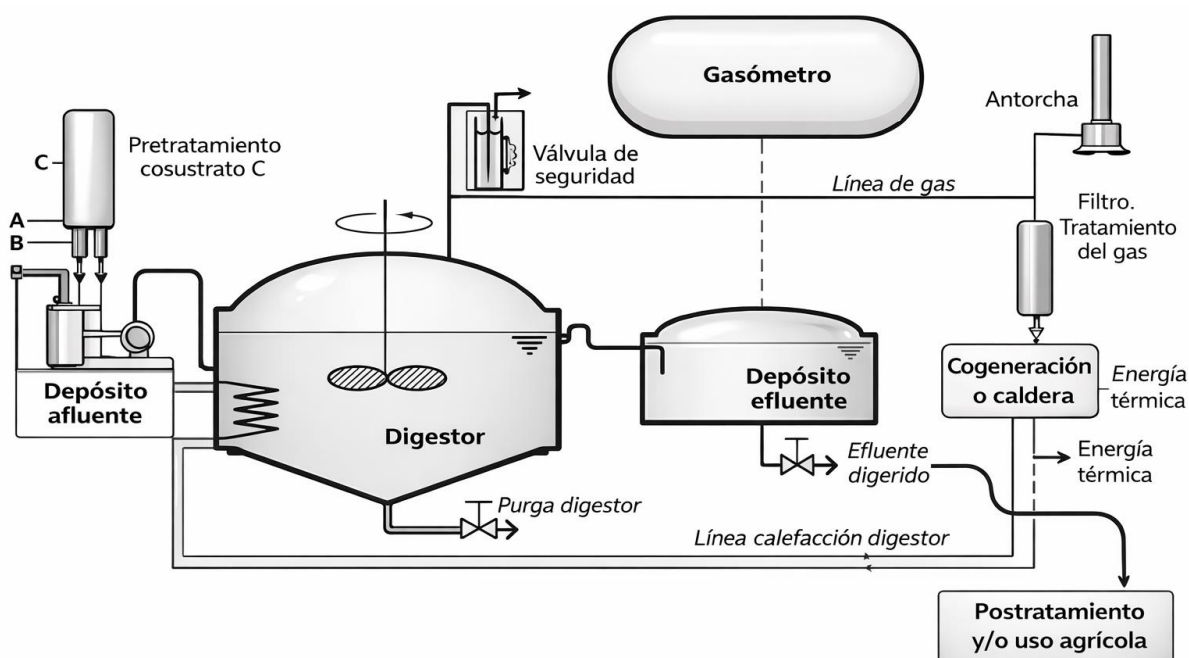


Figura 2-11 Componentes de una planta de biogás [28].

2.5 Tratamiento, calidad y aplicaciones energéticas del biogás

2.5.1 Composición

La caracterización del biogás resulta esencial para evaluar tanto su aprovechamiento energético como los tratamientos previos necesarios antes de su utilización. Se trata de una mezcla gaseosa formada principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), cuya proporción depende del tipo de sustrato tratado y de las condiciones de operación del digestor. De forma general, el contenido de metano suele situarse entre el 45 % y el 80 %, mientras que el CO_2 representa aproximadamente entre el 20 % y el 55 % del volumen total. Según el origen del biogás, los componentes de este varían según la Figura 2-12 [29].

Además de estos componentes mayoritarios, el biogás incorpora una serie de impurezas que condicionan su uso técnico. Entre ellas, el sulfuro de hidrógeno (H_2S) destaca por su elevada toxicidad

y su marcado carácter corrosivo, lo que supone un riesgo significativo para motores, equipos y conducciones. El biogás también se genera saturado de vapor de agua, circunstancia que reduce su poder calorífico y puede provocar problemas operativos asociados a la condensación. Otros compuestos de interés son el amoníaco (NH_3), especialmente relevante cuando se digieren sustratos ricos en nitrógeno, y los siloxanos, frecuentes en lodos de depuradora, responsables de la formación de depósitos abrasivos durante la combustión. Asimismo, la presencia de oxígeno, nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles debe controlarse para evitar fenómenos de corrosión o emisiones indeseadas [29].

Componente	Residuos agrarios	Lodos de depuradora	Residuos industriales	Gas de vertedero	Efecto
CH_4 (% Vol.)	50-80	50-80	50-70	45-65	Combustible
CO_2 (% Vol.)	30-50	20-50	30-50	34-55	Diluyente, asfixiante
H_2O	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Corrosivo, reduce PC
H_2	0-2	0-5	0-2	0-1	Combustible
H_2S (mg/Nm ³)	100-7000	0-1 (% Vol)	0-8 (% Vol)	0,5- 100	Corrosivo, tóxico
NH_3	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas	Corrosivo
CO (Vol.)	< 1	< 1	< 1	< 1	Tóxico
N_2 (Vol.)	0-1	0-3	0-3	0-20	Diluyente
O_2 (Vol.)	0-1	0-1	0-1	0-1	Corrosivo
COV*	Trazas	Trazas	Trazas	0,01-0,6%*	Abrasivo
Siloxanos	-	0-0,02	0-0,02	0,02	Abrasivo
Partículas	Presentes	Presentes	Presentes	Siloxanos	Obstructor

* Compuestos orgánicos volátiles (terpenos, ésteres, hidrocarburos halogenados, etc.)

Figura 2-12 Componentes del biogás según su origen [29].

Desde el punto de vista energético, el poder calorífico inferior del biogás varía aproximadamente entre 17 y 34 MJ/m³, en función de su concentración de metano. Para su inyección en redes de gas natural se emplea el índice de Wobbe, parámetro que garantiza la compatibilidad del gas con los sistemas de consumo, estableciendo rangos normativos específicos de calidad [29].

2.5.2 Alternativas de aprovechamiento energético

Como se puede observar en la Figura 2-13, el biogás constituye un vector energético flexible con múltiples aprovechamientos. La opción más directa consiste en su utilización para la generación de calor o vapor mediante calderas, destinado a calefacción o a procesos térmicos dentro de la propia instalación. Esta alternativa requiere un escaso control de calidad, aunque su rendimiento global suele verse limitado por la demanda térmica disponible, que en muchos casos es variable o estacional [29].

Una aplicación con mayor eficiencia energética es la cogeneración simultánea de electricidad y calor, habitualmente mediante motores de combustión interna o microturbinas. Estas últimas ofrecen una elevada modularidad, ya que permiten instalar varias unidades en paralelo y adaptarlas a la disponibilidad instantánea de biogás. Sin embargo, su rendimiento eléctrico es inferior al de los motores convencionales, por lo que resultan especialmente adecuadas en escenarios donde se prioriza la recuperación de energía térmica frente a la producción eléctrica [29].

Cuando se aplica un proceso de *upgrading*, el biogás puede enriquecerse hasta transformarse en biometano, ampliando notablemente sus posibilidades de uso. El biometano puede inyectarse en la red de gas natural, aprovechando infraestructuras de transporte y almacenamiento existentes para cubrir demandas alejadas del punto de generación. Además, puede emplearse como combustible para vehículos

en forma comprimida o licuada, con prestaciones equiparables al gas natural. Finalmente, este gas renovable también puede utilizarse como materia prima en procesos industriales, como la síntesis de productos químicos de alto valor añadido [29].

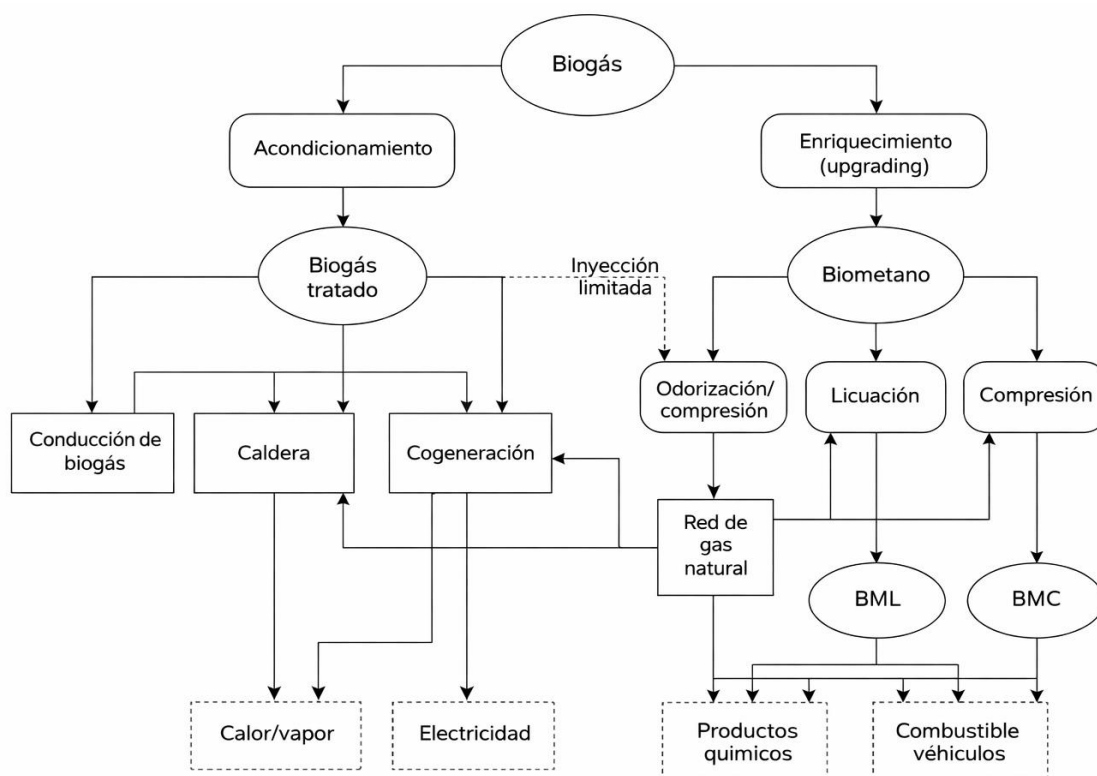


Figura 2-13 Aplicaciones del biogás [29].

2.5.3 Procesos de limpieza y depuración

El acondicionamiento del biogás depende de la alternativa de aprovechamiento seleccionada, ya que el nivel de depuración requerido varía en función del uso final del gas. En aplicaciones térmicas sencillas, como calderas, suele ser suficiente una limpieza básica orientada a la eliminación de humedad, sulfuro de hidrógeno y partículas. En cambio, cuando el biogás se destina a motores o sistemas de cogeneración, se requiere una depuración más exigente para evitar problemas de corrosión, abrasión o pérdida de rendimiento. Por último, si el objetivo es obtener biometano, es necesario aplicar procesos de upgrading que permitan elevar la concentración de metano y cumplir las especificaciones de calidad requeridas. Entre los principales compuestos a eliminar o reducir se encuentran la humedad, el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el amoníaco (NH_3), los siloxanos y las partículas sólidas.

El biogás sale del digester saturado de vapor de agua, lo que disminuye su poder calorífico y favorece la aparición de condensaciones corrosivas en las conducciones. Para reducir este contenido de humedad se emplean métodos como el enfriamiento del gas mediante tuberías enterradas o sistemas de refrigeración, así como procesos de absorción con glicol o adsorción en lechos de sílica gel o carbón activado. Asimismo, es imprescindible disponer purgadores en los puntos bajos de la red para evacuar el agua condensada.

El H_2S constituye uno de los contaminantes más problemáticos debido a su elevada toxicidad y agresividad frente a componentes metálicos. Su eliminación puede realizarse con biofiltros, véase en la Figura 2-14, favoreciendo la oxidación del sulfuro mediante la adición controlada de pequeñas cantidades de aire (4–6 %) en el espacio de cabeza del digester o mediante biofiltros externos. En estos últimos, el biogás atraviesa un lecho fijo colonizado por microorganismos, que requiere un riego

periódico con una solución nutritiva para mantener su actividad y arrastrar el azufre formado. Como etapa complementaria, suelen emplearse filtros de carbón activo impregnado con óxidos de hierro.

Los siloxanos, frecuentes en biogás procedente de lodos de depuradora, originan depósitos abrasivos de sílice durante la combustión, por lo que se eliminan principalmente mediante adsorción en carbón activo, siempre después de la deshumidificación. El amoníaco, por su parte, se reduce aprovechando su alta solubilidad en agua durante las etapas de secado o lavado del gas. Finalmente, la instalación de filtros mecánicos permite retirar partículas y aerosoles que podrían provocar obstrucciones o daños en los equipos de aprovechamiento energético [29]. Figura 2-14

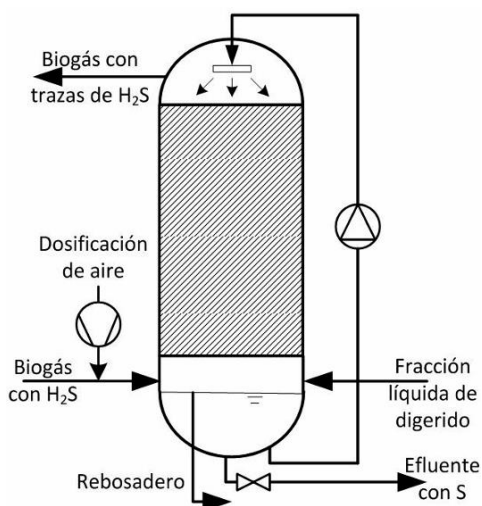


Figura 2-14 Biofiltro para la eliminación de sulfuro de hidrógeno [29].

2.5.4 Purificación del biogás en metano

El proceso de enriquecimiento del biogás, denominado habitualmente *upgrading*, tiene como objetivo principal la eliminación del dióxido de carbono (CO_2) con el fin de obtener biometano, un gas cuyas propiedades energéticas y concentración de metano son comparables a las del gas natural. Dado que muchas de las tecnologías empleadas para separar el CO_2 también retienen otros compuestos presentes en el biogás, es práctica habitual incorporar una etapa previa de desulfuración, destinada a evitar que el sulfuro de hidrógeno interfiera o contamine la corriente de CO_2 separada. [29]

Entre las tecnologías más extendidas se encuentra la absorción física con agua a presión, que se basa en la mayor solubilidad del CO_2 frente al metano, operando normalmente en un intervalo de presiones comprendido entre 4 y 10 bar. Una alternativa a este método es el uso de disolventes orgánicos, como el etilenglicol, que permiten instalaciones más compactas debido a su mayor capacidad de absorción. Por otro lado, la absorción química mediante aminas se apoya en reacciones químicas reversibles con el CO_2 y posibilita trabajar a presiones cercanas a la atmosférica, aunque exige un aporte térmico elevado para la regeneración del absorbente, alcanzando temperaturas del orden de 160 °C. [29]

Otra opción tecnológica es la adsorción por alta presión (PSA), que emplea materiales como carbón activo o zeolitas para retener selectivamente el CO_2 mediante ciclos de presurización y despresurización. Este sistema puede eliminar también nitrógeno y oxígeno, si bien puede provocar pérdidas de metano de hasta un 10 %. La separación por membranas utiliza materiales poliméricos permeables al CO_2 y al vapor de agua, pero impermeables al metano, funcionando habitualmente a presiones cercanas a 20 bar. Finalmente, el proceso criogénico separa el CO_2 en fase líquida mediante enfriamiento extremo, destacando por no requerir ni productos químicos ni consumo de agua. En la práctica industrial actual, las tecnologías más implantadas son la absorción con agua y los sistemas PSA. [29]

2.6 Digestión anaerobia en buques

2.6.1 Aplicación real de la digestión anaerobia en buques

La digestión anaerobia en el entorno marítimo se plantea como una alternativa de gran interés para aprovechar energéticamente los residuos orgánicos producidos a bordo. Aunque esta tecnología está ampliamente consolidada en instalaciones terrestres, no se han identificado todavía implantaciones plenamente operativas de sistemas de digestión anaerobia en cruceros en servicio real [30]. Por ello, el desarrollo de esta solución en buques se encuentra aún en una fase principalmente orientada a estudios de viabilidad, análisis de integración y evaluación de su potencial técnico y ambiental.

Los residuos orgánicos generados en cruceros, especialmente los residuos alimentarios, las aguas negras y los lodos, presentan un potencial relevante para la producción de biogás. Se estima una capacidad de producción de 159 L de metano por pasajero y día, lo que equivale a una potencia térmica aproximada de 66 W por persona y en torno a 198 kW por buque para un crucero con 3000 pasajeros. Además, la aplicación de la digestión anaerobia permitiría reducir aproximadamente un 76 % de la demanda química de oxígeno (DQO) asociada a estos residuos [30].

En consecuencia, aunque no puede confirmarse una implantación real consolidada en buques comerciales, sí que se aportan evidencias suficientes para sostener que su aplicación es técnicamente viable y que podría proporcionar beneficios energéticos y ambientales significativos [30].

2.6.2 Limitaciones del diseño en entorno naval

La instalación de una planta de biogás del tipo representado en la Figura 2-11 no sería viable en cualquier buque, sino únicamente en unidades de gran desplazamiento que dispongan de espacio suficiente para integrar los distintos equipos del sistema. El esquema mostrado corresponde a una planta convencional con varios elementos auxiliares, como depósito de afluente, digestor, tratamiento del gas, aprovechamiento energético y depósito de efluente, cuya implantación completa resulta difícilmente compatible con las limitaciones de volumen y distribución interna de buques medianos o pequeños. Por ello, su posible aplicación en el entorno naval debe plantearse únicamente para buques grandes y mediante una adaptación simplificada del sistema original.

En este contexto, las principales limitaciones no vendrían tanto dadas por la inclinación del buque, que no supondría un problema determinante en configuraciones basadas en reactores CSTR, sino por la disponibilidad de espacio, el peso añadido condicionando la estabilidad del buque, la necesidad de integrar los equipos sin interferir con la operatividad del buque y la exigencia de emplear materiales resistentes a la corrosión y a las condiciones marinas. Por tanto, la viabilidad de una instalación de este tipo a bordo dependería de una solución compacta, robusta y específicamente adaptada al entorno naval, siendo los buques de gran tamaño los candidatos más adecuados para su posible implantación.

2.6.3 Arquitectura y estabilidad de la planta

La configuración técnica requerida para la implantación de biodigestores a bordo podría plantearse a partir de un área de pretratamiento destinada a la gestión de los residuos orgánicos de comedor. En esta fase, sería necesaria la incorporación de equipos de trituración industrial instalados bajo los fregaderos de cocina, cuya función sería reducir el tamaño de los restos alimentarios y facilitar su conducción hasta un tanque de recepción. En dicho depósito, los residuos podrían someterse a un proceso de homogeneización mediante la adición de agua y el empleo de agitadores sumergibles. Esta dilución permitiría asegurar un régimen de bombeo más estable y eficiente hacia el digestor principal. A este tanque también podrían impulsarse los lodos previamente generados y tratados en la planta TAR, así como los residuos de aceite de cocina. Todas estas corrientes serían conducidas mediante un sistema de bombeo controlado, integrándose en el reactor como sustratos adicionales para su posible valorización biológica [31].

Para mantener el proceso en condiciones mesofílicas, en torno a 40 °C, el sistema integra intercambiadores de calor que recuperan la energía térmica contenida en los gases de escape del motor principal. Asimismo, resulta imprescindible emplear materiales con elevada resistencia a la corrosión como acero inoxidable con el fin de garantizar la durabilidad de la instalación en un entorno marino [32].

Un aspecto determinante en el diseño del sistema es el cumplimiento de los criterios de estabilidad del buque, dado que la incorporación de tanques de gran volumen puede modificar de forma significativa la posición del centro de gravedad. Resulta imprescindible efectuar cálculos específicos para controlar el efecto de superficies libres en depósitos parcialmente llenos, cuya influencia se intensifica ante el movimiento dinámico de la carga en situaciones de mar adversa. La planta debe instalarse en las proximidades de la sala de máquinas para permitir el aprovechamiento térmico derivado del recirculado de gases, con una adecuada distribución de masas que preserve la seguridad y operatividad del buque [32].

2.6.4 Aplicaciones y acondicionamiento del biogás

En los buques, el biogás presenta una elevada flexibilidad de uso, ya que puede emplearse en calderas, turbinas de gas, en motores de combustión interna adaptados para producir energía mecánica destinada a la propulsión o en generadores auxiliares de alto rendimiento [32], con el objetivo de atender la demanda eléctrica de los servicios secundarios del buque sin recurrir de forma continua al motor principal. Gracias a su poder calorífico, este combustible renovable puede sustituir parcialmente a los derivados del petróleo convencionales, posibilitando tanto la generación de electricidad mediante alternadores como la obtención de energía térmica aprovechable a través de sistemas de cogeneración para los servicios a bordo. La incorporación de esta solución energética reduce de forma notable la dependencia de combustibles fósiles externos y refuerza la operatividad al integrar fuentes de origen renovable en su sistema energético [31].

Para garantizar la operatividad y seguridad del sistema, el biogás requiere un proceso previo de acondicionamiento antes de su utilización en los equipos auxiliares. Este tratamiento incluye la eliminación de la humedad mediante sistemas de secado por refrigeración y la reducción del contenido de ácido sulfhídrico a través de filtros de carbón, con el fin de prevenir fenómenos de corrosión y emisiones odoríferas en los motores. Una vez deshumidificado, desulfurado y comprimido mediante equipos específicos, el gas se conduce de manera controlada hacia el sistema de cogeneración. En estas condiciones, el biogás se convierte en un recurso energético renovable apto para su uso inmediato o para su almacenamiento temporal [32].

3 DESARROLLO DEL TFG

En esta sección se describe de forma detallada el equipo utilizado y el procedimiento seguido para la realización de los tres experimentos de digestión anaerobia llevados a cabo en el marco de este trabajo. Se presentan paso a paso los cálculos y criterios empleados para la preparación de los reactores de cada experimento. Asimismo, se llevó a cabo un análisis elemental de unas muestras pertenecientes a los sustratos empleados en los ensayos, con el fin de calcular su potencial teórico de producción de metano y el poder calorífico asociado. De forma complementaria, se realizó un estudio del potencial de producción de metano en tres buques de la Armada, a partir de los cálculos teóricos previos y de la estimación de las cantidades de residuos orgánicos generadas a bordo en cada unidad.

3.1 Sistema AMPTS para la evaluación del potencial bioquímico de metano

3.1.1 Potencial bioquímico del metano

El Potencial Bioquímico de Metano (BMP) es un método experimental ampliamente empleado para evaluar la biodegradabilidad y el potencial energético de residuos orgánicos y aguas residuales. El ensayo se basa en la incubación de un sustrato determinado junto con un inóculo anaerobio, habitualmente procedente de un digestor estable, bajo condiciones controladas de temperatura y ausencia de oxígeno. A lo largo de un periodo que suele oscilar entre 30 y 60 días, la materia orgánica es transformada mediante digestión anaerobia, produciendo metano y dióxido de carbono. Esta técnica resulta clave para anticipar el comportamiento de los residuos a escala real y apoyar el dimensionamiento de los digestores [33].

El propósito principal de los ensayos BMP es cuantificar la producción neta de metano asociada a una combinación concreta de sustrato e inóculo en condiciones de laboratorio reproducibles. Entre sus aplicaciones más relevantes se encuentra la definición de mezclas óptimas de alimentación para los digestores, así como la evaluación previa de pretratamientos físicos, químicos o biológicos. De este modo, se puede verificar si las mejoras en la producción de biogás compensan los costes adicionales antes de su implantación a gran escala [34].

En el marco del desarrollo de las energías renovables, el BMP se ha consolidado como la herramienta de referencia para la selección y comparación de sustratos en digestión anaerobia. Sin embargo, pese a los intentos de normalización mediante estándares internacionales, persisten diferencias significativas entre estudios debido a la diversidad de equipos y protocolos utilizados. Por esta razón, la aplicación rigurosa de criterios de calidad y la validación cuidadosa de los resultados son esenciales para asegurar la fiabilidad y comparabilidad de los datos obtenidos [35].

3.1.2 Variables clave

La elección del inóculo constituye uno de los aspectos más determinantes en los ensayos BMP, ya que aporta la comunidad microbiana responsable de la degradación anaerobia. Su procedencia, el momento de toma de muestra y la concentración empleada influyen de manera directa en la producción de metano registrada. A nivel internacional se emplean inóculos muy diversos, procedentes de lodos de depuradora, plantas agrícolas de biogás o instalaciones de tratamiento de biorresiduos. En cualquier caso, se recomienda priorizar inóculos previamente adaptados al tipo de sustrato evaluado, con el fin de evitar resultados poco representativos de la biodegradabilidad real. Los lodos digeridos de estaciones depuradoras urbanas son ampliamente utilizados por su elevada actividad y diversidad microbiana [33].

La relación inóculo–sustrato (ISR) es un parámetro clave para mantener el equilibrio entre la formación de intermediarios y la actividad metanogénica durante el ensayo. Para sustratos fácilmente degradables, en los que puede producirse una acumulación rápida de compuestos inhibidores, se aconseja trabajar con valores de ISR iguales o inferiores a 0,5. En cambio, cuando se analizan materiales con fracciones orgánicas más recalcitrantes, resulta conveniente emplear relaciones superiores entre 2 y 4. Se recomienda ensayar distintos valores de ISR para cada nuevo sustrato con objeto de garantizar la fiabilidad de los resultados [33].

Otros factores operativos relevantes son la temperatura, la agitación y la duración del ensayo, que deben mantenerse constantes. Habitualmente, los BMP se realizan en condiciones mesofílicas o termofílicas, con variaciones térmicas muy limitadas. La agitación favorece la homogeneización del sistema y la liberación del gas producido. El ensayo se considera finalizado cuando la producción diaria de metano cae por debajo del 1 % del volumen acumulado durante varios días consecutivos, asegurando así una degradación prácticamente completa de la materia orgánica [35].

3.1.3 Sistemas automáticos: Equipo AMPTS III

Los sistemas automáticos para la realización de ensayos de BMP tienen una gran relevancia en el estudio de procesos de digestión anaerobia, ya que permiten registrar de forma continua y precisa la producción de biogás durante el experimento. Entre estos sistemas destaca la serie de equipos AMPTS (Sistema Automático de Medición del Potencial de Metano) de la empresa BPC Instruments, véase en la Figura 3-1, ampliamente utilizado en investigación, debido a su facilidad de operación, su alto grado de automatización y la capacidad de obtener datos de producción de gas de manera directa y fiable [36].



Figura 3-1 Equipo AMPTS III Light [37].

El Sistema Automático de Medición del Potencial de Metano (AMPTS constituye una de las herramientas analíticas más avanzadas para la realización de ensayos de digestión anaerobia en

discontinuo. La versión más reciente, el AMPTS III, incorpora en un único equipo las funciones de toma de datos, análisis, registro y generación automática de informes, reduciendo de forma notable la necesidad de intervención manual. Este sistema permite llevar a cabo ensayos de Potencial Bioquímico de Metano (BMP), pruebas de actividad metanogénica específica y determinaciones de gas residual en lodos digeridos, empleando configuraciones modulares de 9 o 18 reactores de vidrio, en función del modelo seleccionado [36]. A continuación, en la Figura 3-2 se muestra el modelo Light de 9 reactores, modelo disponible en el laboratorio del Centro Universitario de la Defensa de Marín y usado en el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado.



Figura 3-2 Equipo AMPTS III Light conectado [37].

Una de las principales ventajas de esta tecnología es su capacidad para homogeneizar los procedimientos de medida y el tratamiento de resultados a escala internacional. El equipo incorpora sensores que corrigen de forma continua las variaciones de temperatura y presión, ajustando automáticamente los volúmenes de metano a condiciones normales de referencia ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 atm y sin humedad). Esta corrección en tiempo real elimina la influencia de factores ambientales externos y permite que los resultados obtenidos en distintos laboratorios sean directamente comparables y reproducibles [36].

Desde el punto de vista operativo, el AMPTS supone una mejora sustancial frente a los métodos tradicionales de seguimiento manual. Mientras que las técnicas basadas en manometría pueden requerir varias horas de trabajo por muestra, el uso de sistemas automatizados reduce el tiempo efectivo de dedicación a apenas unos minutos. Esta optimización incrementa la productividad del laboratorio y minimiza la probabilidad de errores humanos asociados al manejo y registro de datos [33].

El principio de funcionamiento del sistema se puede observar en la Figura 3-3 y se basa en la medición volumétrica del gas mediante desplazamiento de líquido, registrando impulsos de producción en tiempo real. Previamente a la medición, el biogás atraviesa una unidad de absorción alcalina que elimina el dióxido de carbono, garantizando que únicamente el metano sea cuantificado. Los datos obtenidos se procesan automáticamente, generando curvas cinéticas detalladas que resultan

fundamentales para optimizar mezclas de sustratos y anticipar el comportamiento de digestores a escala real [33].

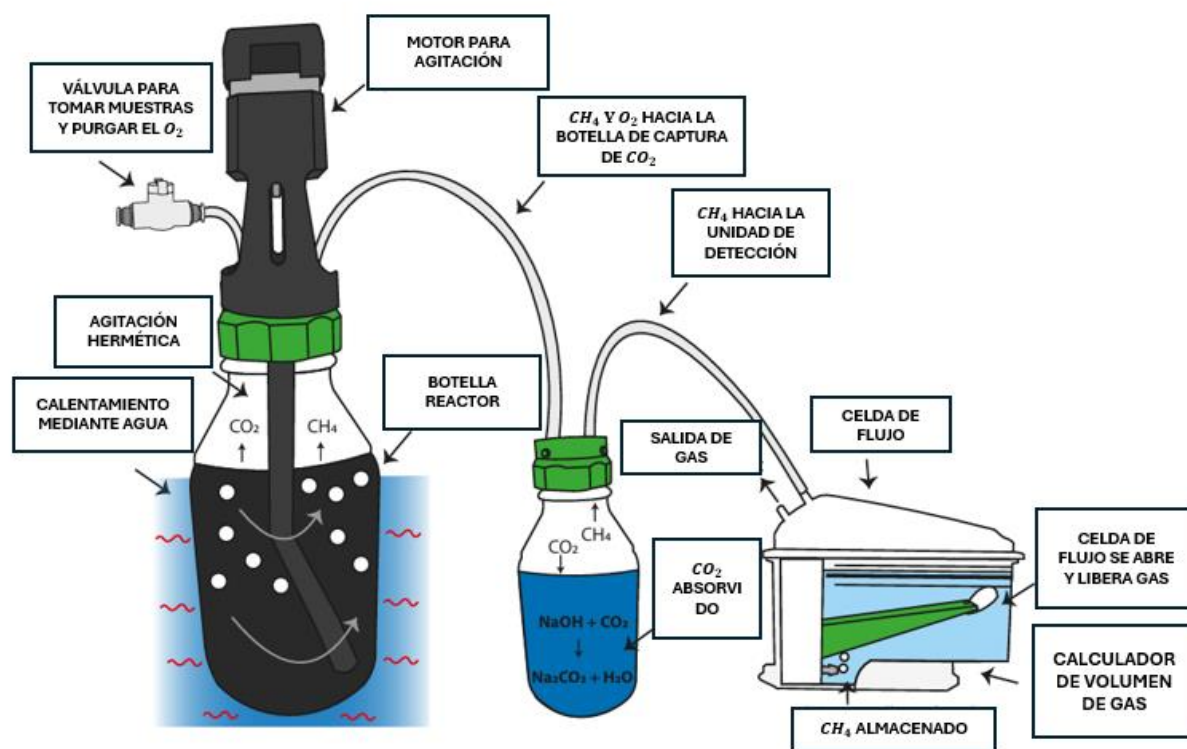


Figura 3-3 Principio de funcionamiento del Equipo AMPTS III Light [36].

3.1.4 Interpretación de resultados

La interpretación de las curvas de producción de metano es una herramienta fundamental para identificar qué etapa limita el proceso de digestión anaerobia. A partir de su forma pueden distinguirse cuatro comportamientos principales. El primero corresponde a sustratos fácilmente biodegradables, en los que la producción de metano comienza de forma inmediata y se estabiliza rápidamente. El segundo patrón presenta una fase inicial de retardo, lo que indica que la hidrólisis es la etapa limitante del proceso. El tercer caso refleja una inhibición temporal causada por compuestos tóxicos, dando lugar a valores negativos de producción al inicio del ensayo. Por último, el cuarto comportamiento se asocia a una inhibición total, sin generación de metano durante todo el experimento [33].

Estos perfiles dependen en gran medida de la composición del sustrato, lo que permite prever posibles problemas operativos. Por ejemplo, el estiércol bovino muestra una degradación lenta debido a su contenido lignocelulósico, alcanzando su potencial máximo alrededor de los 25 días. En cambio, residuos ricos en azúcares simples, como el suero de queso, alcanzan la fase de meseta en menos de 15 días. Otros sustratos, como los aceites vegetales, suelen presentar una inhibición inicial relacionada con la acumulación de ácidos grasos de cadena larga durante los primeros 12 días, antes de que la producción de metano se recupere [37].

El análisis de los datos y la comparación entre réplicas son esenciales para asegurar la fiabilidad de los resultados. Tras normalizar los valores y representar los promedios, debe comprobarse que la desviación entre réplicas no supere el 5 %. Valores superiores suelen indicar problemas experimentales, como falta de hermeticidad o una mezcla deficiente del sustrato. La comparación entre la desviación media y la de las réplicas individuales permite detectar estos fallos y garantizar la validez del ensayo [34].

3.2 Digestión anaerobia mesófila de residuos orgánicos ricos en carbohidratos, proteínas y lípidos (experimento 1)

3.2.1 Descripción del experimento

Como parte del desarrollo experimental de este Trabajo Fin de Grado se realizó un primer experimento de digestión anaerobia con el objetivo de evaluar la influencia de la composición que podrían presentar distintos sustratos orgánicos en la producción de biogás. El ensayo se diseñó como una prueba comparativa entre compuestos orgánicos puramente compuestos por carbohidratos (celulosa), proteínas (gelatina) o lípidos (aceite de cocina usado), permitiendo analizar su efecto sobre la actividad metanogénica.

El inóculo empleado corresponde a biomasa anaerobia procedente de un digestor anaerobio mesófilo en funcionamiento en una EDAR gallega, es decir, digestato residual del proceso de digestión anaerobia. Este material contiene una comunidad microbiana activa capaz de iniciar la degradación de nueva materia orgánica. En la Figura 3-4, se muestra el aspecto del inóculo en agitación para garantizar una mezcla homogénea. Al inóculo se le añadió bicarbonato de sodio para obtener una alcalinidad que garantice estabilidad en el proceso. Este bicarbonato actúa como solución tampón manteniendo el proceso de digestión anaerobio en un rango de pH adecuado.

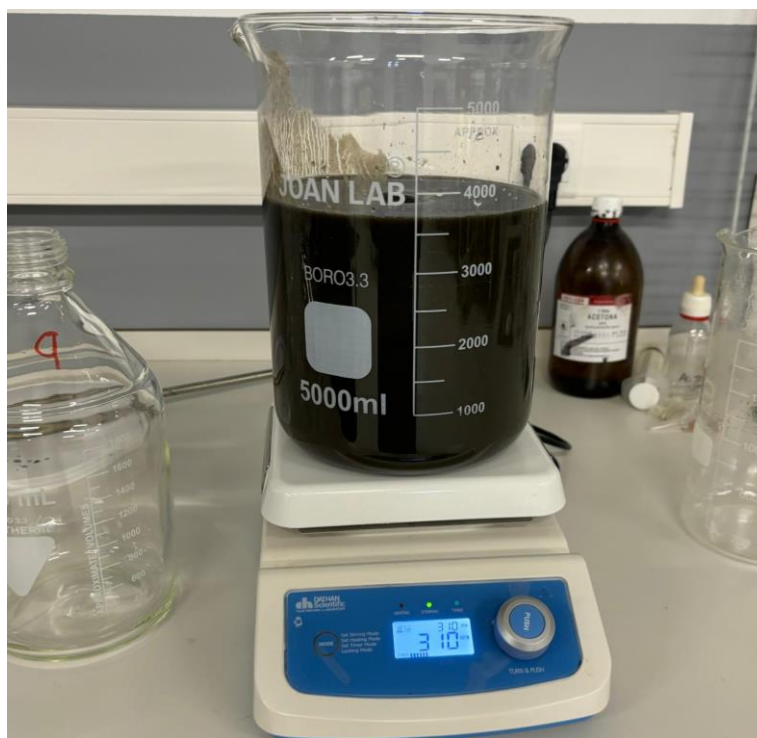


Figura 3-4 Inóculo empleado procedente de un digestor de una EDAR gallega (elaboración propia).

El experimento se llevó a cabo durante un periodo total de 19 días, registrándose de forma continua la producción de biogás mediante el sistema automatizado AMPTS III Light. El experimento se llevó a cabo bajo condiciones mesófilas, manteniendo la temperatura del sistema constante en 38 °C, garantizando así una degradación estable y eficiente de la materia orgánica.

3.2.2 Configuración de los reactores

Para la realización del ensayo se utilizaron nueve reactores de digestión, todos ellos preparados con el mismo inóculo base. La preparación de los reactores experimentales del primer experimento se realizó conforme al esquema comparativo presentado a continuación:

- **Reactor 1:** Blanco 1 (solamente inóculo)
- **Reactor 2:** Blanco 2 (Igual que el reactor 1)
- **Reactor 3:** Blanco 3 (Igual que el reactor 1)
- **Reactor 4:** Celulosa 1
- **Reactor 5:** Celulosa 2 (Igual que el reactor 4)
- **Reactor 6:** Gelatina 1
- **Reactor 7:** Gelatina 2 (Igual que el reactor 6)
- **Reactor 8:** Aceite 1
- **Reactor 9:** Aceite 2 (Igual que el reactor 8)

En todos los casos, la preparación por triplicado/duplicado de cada condición experimental tuvo como finalidad detectar posibles desviaciones o fallos experimentales y asegurar fiabilidad en los resultados obtenidos. Si ambas botellas presentaban comportamientos similares en la producción de biogás, se podía asumir una correcta ejecución del procedimiento. En cambio, diferencias significativas entre réplicas indicarían posibles fallos en la preparación o condiciones del ensayo. De esta manera, la replicación permitió aumentar la fiabilidad de los resultados y garantizar una comparación más rigurosa entre los distintos tratamientos de digestión.

Los reactores 1, 2 y 3 se emplearon como blancos experimentales, permitiendo caracterizar la actividad metanogénica basal del inóculo y servir de referencia para la interpretación de los resultados obtenidos en las botellas con diferentes sustratos. Aunque la fracción mayoritaria de la materia orgánica presente en el inóculo ya ha sido transformada en el digestor original, permanece una parte biodegradable que debe ser descontada de la producción en presencia de sustratos, para así determinar correctamente el BMP de cada residuo.

Los reactores 4 y 5 se prepararon mediante la adición de celulosa (Sigma-Aldrich, ref. 11365-1KG) al inóculo, véase en la Figura 3-5. Este sustrato se seleccionó como representante de materia orgánica de naturaleza carbohidratada, habitual en residuos alimentarios y fracciones orgánicas de origen vegetal.

Los reactores 6 y 7 se acondicionaron incorporando gelatina al inóculo, véase en la Figura 3-5. Este sustrato se empleó como modelo de residuo rico en proteínas.

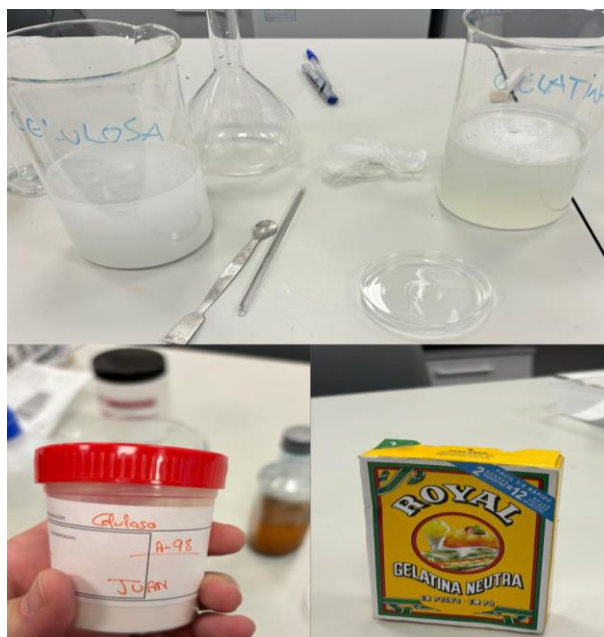


Figura 3-5 Celulosa y gelatina empleada en el experimento (elaboración propia).

Los reactores 8 y 9 se prepararon añadiendo aceite de cocina usado (mezcla de aceite de oliva y girasol) al inóculo, seleccionado como sustrato representativo de residuos ricos en lípidos. El aceite se filtró mediante filtro de jeringa para eliminar posibles restos sólidos, tal como se observa en la Figura 3-6. Este grupo experimental permitió analizar el elevado potencial metanogénico asociado a las grasas, así como posibles efectos inhibitorios derivados de la formación de ácidos grasos de cadena larga.



Figura 3-6 Aceite de cocina usado empleado en el experimento tras su filtración (elaboración propia).

3.2.3 Cálculos previos para la preparación de los reactores

Previamente a la preparación de las botellas se realizaron los cálculos necesarios para definir las cantidades adecuadas de inóculo, de los diferentes sustratos: celulosa, gelatina y aceite, y de bicarbonato de sodio. A continuación, se detalla el procedimiento seguido para obtener las distintas cantidades a añadir en cada reactor:

- 1) Se procede a evaluar el volumen disponible en las botellas y la forma de distribuirlo entre los distintos componentes:

Cada botella dispone de un volumen total de 2.000 mL de los cuales 1.800 mL es el volumen efectivo para su llenado durante el ensayo. El volumen restante hasta completar la capacidad total del recipiente se denomina espacio de cabeza, y constituye la zona donde se acumula el biogás generado antes de ser conducido a la trampa de CO₂ y posteriormente al sistema de medición.

De los 1.800 mL, 800 mL corresponden al inóculo común en todas las botellas, mientras que los 1.000 mL restantes varían en función de cada reactor entre el sustrato seleccionado y el agua destilada necesaria para completar el volumen final deseado. El volumen de inóculo añadido asegura una cantidad de sólidos volátiles (SV), es decir biomasa, capaz de llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia. Además, garantiza que con el inóculo disponible se puedan realizar dos experimentos completos de nueve botellas cada uno, es decir, un total de 18 reactores.

- 2) Se determina la cantidad de sustrato que debe añadirse en las botellas restantes:

Para calcular la cantidad de sustrato a añadir en cada botella, se aplicó la ecuación (1), la cual indica la proporción de sólidos volátiles existente entre el inóculo y el sustrato, este ratio se denomina ISR (Inoculum to Substrate Ratio). Un rango óptimo de ISR se sitúa entre 2 y 4 [38]. Para este experimento se seleccionó un ratio cercano a 2, con el fin de mantener unas condiciones adecuadas para el desarrollo del proceso de digestión anaerobia. En caso de prever un mayor riesgo de inhibición, habría sido recomendable incrementar este valor hasta 4 para favorecer una mayor estabilidad del proceso de digestión anaerobia.

Primero, se calculó la cantidad de sólidos volátiles del inóculo para así poder sustituirlo en la ecuación (1). Seguidamente, se fija el ISR en 2 y se despeja la cantidad de sólidos volátiles del sustrato:

$$\frac{14 \text{ g SV}}{\text{L inóculo}} \cdot \frac{0,8 \text{ L inóculo}}{\text{botella}} = \frac{11,2 \text{ g SV}}{\text{botella}}$$

$$\text{ISR} = \frac{\text{g SV inóculo}}{\text{g SV sustrato}} \quad (1)$$

$$\text{ISR} = \frac{\text{g SV inóculo}}{\text{g SV sustrato}} = 2 = \frac{11,2 \text{ g SV inóculo}}{\text{g SV sustrato}}$$

$$\text{g SV sustrato} = 5,6 \text{ g SV}$$

Dado que los sustratos de este experimento se consideran completamente orgánicos, se asumió una relación de 1 g SV por cada gramo de sustrato añadido. Por ello, se añadieron 5,6 g de cada sustrato (celulosa/gelatina/aceite) en las botellas correspondientes.

- 3) Se calcula la cantidad de bicarbonato que debe añadirse con el fin de alcanzar una alcalinidad óptima en el sistema.

El rango óptimo de alcalinidad recomendado en ensayos de BMP se sitúa entre 2-5 g CaCO₃/L [27]. Valores inferiores pueden favorecer la acumulación de ácidos grasos volátiles y desestabilizar el sistema, mientras que valores excesivamente altos pueden inhibir el proceso. En este caso, la única fuente inicial de alcalinidad era el inóculo, con 3 g CaCO₃/L. La alcalinidad que presentaría cada botella únicamente por la aportación del inóculo es la siguiente:

$$\frac{3 \text{ g CaCO}_3}{\text{L inóculo}} \cdot \frac{0,8 \text{ L inóculo}}{1,8 \text{ L botella}} = 1,3 \frac{\text{g CaCO}_3}{\text{L botella}}$$

Como se aprecia, 1,3 no está dentro del rango establecido como óptimo, por lo que es necesario añadir bicarbonato de sodio para llegar a la concentración deseada. Se decide aumentar 2 g/L por botella para alcanzar el rango óptimo y disponer de un margen de seguridad. Luego se realizan los cálculos correspondientes para saber la cantidad a añadir por botella:

$$\frac{2 \text{ g NaHCO}_3}{\text{L botella}} \cdot 1,8 \text{ L botella} = 3,6 \text{ g NaHCO}_3$$

3.2.4 Preparación de las botellas y puesta en marcha

Una vez realizados los cálculos correspondientes, se procedió al llenado de cada uno de los 9 reactores siguiendo las cantidades previamente determinadas. En consecuencia, cada una de las botellas se preparó añadiendo 800 mL de inóculo mezclado con 3,6 g de bicarbonato de sodio. Además, a excepción de las 3 primeras botellas, se añadió 5,6 g del sustrato correspondiente (gelatina, celulosa o aceite). En todos los casos se alcanzó el volumen final de 1.800 mL mediante la adición de agua destilada.

La disposición física de las botellas en el equipo se planificó cuidadosamente. Los duplicados no se colocaron en la misma fila, ya que comparten sistema de agitación. De este modo, en caso de fallo en una línea de agitación del equipo, no se perderían simultáneamente ambas réplicas de un mismo tratamiento, minimizando el riesgo experimental.

Dado que la digestión anaerobia requiere condiciones estrictamente libres de oxígeno, antes del inicio del ensayo se realizó una purga con nitrógeno del espacio de cabeza de cada uno de los reactores. La Figura 3-7 muestra la botella de N_2 empleada en la purgado de los distintos experimentos, la cual se encuentra ubicada en una caseta situada en el exterior y anexa al laboratorio de mecánica del edificio de investigación del CUD.



Figura 3-7 Botella de nitrógeno del laboratorio de investigación del CUD (elaboración propia).

La operación consistió en inyectar nitrógeno manualmente durante aproximadamente 3-5 minutos a cada reactor, véase en la Figura 3-8. Esta operación permitió desplazar el oxígeno presente en el espacio de cabeza y garantizar un ambiente anaerobio adecuado para el desarrollo de la actividad microbiana metanogénica. La correcta ejecución de este paso resulta esencial para evitar interferencias asociadas a procesos aerobios y asegurar la validez de los resultados obtenidos.



Figura 3-8 Inyección manual de nitrógeno para purgar el oxígeno (elaboración propia).

Una vez completada la purga, el experimento se puso en marcha mediante la activación del sistema AMPTS III Light y la selección del programa de agitación correspondiente. El equipo se configuró con dos fases de agitación: una primera fase al 50 % de la velocidad máxima del sistema, equivalente a 125 rpm, durante 10 minutos, empleada para favorecer una correcta homogeneización inicial del contenido de las botellas; y una segunda fase al 20 %, equivalente a 50 rpm, durante 20 minutos, con el fin de mantener la mezcla evitando someter la biomasa a un esfuerzo mecánico excesivo. Esta combinación permitió asegurar unas condiciones adecuadas de agitación y, al mismo tiempo, preservar la estabilidad biológica del sistema. A partir de este momento, el equipo operó de forma continua durante un periodo total de 19 días, sin necesidad de intervención manual, permitiendo el seguimiento permanente del comportamiento de cada reactor de digestión y la detección temprana de posibles anomalías o fallos experimentales. En la Figura 3-9 se puede ver el equipo ya en funcionamiento.

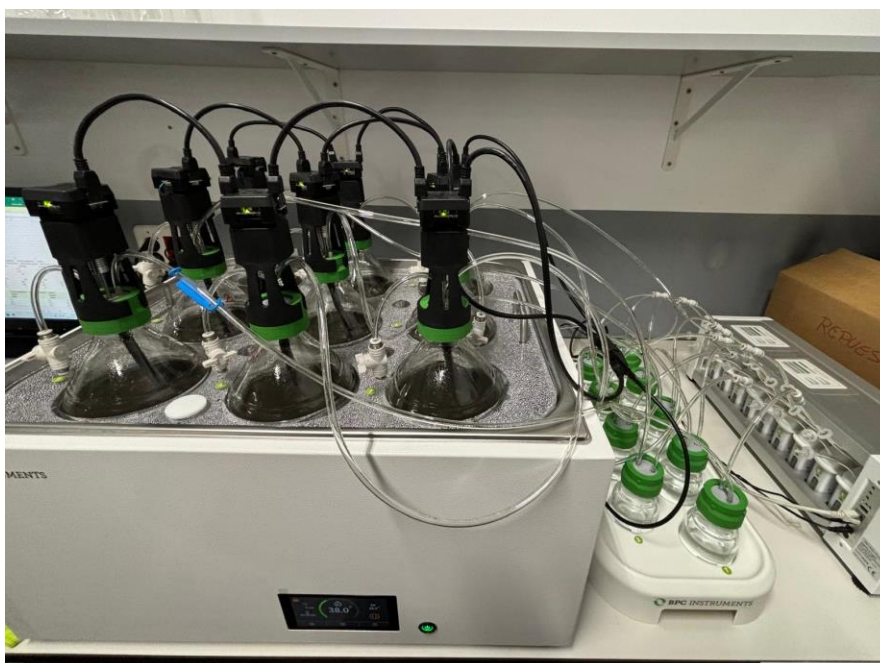


Figura 3-9 Equipo AMPTS con las nueve botellas en funcionamiento (elaboración propia).

Durante el ensayo, el software del sistema AMPTS III Light registró de forma automática la producción de biogás en tiempo real, generando dos archivos de salida. El primero contenía el volumen acumulado de biogás (NmL), y el segundo, el caudal de producción (NmL/h), ambos a escala diaria y para cada reactor de digestión.

3.2.5 Finalización del experimento y registro de resultados

Transcurrido el periodo de operación establecido, se dio por finalizado el primer experimento y se accionó el botón de stop desde el software de control del equipo. La finalización del experimento se debe realizar cuando, durante tres días consecutivos, el incremento en la producción acumulada de metano es inferior al 1 %, criterio que indica la estabilización del proceso y la ausencia de generación significativa de metano [38].

En ese momento se obtuvieron los datos definitivos correspondientes a cada una de las nueve botellas ensayadas, los cuales fueron extraídos del sistema AMPTS III Light en forma de archivos Excel para su posterior tratamiento y análisis. Una vez finalizada la adquisición de información, se retiraron todas las botellas del equipo y se tomaron muestras individuales de cada una de ellas, como puede verse en la Figura 3-10, destinadas a la realización de análisis posteriores. Tras la toma de muestras, las botellas fueron limpiadas con el fin de dejarlas preparadas para la puesta en marcha de un segundo experimento.



Figura 3-10 Botellas extraídas y obtención de muestras de cada una de ellas (elaboración propia).

3.2.6 Determinación de la alcalinidad

Mediante las muestras obtenidas a la finalización del experimento, se llevó a cabo la determinación de la alcalinidad de las muestras procedentes de cada una de las nueve botellas de digestión. Este parámetro se midió con el objetivo de evaluar la capacidad tampón del medio y su estado tras el proceso de digestión anaerobia. Para ello, se empleó una valoración ácido-base utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4) como reactivo titulante, con una normalidad de 0,1 N.

Primeramente, se centrifugaron todas las muestras para separar la parte sólida de la parte líquida, ya que este análisis debe hacerse con muestras líquidas estrictamente. El procedimiento experimental consistió en la adición progresiva y controlada de pequeñas cantidades de H_2SO_4 a cada muestra ya centrifugada. Luego, se fue monitorizando de forma continua el pH mediante un pH-metro (marca Hanna Instruments y modelo Edge), hasta alcanzar los dos valores objetivo previamente establecidos para la determinación de la alcalinidad, véase en la Figura 3-11.



Figura 3-11 Método de lectura del pH según la adición de H_2SO_4 (elaboración propia).

El volumen total de ácido consumido hasta cada valor permitió calcular las alcalinidades correspondientes a cada botella mediante la aplicación de las ecuaciones (2), (3) y (4).

$$AP = \frac{A \cdot N \cdot 50000}{V} \quad (2)$$

$$AT = \frac{B \cdot N \cdot 50000}{V} \quad (3)$$

$$AI = AT - AP = AGV \quad (4)$$

Donde:

- AP: alcalinidad parcial (mg CaCO₃/L)
- AT: alcalinidad total (mg CaCO₃/L)
- AI: alcalinidad intermedia o ácidos grasos volátiles (mg CaCO₃/L)
- V: volumen de la muestra centrifugada = 20 mL
- N: normalidad de H₂SO₄ = 0,1 N
- A: volumen de H₂SO₄ (mL) necesarios para llegar a un pH = 5,75
- B: volumen de H₂SO₄ (mL) necesarios para llegar a un pH = 4,3

Una vez finalizadas las medidas, los resultados se recopilaron y organizaron en una hoja de cálculo mediante Excel. Este tratamiento de los datos permitió su análisis comparativo entre muestras y facilitó la interpretación posterior de los resultados en relación con el comportamiento observado durante el experimento de digestión anaerobia.

3.3 Digestión anaerobia mesófila de residuos orgánicos procedentes de buques de la Armada (experimento 2)

3.3.1 Descripción del experimento

Al igual que en el primer experimento, este ensayo tuvo una duración total de 19 días y se llevó a cabo bajo condiciones mesófilas, manteniendo la temperatura del sistema en 38 °C durante todo el proceso.

La innovación de este experimento frente al anterior consistió en la utilización de distintos sustratos procedentes de buques de la Armada, con el objetivo de valorizar estos residuos y evaluar su potencial de producción de biogás. Por lo tanto, para la puesta en marcha de este ensayo fue necesario obtener residuos orgánicos generados en buques: lodos de aguas residuales, fracción orgánica de los residuos sólidos de comedor (FORSU) y aceite de cocina usado.

Los lodos fueron recopilados a partir de cuatro buques ubicados en el Arsenal de Ferrol: Cantabria, Patiño, Intermares y Carnota. En la Figura 3-12 puede observarse el buque Patiño.



Figura 3-12 Buque Patiño [39].

La obtención de lodos implicó un desplazamiento desde Marín hasta Ferrol, donde se accedió individualmente a cada uno de los buques mencionados. Una vez a bordo, fue necesario descender hasta la planta TAR (Tratamiento de Aguas Residuales) de cada barco. Los lodos se extrajeron directamente desde el tanque correspondiente mediante el accionamiento manual de las válvulas de purga, recogiendo en garrafas para su transporte hasta el laboratorio, véase en la Figura 3-13. Este procedimiento permitió garantizar que el lodo empleado fuese representativo del sistema real de tratamiento a bordo en los buques de la Armada.



Figura 3-13 Obtención de lodos en el buque Patiño (elaboración propia).

Los restos orgánicos de comida y el aceite de cocina usado se recogieron del comedor de la ENM, asumiendo que presentan características similares a las de los residuos generados en los buques, pues no se sigue ninguna dieta específica durante los periodos de despliegue de los buques de la Armada, con el fin de aproximar de forma más sencilla unas condiciones representativas de los residuos producidos a bordo.

En el caso de los residuos orgánicos, la recogida se realizó durante dos días distintos para aproximarlos a un menú variado, ya que cada tipo de alimento tiene diferente composición, obteniendo aproximadamente un kilogramo de cada comida y de cada cena, hasta alcanzar un total de cuatro kilogramos. Posteriormente, el residuo fue mezclado con una pequeña cantidad de agua y sometido a trituración hasta conseguir una papilla homogénea. Esta homogeneización redujo el tamaño de partícula y favoreció la posterior biodegradabilidad del sustrato en el digestor anaerobio. En la Figura 3-14, se pueden observar los restos de comedor recogidos y su posterior papilla.



Figura 3-14 Restos de comida transformados en papilla (elaboración propia).

De manera análoga al primer experimento, el aceite empleado fue previamente filtrado mediante una jeringuilla acoplada a un filtro para eliminar impurezas sólidas.

Además, dado que en el laboratorio de química se disponía de glicerina y que en el estado del arte se mostró su elevado potencial para la producción de biogás, se incluyó este sustrato en una de las botellas del experimento con el fin de evaluar su comportamiento y valorar su posible interés para una futura aplicación a bordo.

3.3.2 Análisis para seleccionar los sustratos de mayor interés

Con el objetivo de seleccionar los sustratos con mayor potencial de valorización, y las cantidades a añadir, se procedió a realizar un análisis para determinar la cantidad de sólidos volátiles (SV) por litro presente en cada uno de ellos.

Las muestras de lodos y de restos de comida se introdujeron en crisoles individuales y se sometieron inicialmente a un secado en estufa durante un mínimo de ocho horas a 105 °C para eliminar la humedad. Posteriormente, se introdujo en una mufla durante treinta minutos a 550 °C, con el objetivo de eliminar los sólidos volátiles. La diferencia de masa antes y después de cada etapa permitió calcular el contenido de sólidos totales y sólidos volátiles presentes en cada muestra. La Figura 3-15 detalla el proceso.

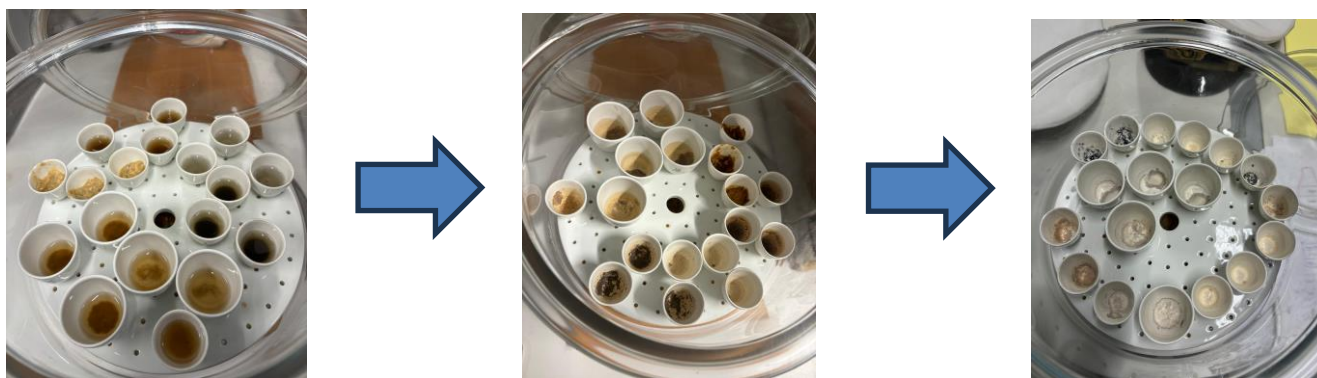


Figura 3-15 Análisis de sólidos volátiles (elaboración propia).

Tras el análisis realizado, se observó una baja concentración de sólidos en la muestra de lodo del Cantabria, por lo que este lodo fue descartado del experimento. Se decidió emplear de forma individual el lodo procedente del buque Patiño (lodo PAT), ya que, según los análisis efectuados, presentaba el mayor interés. Asimismo, se seleccionó la mezcla de lodos de los buques Carnota e Intermares (lodo C+I), puesto que ambos disponen de sistemas de tratamiento muy similares y, además, se contaba con una mayor cantidad de muestra, lo que permitía realizar un mayor número de ensayos experimentales y establecer comparaciones más representativas entre resultados.

3.3.3 Configuración de los reactores

Las botellas experimentales cargadas con el mismo inóculo del primer experimento se prepararon siguiendo un esquema comparativo orientado a evaluar distintas combinaciones de digestión. A continuación, se puede visualizar la disposición final de las botellas y la proporción de sólidos volátiles en las botellas con co-digestión:

- **Reactor 1:** Lodo C+I 1 (mezcla de lodos de los buques Carnota e Intermares)
- **Reactor 2:** Lodo C+I 2 (igual que el reactor 1)
- **Reactor 3:** Lodo C+I y FORSU 1 (fracción orgánica de los residuos sólidos de comedor) (65:35 % respectivamente)
- **Reactor 4:** Lodo C+I y FORSU 2 (igual que el reactor 3)
- **Reactor 5:** Lodo C+I y AC 1 (aceite de cocina usado) (50:50 % respectivamente)
- **Reactor 6:** Lodo C+I y AC 2 (igual que el reactor 5)
- **Reactor 7:** Lodo C+I y GLI (glicerina) (95:5 % en volumen respectivamente)
- **Reactor 8:** Lodo PAT (lodo del buque Patiño)
- **Reactor 9:** Lodo PAT y FORSU (65:35 %SV respectivamente)

A modo de aclaración, las botellas 1 y 2 contenían como único sustrato una mezcla de lodos procedentes de los buques Carnota e Intermares. Las botellas 3 y 4, además de dicha mezcla de lodos, incluían FORSU. Por su parte, las botellas 5 y 6 contenían mezcla de lodos y aceite, mientras que la botella 7 incorporaba mezcla de dichos lodos y glicerina. La botella 8 contenía lodo procedente del buque Patiño y finalmente la botella 9 incluía lodo del buque Patiño junto con FORSU.

3.3.4 Cálculos previos para la preparación de las botellas

A partir de esta selección se calcularon las cantidades exactas de lodos, residuos orgánicos, aceite y glicerina que debían introducirse en cada una de las nueve botellas experimentales (reactores). A continuación, se detalla el procedimiento seguido para obtener las distintas cantidades a añadir en cada botella:

- 1) El volumen de inóculo por botella se mantuvo constante (0,8 L) y con la misma cantidad de bicarbonato de sodio respecto al anterior experimento, por lo que se completó el volumen restante de la botella mediante 1 litro de lodo.
- 2) La mezcla de lodos I+C presentaba una concentración de 3,2 g SV/L. Por lo tanto, las botellas 1 y 2 presentaron el siguiente valor de ISR:

$$\text{ISR} = \frac{11,2 \text{ g SV inóculo}}{3,2 \text{ g SV sustrato}} = 3,6$$

El ratio se mantiene entre los límites de 2 y 4 fijados en el anterior ensayo. El aumento de ratio se debe a la escasa concentración de SV en los lodos obtenidos en los buques. Hay que recalcar que, si se hubiese añadido más inóculo, no se hubiese podido añadir el litro deseado de lodo y el ISR hubiese sido demasiado elevado.

- 3) A partir de la botella 3, el volumen de sustrato quedó condicionado por el porcentaje de sólidos volátiles seleccionado para cada botella de co-digestión. Por este motivo, fue necesario realizar cálculos adicionales. En el caso de las botellas 3 y 4, se siguió el siguiente procedimiento:

Se partió de dos hipótesis para conocer la cantidad de FORSU a añadir. La primera es que se quería una ISR próxima a 2, y la segunda es que se quería mantener el porcentaje de sólidos volátiles (65 % lodos y 35 % FORSU). Dada la restricción de 1 L de lodo y conociendo su concentración, 3,2 g/L SV, se sabe que el lodo aporta 3,2 g/L SV. Por lo tanto, se necesitan 1,72 g SV de FORSU para respetar el criterio de porcentajes (65:35) [21]. La cantidad por añadir de residuos orgánicos es la siguiente:

$$1,72 \text{ g SV FORSU} \cdot \frac{1000 \text{ g FORSU}}{193 \text{ g SV FORSU}} = 8,9 \text{ g FORSU}$$

Se obtiene el siguiente valor de ISR:

$$\text{ISR} = \frac{11,2 \text{ g SV inóculo}}{3,2 \text{ g SV lodo} + 1,72 \text{ g SV FORSU}} = 2,2$$

Como se observa, el ratio se mantiene alrededor del valor deseado de 2.

- 4) Para las botellas 5 y 6 se siguió el mismo procedimiento que las dos anteriores, pero esta vez el porcentaje es 50:50 % entre lodos y aceite [20]. Del experimento anterior se sabe que, para obtener un ISR de 2, se necesitan 5,6 g SV de sustrato. Para cumplir con el porcentaje se necesita la siguiente cantidad de cada sustrato:

$$5,6 \text{ g SV sustrato} \cdot 0,5 = 2,8 \text{ g SV sustrato}$$

Luego se añaden 2,8 g SV de cada sustrato, es decir, lodo y aceite. Se requiere pasar de gramos de sólidos volátiles a gramos totales:

$$2,8 \text{ g SV lodo} \cdot \frac{1 \text{ L lodo}}{3,2 \text{ g SV lodo}} = 0,9 \text{ L lodo}$$

Como se puede comprobar se han usado 0,9 L de lodo por lo que el 0,1 L restante se rellenó con agua destilada para alcanzar el volumen total de 1,8 L. Por otro lado, como el 100 % de aceite son sólidos volátiles, se añade la siguiente cantidad de aceite:

$$2,8 \text{ g SV aceite} \cdot \frac{1 \text{ g aceite}}{1 \text{ g SV aceite}} = 2,8 \text{ g aceite} \cdot \frac{1 \text{ mL aceite}}{0,92 \text{ g aceite}} = 0,61 \text{ mL aceite}$$

Se obtiene el valor establecido de ISR:

$$\text{ISR} = \frac{11,2 \text{ g SV lodo}}{2,8 \text{ g SV lodo} + 2,8 \text{ g SV aceite}} = 2$$

- 5) La botella 7 se diseñó para que la glicerina ostente 0,5 % en volumen respecto al lodo [20], por lo que se añadieron 1 L de lodo y 5 ml de glicerina. La cantidad en peso a añadir de glicerina es la siguiente:

$$5 \text{ mL glicerina} \cdot \frac{1,26 \text{ g SV glicerina}}{1 \text{ mL glicerina}} = 6,3 \text{ g SV glicerina}$$

Como la glicerina se le supone un 100 % de sólidos volátiles,

$$6,3 \text{ g SV glicerina} \cdot \frac{1 \text{ g glicerina}}{1 \text{ g SV glicerina}} = 6,3 \text{ g glicerina}$$

$$\text{ISR} = \frac{11,2 \text{ g SV inóculo}}{3,2 \text{ g SV lodo} + 6,3 \text{ g SV glicerina}} = 1.18 < 2$$

Esta concentración generó un $\text{ISR} < 2$, aunque se podría dar una inhibición, no se descartó para ver cuál era la respuesta de esta botella y priorizar la recomendación extraída de la bibliografía.

- 6) Para los cálculos de la botella 8 se debe tener en cuenta la concentración del lodo PAT, la cual fue muy parecida al lodo C+I y se aproximó al mismo valor, 3,2 g SV/L. Al igual que las botellas 1 y 2, se añadió 1 L de lodo PAT, por lo que genera el valor ya conocido de 3,6 de ISR.
- 7) Finalmente, para la botella 9 se siguieron los mismos cálculos que las botellas 3 y 4, debido a las mismas concentraciones de sustrato y mismo porcentaje de sólidos volátiles. Por lo tanto, se añadieron 1 L de lodo y 8,9 g de FORSU. Cabe destacar que solo se pudieron realizar dos reactores con lodo PAT debido a una limitación de cantidad existente.

3.3.5 Preparación de las botellas y puesta en marcha

Una vez realizados los cálculos correspondientes, se procedió al llenado de cada una de las 9 botellas siguiendo las cantidades previamente determinadas. En consecuencia, cada uno de los reactores se preparó añadiendo 800 mL de inóculo mezclado con 3,6 g de bicarbonato de sodio. Además, los reactores con sustrato se añadieron con las cantidades calculadas de lodo, FORSU, aceite y glicerina, según correspondiese.

A partir de este momento, se siguió exactamente el mismo procedimiento que en el experimento anterior, desde la puesta en marcha del sistema hasta la finalización del ensayo y la obtención de los datos. Asimismo, se realizaron ensayos de alcalinidad posteriores para cada una de las muestras obtenidas de las distintas botellas.

3.4 Digestión anaerobia termófila de residuos orgánicos procedentes de buques de la Armada (experimento 3)

3.4.1 Descripción del experimento

Este tercer experimento se diferencia de los dos anteriores al realizarse en condiciones termófilas, fijando la temperatura de operación en 55 °C. Bajo este régimen se espera un mayor potencial de producción de biogás debido al incremento de la actividad metabólica de los microorganismos, aunque también puede producirse una mayor inestabilidad del proceso. El periodo total del ensayo se mantiene constante, con una duración de 19 días.

Para la realización de este ensayo fue necesario obtener nuevo inóculo de la misma depuradora gallega, luego se espera una actividad biológica similar. El nuevo inóculo disponía de una mayor concentración de sólidos volátiles que el anterior, por lo que fue necesario añadir menos inóculo para alcanzar la misma concentración de sólidos por botella.

Todos los sustratos empleados en este experimento son los mismos que en los ensayos anteriores: la mezcla de lodos C+I, el aceite de cocina usado previamente filtrado y la fracción orgánica de los residuos procedentes del comedor.

3.4.2 Configuración de los reactores

El volumen de inóculo disponible para este experimento únicamente permitió preparar seis botellas, en lugar de las nueve utilizadas en los experimentos anteriores, por lo que sólo se realizaron por duplicado los blancos. No obstante, para mantener el equipo en las mismas condiciones de operación, las tres botellas restantes se rellenaron con agua. A continuación, se puede visualizar la disposición final de las botellas y la proporción de sólidos volátiles en las botellas con codigestión:

- **Reactor 1:** Blanco 1
- **Reactor 2:** Blanco 2 (igual que el reactor 1)
- **Reactor 3:** Lodo C+I
- **Reactor 4:** Lodo C+I y AC (50:50 % SV respectivamente)
- **Reactor 5:** Lodo C+I y FORSU (65:35 %SV respectivamente)
- **Reactor 6:** Lodo C+I y AC y FORSU (40:10:50 %SV respectivamente)

En este experimento fue necesario volver a incluir reactores blanco, ya que se trabajó con un nuevo inóculo y resultaba imprescindible determinar su producción de metano. De este modo, fue posible corregir posteriormente los resultados de los reactores con sustrato, comparándolos directamente con los blancos y obteniendo así el potencial de producción atribuible exclusivamente a cada sustrato ensayado.

Por otra parte, las condiciones seleccionadas para las botellas con codigestión se establecieron a partir de los resultados obtenidos en el experimento 2, tomando como referencia las combinaciones que mostraron mayor interés. En cuanto al reactor 6, su inclusión se planteó con el objetivo de evaluar por primera vez el potencial de producción de biogás de una mezcla en codigestión compuesta por lodo, FORSU y aceite. Asimismo, los porcentajes de cada componente se definieron en función de las proporciones relativas de generación de estos residuos a bordo de los buques, con el fin de aproximar el ensayo a condiciones de operación más realistas.

3.4.3 Cálculos previos para la preparación de las botellas

A continuación, se detallan los cálculos correspondientes previos a la preparación de las botellas empleadas en el experimento:

1) Se calcula la nueva cantidad de inóculo a añadir:

Se partió del objetivo de mantener una concentración final en las botellas equivalente a la empleada en los primeros experimentos. El nuevo inóculo tenía una concentración de 16,6 g/L. Sabiendo los datos de los experimentos anteriores se aplicó la ecuación (5) para calcular el nuevo volumen de inóculo:

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \quad (5)$$

$$14 \frac{\text{g}}{\text{L}} \cdot 0.8 \text{ L} = 16,6 \frac{\text{g}}{\text{L}} \cdot V_2$$

$$V_2 = 0,67 \text{ L}$$

Por lo tanto, se añadió un volumen de 0,67 L de inóculo en cada una de las botellas.

- 2) Se calcula la cantidad de bicarbonato de sodio a añadir en este ensayo. Debido a que este inóculo tenía una alcalinidad similar que el inóculo de los dos primeros experimentos, se mantuvo la cantidad de 3,6 g de bicarbonato de sodio por reactor.
- 3) Las botellas 1 y 2 se prepararon de la misma manera, añadiendo 0,67 L de inóculo en cada una de ellas y 1,13 L de agua destilada con el fin de alcanzar el volumen final de trabajo de 1,8 L en cada botella.
- 4) Para la botella 3, además del inóculo añadido, se incorporó 1 L de lodo, siguiendo el mismo procedimiento empleado en las botellas 1 y 2 del experimento anterior. Se completó el volumen con 0,13 L de agua nebulizada hasta alcanzar el volumen final de 1,8 L.
- 5) Para la botella 4, se buscó obtener una concentración del 50:50 % de sólidos volátiles del lodo respecto al aceite. Para ello, se realizaron los mismos cálculos que los reactores 5 y 6 del experimento anterior y se añadieron 2,9 g de aceite junto con 0,9 L de lodo, ajustando así la relación deseada entre ambos sustratos. Se añadieron 0,23 L de agua destilada para alcanzar el volumen final.
- 6) Para la botella 5, se buscó obtener una relación de 65:35 % de sólidos volátiles de lodo y FORSU, respectivamente. Para ello, se emplearon las mismas cantidades utilizadas en el experimento anterior en las botellas 3,4 y 9, añadiendo 1 L de lodo y 8,9 g de FORSU. Finalmente, se completó el volumen con 0,13 L de agua destilada hasta alcanzar el volumen final establecido.
- 7) Para la botella 6, se buscó obtener una concentración de sólidos volátiles de 40:10:50 % correspondiente a lodo, aceite y FORSU, respectivamente. Estos porcentajes se establecieron con el objetivo de mantener una proporción representativa de las cantidades generadas a bordo de los buques para cada uno de los tres sustratos, de modo que la mezcla empleada en el experimento reflejara de forma aproximada la relación real de residuos producidos durante la operación de los buques.

Para ello fue necesario realizar nuevos cálculos, ya que era la primera vez que se combinaban los tres sustratos en una misma botella. A continuación, se describe el procedimiento seguido para determinar las cantidades a añadir de cada uno de ellos:

- a) Se buscó mantener un ratio ISR de 2, al igual que en los experimentos anteriores. Como se conservó la misma concentración de inóculo por botella, la concentración de sólidos volátiles del sustrato se mantuvo igual que en los ensayos previos, estableciéndose en 5,6 g/L de SV.

$$\text{ISR} = \frac{\text{g SV inóculo}}{\text{g SV sustrato}} = 2 = \frac{\left(\frac{16,6 \text{ g SV}}{\text{L inóculo}} \cdot 0,67 \text{ L inóculo}\right)}{\text{g SV sustrato}}$$

$$\text{g SV sustrato} = 5,6 \text{ g SV}$$

- b) La cantidad total de sólidos volátiles de sustrato se reparte de forma proporcional entre cada uno de los sustratos, de acuerdo con el porcentaje previamente establecido para cada uno de ellos.
 - 40 % Lodos
 - 50 % FORSU
 - 10 % Aceite

Por lo tanto, quedaron así las cantidades de cada sustrato:

$$0,4 \cdot 5,6 \text{ g SV} = 2,24 \text{ g SV lodo}$$

$$0,5 \cdot 5,6 \text{ g SV} = 2,8 \text{ g SV FORSU}$$

$$0,1 \cdot 5,6 \text{ g SV} = 0,56 \text{ g SV aceite}$$

Se pasa a litros o gramos según corresponda:

$$2,24 \text{ g SV lodo} \cdot \frac{1 \text{ L lodo}}{3,2 \text{ g SV lodo}} = 0,7 \text{ L lodo}$$

$$2,8 \text{ g SV FORSU} \cdot \frac{1 \text{ kg FORSU}}{193 \text{ g SV FORSU}} \cdot \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} = 14,5 \text{ g FORSU}$$

$$0,56 \text{ g SV aceite} \cdot \frac{1 \text{ g aceite}}{1 \text{ g SV aceite}} \cdot \frac{1 \text{ mL aceite}}{0,92 \text{ g aceite}} = 0,61 \text{ mL aceite}$$

Como se observa en los cálculos anteriores, se añaden 0,7 L de lodos, 14,5 g de FORSU y 0,61 mL de aceite a la última botella del experimento.

3.4.4 Preparación de las botellas y puesta en marcha

Desde este punto, el experimento se desarrolló siguiendo el mismo protocolo empleado en los ensayos anteriores, abarcando desde el arranque del sistema hasta su finalización, además de la recopilación de los datos obtenidos. Posteriormente, se llevaron a cabo análisis de alcalinidad en las muestras extraídas de cada una de las botellas.

Cabe destacar que, al realizarse el ensayo bajo condiciones termófilas (55 °C), fue necesario añadir agua destilada periódicamente al baño del equipo AMPTS III Light, aproximadamente cada tres días, debido a la evaporación del agua, con el fin de mantener constante la temperatura de operación del sistema, véase en la Figura 3-16.



Figura 3-16 Llenado de agua por el orificio del equipo AMPTS III (elaboración propia).

3.5 Análisis elemental CHNS de las muestras

3.5.1 Preparación del análisis

Con el fin de caracterizar los sustratos empleados en los experimentos de digestión anaerobia, se prepararon seis muestras destinadas a análisis en la Universidad de Vigo. Las muestras correspondieron a los siguientes materiales: lodos procedentes de los buques Patiño, Castilla e I+C, restos de comida empleados como sustrato en el segundo experimento, gelatina utilizada en el primer experimento y aceite de cocina usado, presente en ambos experimentos. El objetivo de este análisis fue determinar la composición elemental (CHNS) de los distintos sustratos, parámetros necesarios para posteriores estimaciones teóricas del potencial energético y de producción de biogás.

En primer lugar, los tubos que contenían los tres tipos de lodo se sometieron a centrifugación con el fin de separar la fase líquida de la sólida. Tras este proceso, se descartó la parte líquida y se conservó únicamente la fracción sólida, que es la que contiene la mayor parte de la materia orgánica de interés para el análisis. Posteriormente, se prepararon cinco crisoles en los que se depositaron las muestras sólidas correspondientes a los lodos, la fracción orgánica de comida y la gelatina, véase en la Figura 3-17.



Figura 3-17 Obtención de la parte sólida de las muestras mediante centrifugación (elaboración propia).

Estos crisoles se introdujeron en un horno de secado a 105 °C durante 8 horas, hasta eliminar completamente la humedad presente en las muestras. La Figura 3-18 muestra el proceso. Este paso es necesario para obtener una masa seca constante y garantizar la fiabilidad del análisis posterior.

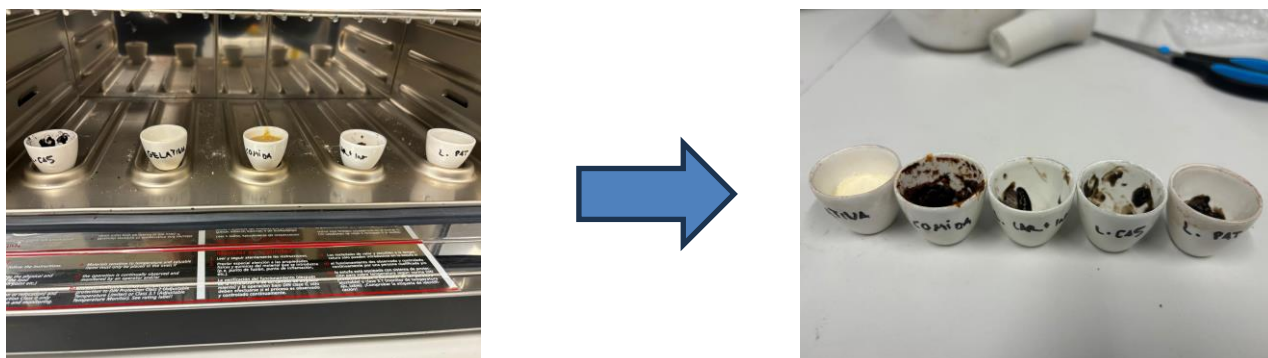


Figura 3-18 Secado en horno a 105 °C (elaboración propia).

Una vez secas las muestras, se procedió a su preparación para el envío al laboratorio. Para ello, se introdujo aproximadamente 1 mL de cada muestra en tubos Eppendorf. En el caso del aceite filtrado, la

muestra se introdujo directamente en el tubo correspondiente. Por el contrario, las muestras sólidas (lodos, comida y gelatina) fueron machacadas previamente en un mortero hasta obtener un polvo fino y homogéneo, cumpliendo así los requisitos de granulometría exigidos para el análisis elemental. Finalmente, las seis muestras preparadas se enviaron al laboratorio de la Universidad de Vigo para la determinación de su composición. En la Figura 3-19, se muestra el aspecto final de las muestras a analizar.



Figura 3-19 Muestras listas para ser mandadas a analizar (elaboración propia).

3.5.2 Procedimiento de análisis

El análisis elemental de las muestras para determinar su composición en carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S) se realizó mediante una técnica instrumental basada en combustión a alta temperatura, reducción química y separación cromatográfica. Este método permite cuantificar con gran precisión la composición elemental de materiales orgánicos e inorgánicos, siendo ampliamente utilizado en la caracterización de biomasa, combustibles y residuos orgánicos.

El fundamento de la técnica se basa en la oxidación completa e instantánea de la muestra mediante combustión tipo flash. Durante este proceso, la muestra se somete a una reacción de combustión rápida en presencia de oxígeno, lo que provoca la conversión de los elementos presentes en productos gaseosos de combustión. En concreto, el carbono se transforma en CO_2 , el hidrógeno en H_2O , el nitrógeno en N_2 y el azufre en SO_2 , lo que permite su posterior separación y cuantificación.

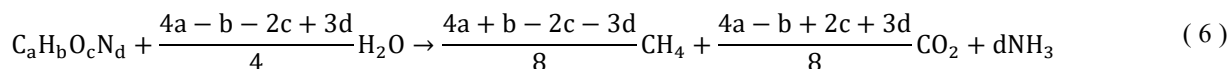
El procedimiento comienza con la preparación y pesaje de la muestra, para lo cual se pesan entre 1 y 2 mg utilizando una microbalanza analítica de alta precisión. La muestra se introduce posteriormente en cápsulas de estaño de dimensiones aproximadas 5×3,5 mm, que facilitan la combustión instantánea.

Las cápsulas se colocan en un automuestreador y se introducen en un reactor de cuarzo mantenido a aproximadamente 1015 °C. En el momento de la inyección, el flujo portador de helio se enriquece con oxígeno puro, generándose una reacción altamente exotérmica que puede elevar la temperatura local hasta 1800 °C, garantizando la oxidación completa de la muestra.

Los gases generados atraviesan posteriormente un horno de reducción con hilos de cobre, cuya función es eliminar el exceso de oxígeno y estabilizar los gases resultantes (CO_2 , H_2O , N_2 y SO_2). Finalmente, estos gases son transportados por un flujo de helio a través de una columna cromatográfica mantenida a 80 °C, donde se separan antes de ser detectados mediante un detector de conductividad térmica (TCD), que genera una señal proporcional a la concentración de cada elemento presente en la muestra.

3.5.3 Cálculo teórico de producción de metano

Cuando se conoce la composición elemental de un sustrato orgánico, es decir, el porcentaje de C, H, O y N, se puede estimar la producción teórica de metano mediante la ecuación estequiométrica de Buswell (6) [5].



Donde:

- a= número de moles de carbono
- b= número de moles de hidrógeno
- c= número de moles de oxígeno
- d= número de moles de nitrógeno

A partir del análisis de sólidos realizado sobre las muestras se determinó la concentración de sólidos volátiles por litro (SV/L). Este parámetro permite estimar la fracción orgánica biodegradable del material, la cual es la responsable principal de la producción de biogás durante el proceso de digestión anaerobia. A continuación, se presenta, a modo de ejemplo, la composición química de la gelatina obtenida mediante su análisis elemental, véase en la Tabla 3-1. Las composiciones del resto de muestras se recogen en sus respectivas secciones dentro del apartado de resultados.

Muestra	Descripción	N (%)	C (%)	H (%)	O (%)	Concentración (g SV/L)
Gelatina	Restos de alimentos	18,36	48,32	6,89	26,43	100 % SV

Tabla 3-1 Composición elemental y concentración de sólidos volátiles de la gelatina (elaboración propia).

Los cálculos correspondientes se realizarán tomando la gelatina como ejemplo representativo, empleando para ello su composición elemental obtenida en el análisis elemental. A partir de estos datos se determina la fórmula empírica del sustrato y posteriormente se aplica la ecuación de Buswell, lo que permite estimar la producción teórica de metano generada durante el proceso de digestión anaerobia.

Cabe destacar que no fue necesario realizar un análisis elemental de la celulosa, ya que su composición era ya conocida. Por ello, los cálculos se realizaron a partir de su fórmula empírica $C_6H_{10}O_5$ [40].

A continuación, se detallan los pasos seguidos para la realización de los cálculos necesarios:

- 1) Se toma como base de cálculo 100 g de muestra. Así, la masa de cada elemento presente en la gelatina es:
 - Carbono: 48,32 g
 - Hidrógeno: 6,89 g
 - Oxígeno: 26,43 g
 - Nitrógeno: 18,36 g
- 2) Seguidamente, cada una de estas masas se transforma en moles a partir de su masa atómica:
 - C = 12,011 g/mol
 - H = 1,008 g/mol
 - O = 15,999 g/mol
 - N = 14,007 g/mol

$$\frac{48,32}{12,011} = 4,023 \text{ mol C}$$

$$\frac{6,89}{1,008} = 6,835 \text{ mol H}$$

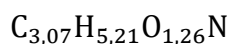
$$\frac{26,43}{15,999} = 1,652 \text{ mol O}$$

$$\frac{18,36}{14,007} = 1,311 \text{ mol N}$$

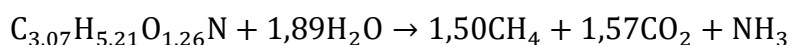
- 3) Para obtener la fórmula empírica, todos los valores se dividen entre el menor número de moles, correspondiente al nitrógeno:

$$\begin{aligned} a &= \frac{4,023}{1,311} = 3,07 \\ b &= \frac{6,835}{1,311} = 5,21 \\ c &= \frac{1,652}{1,311} = 1,26 \\ d &= 1 \end{aligned}$$

Así, la fórmula empírica de la gelatina queda como:

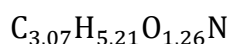


- 4) Aplicando la ecuación estequiométrica de Buswell, la reacción teórica para la gelatina queda:



Esta reacción significa que 1 mol de sustrato gelatina produce teóricamente 1,50 mol de CH₄ y 1,57 mol de CO₂.

- 5) Se necesita ahora calcular la masa molar de la fórmula empírica:



Sustituyendo por los pesos molares:

$$m = 12,001 \cdot (3,07) + 1,008 \cdot (5,21) + 15,999 \cdot (1,26) + 14,007 \cdot (1)$$

$$m = 76,21 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Por lo tanto, 1 mol de gelatina según la fórmula empírica obtenida tiene una masa de 76,21 g.

- 6) Se necesita conocer el volumen de metano producido por número de mol. El volumen molar del metano a 0 °C y 1 atm es:

$$m = 22,4 \frac{\text{L}}{\text{mol}}$$

Como la reacción teórica muestra que 1 mol de sustrato genera 1,50 mol de CH₄, el volumen de metano producido por mol de sustrato será:

$$V = 1,50 \cdot 22,4 = 33,6 \frac{\text{L CH}_4}{\text{mol gelatina}}$$

- 7) A continuación, este volumen se divide entre la masa molar del sustrato para expresar el potencial teórico de metano de la gelatina por gramo de sólido volátil.

Como 1 mol de sustrato pesa 76,21 g, entonces:

$$\text{BMP} = \frac{33,6}{76,21} = 0,44 \frac{\text{L CH}_4}{\text{g SV}}$$

- 8) A partir de la reacción ajustada, la producción de biogás está formada por 1,50 mol de CH₄ y 1,57 mol de CO₂. El porcentaje teórico de metano en el biogás se calcula como:

$$\% \text{CH}_4 = \frac{1,50}{1,50 + 1,57} \cdot 100 = 48,8 \%$$

Por diferencia, el contenido de CO₂ será 51,2 %.

En consecuencia, la composición teórica del biogás generado por la gelatina es de 48,8 % de CH₄ y 51,2 % de CO₂.

- 9) Finalmente, se calcula el volumen de biogás generado:

Se aproxima que el biogás está compuesto por CH₄ y CO₂ en su totalidad, por lo que se comienza sumando los moles:

$$1,50 + 1,57 = 3,07 \text{ mol}$$

Se mantienen los 22,4 L/mol como volumen por mol de cualquier gas en condiciones normales (0 °C y 1 atm).

$$V = 3,07 \cdot 22,4 = 68,77 \text{ L}$$

Se pasa a volumen por gramo de sustrato, manteniendo 76,21 g/mol de gelatina.

$$V = \frac{68,77}{76,21} = 0,902 \frac{\text{L}}{\text{g SV}} = 902 \frac{\text{mL}}{\text{g SV}} \text{ biogás}$$

Los cálculos se realizaron de forma análoga para el resto de las muestras, siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente. A continuación, se presentan a modo de ejemplo, los resultados finales obtenidos para la gelatina Tabla 3-2. Los resultados finales obtenidos para todas las muestras se recogen en sus respectivos apartados dentro de la sección de resultados.

Muestra	BMP (mL CH ₄ /g SV)	Biogás (mL/ g SV)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	Biogás (mL/kg muestra)
Gelatina	440	902	48,8	51,2	902 000

Tabla 3-2 Potencial teórico de metano y biogás de la gelatina (elaboración propia).

3.5.4 Cálculo teórico del poder calorífico superior

Con el fin de estimar el poder calorífico superior (PCS) teórico de las muestras, se empleó la ecuación de Dulong (7) para combustibles secos sólidos o líquidos, expresada en función de la composición elemental del sustrato [41]:

$$PCS = 8.140 C + 34.400 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2.220 S \quad (7)$$

Donde:

- C es el contenido centesimal de carbono en peso.
- H es el contenido centesimal de hidrógeno en peso.
- O es el contenido centesimal de oxígeno en peso.
- S es el contenido centesimal de azufre en peso.
- $\left(H - \frac{O}{8} \right)$ representa el hidrógeno disponible para la combustión, es decir, el hidrógeno no combinado previamente con el oxígeno presente en el propio combustible.

A continuación, se detalla el procedimiento seguido para el cálculo del PCS de la gelatina:

1) En el caso de la gelatina, el análisis elemental proporcionó los siguientes valores:

- Carbono: 48,32 %
- Hidrógeno: 6,89 %
- Oxígeno: 26,43 %
- Nitrógeno: 18,36 %
- Azufre: 0 %

Dado que el contenido de azufre de la muestra es nulo, el tercer término de la ecuación desaparece, quedando la expresión reducida a:

$$PCS = 8.140 C + 34.400 \left(H - \frac{O}{8} \right)$$

2) Se procede a sustituir en la ecuación los valores de cada elemento:

$$PCS = 8,140 \cdot 48,32 + 34,400 \left(6,89 - \frac{26,43}{8} \right) = 516.691,8$$

No obstante, dado que la ecuación se está aplicando con composiciones centesimales, el valor práctico del resultado se expresa como:

$$PCS = 5.166,9 \text{ kcal/kg}$$

3) Con objeto de expresar el resultado en unidades del Sistema Internacional, se convierte el valor anterior de kcal/kg a MJ/kg. Para ello, se emplea la equivalencia 1 kcal = 4,184 kJ, por tanto:

$$PCS = 5.166,9 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \cdot \frac{4,184 \text{ kJ}}{1 \text{ kcal}} = 21.620,3 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{PCS} = 21,62 \text{ MJ/kg}$$

Este valor representa la energía máxima que podría liberarse durante la combustión completa de la gelatina, considerando la condensación del vapor de agua generado, tal y como corresponde al concepto de poder calorífico superior.

Se continúa realizando los cálculos para cada una de las muestras restantes siguiendo el mismo procedimiento descrito anteriormente. En la Tabla 3-3 se presenta, a modo de ejemplo, el resultado obtenido para la gelatina. Los resultados correspondientes al resto de muestras se recogen en sus respectivas secciones dentro del apartado de resultados.

Muestra	PCS (MJ/kg SV)
Gelatina	21,62

Tabla 3-3 Poder calorífico superior teórico (PCS) de la gelatina (elaboración propia).

4 RESULTADOS

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos a lo largo del trabajo. En primer lugar, se recogen los resultados experimentales de los tres ensayos de digestión anaerobia realizados, estudiando la producción de metano de los distintos sustratos evaluados. Asimismo, se incluyen los resultados de los análisis de alcalinidad y del ratio AGV/AT de cada experimento, con el fin de valorar la estabilidad del proceso. Junto a ello, se exponen los resultados de los cálculos teóricos del potencial de producción de metano y del poder calorífico asociado de las muestras analizadas, así como la estimación del potencial de producción de biogás en distintos buques de la Armada a partir de dichos valores teóricos. Finalmente, se incorpora una comparación global entre los resultados obtenidos, diferenciando su carácter experimental, teórico y bibliográfico, lo que permite interpretar de forma conjunta el comportamiento de los sustratos y valorar su potencial de aprovechamiento energético.

4.1 Resultados de la digestión de residuos orgánicos ricos en carbohidratos, proteínas y grasas a temperatura mesófila (experimento 1)

4.1.1 Volumen acumulado de metano

A continuación, se muestra la Figura 4-1 correspondiente a la evolución del volumen acumulado de metano (NmL) por día, durante los 19 días de operación, equivalentes al tiempo de retención hidráulico (TRH) definido para el ensayo, para las nueve botellas evaluadas.

Los tres reactores que contenían exclusivamente inóculo (blancos experimentales representados en azul) alcanzaron valores bajos, entre 716 y 742 NmL. Esta producción corresponde a la actividad endógena del digestato, es decir, la producción de metano que genera el propio inóculo por sí mismo, y era previsible al no haberse añadido sustrato externo. La superposición prácticamente completa de las tres curvas confirma una correcta ejecución experimental, ya que no se observan desviaciones apreciables entre réplicas. Este comportamiento valida el uso de los blancos como referencia para comparar el efecto de los distintos sustratos.

En los dos reactores alimentados con celulosa (carbohidratos representados en verde), el volumen acumulado final se sitúa en torno a 2 769 y 2 777 NmL. Ambas réplicas muestran un comportamiento prácticamente idéntico durante todo el ensayo, con una fase de producción intensa entre los días 2 y 7 y posterior estabilización progresiva. La ausencia de divergencias indica una buena reproducibilidad.

Los dos reactores con gelatina (proteína representada en rojo) alcanzan valores finales muy similares a los obtenidos con celulosa, situándose ligeramente por debajo, entre 2 668 y 2 780 NmL. Durante la fase inicial entre los días 2 y 5, se observa una producción ligeramente superior respecto a la celulosa, lo que puede atribuirse a la mayor biodisponibilidad de un sustrato proteico frente a uno estructural. No obstante, en este caso sí aparece una ligera desviación entre réplicas, especialmente a partir del día 6.

Aunque la diferencia no es elevada, indica una menor estabilidad experimental en comparación con la celulosa.

El comportamiento que quizás es más destacado corresponde a los dos reactores con aceite (lípidos representados en amarillo), donde se aprecia una marcada divergencia entre ambas botellas. Una de ellas se estabiliza en torno a 1 579 NmL, valor inferior al obtenido con celulosa y gelatina. En cambio, la otra continúa incrementando su producción hasta alcanzar los 4 006 NmL el día 19, incluso con tendencia creciente y siendo el valor máximo del experimento. Esta diferencia puede explicarse por el procedimiento de preparación. Ambas botellas se llenaron a partir de una mezcla común que posteriormente se dividió en dos partes iguales. Dado que el aceite es inmiscible en fase acuosa y tiende a flotar, es probable que no se lograra una dispersión completamente homogénea antes de la división. Como consecuencia, una botella pudo recibir una mayor fracción lipídica que la otra. Esta hipótesis es coherente con los resultados obtenidos: una mayor concentración de aceite implicaría un mayor potencial metanogénico, mientras que una menor dosificación reduciría la producción final. Sin embargo, se considera que la media de ambos experimentos proporciona un valor realista de la degradación del aceite total añadido.

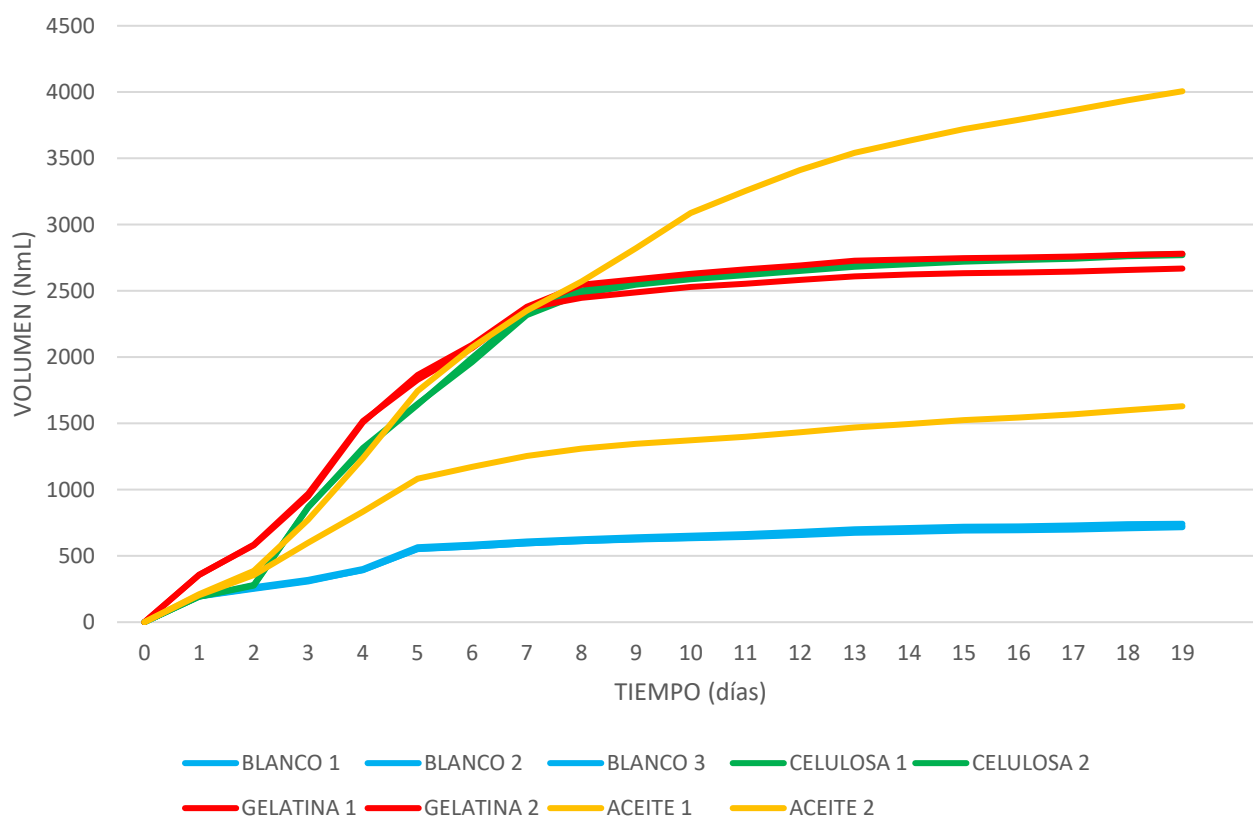


Figura 4-1 Gráfica de volumen acumulado de metano por día (elaboración propia).

Tras la finalización del primer experimento, se observó que en las botellas correspondientes al tratamiento con aceite se formaron costras superficiales flotantes, véase en la Figura 4-2. Este comportamiento es coherente con lo descrito en el estado del arte, donde se indica que la degradación de aceites puede generar ácidos grasos de cadena larga, compuestos que tienden a acumularse en la fase superior del reactor y favorecer fenómenos de flotación. Se muestra a continuación:

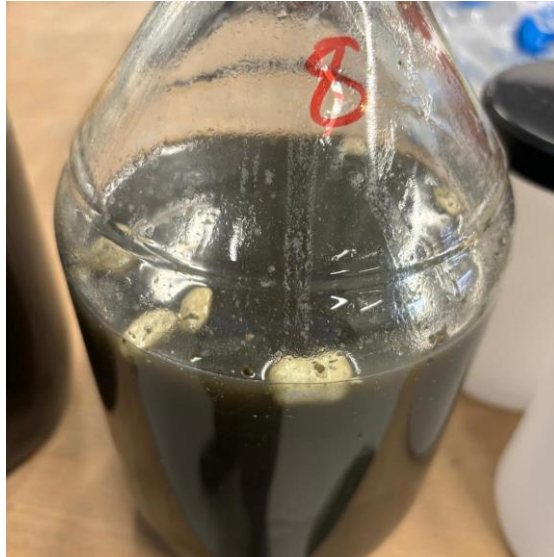


Figura 4-2 Costras flotantes en las botellas de aceite (elaboración propia).

4.1.2 Caudal de metano

La evolución del caudal de producción de metano confirma las tendencias observadas en la gráfica de volumen acumulado, ya que ambas representaciones reflejan el mismo proceso desde perspectivas complementarias. Mientras que el volumen acumulado muestra la producción total alcanzada, el caudal permite identificar con mayor claridad las fases de mayor actividad metabólica del sistema y, por tanto, explica la pendiente de las curvas de volumen. A continuación, se muestra la Figura 4-3:

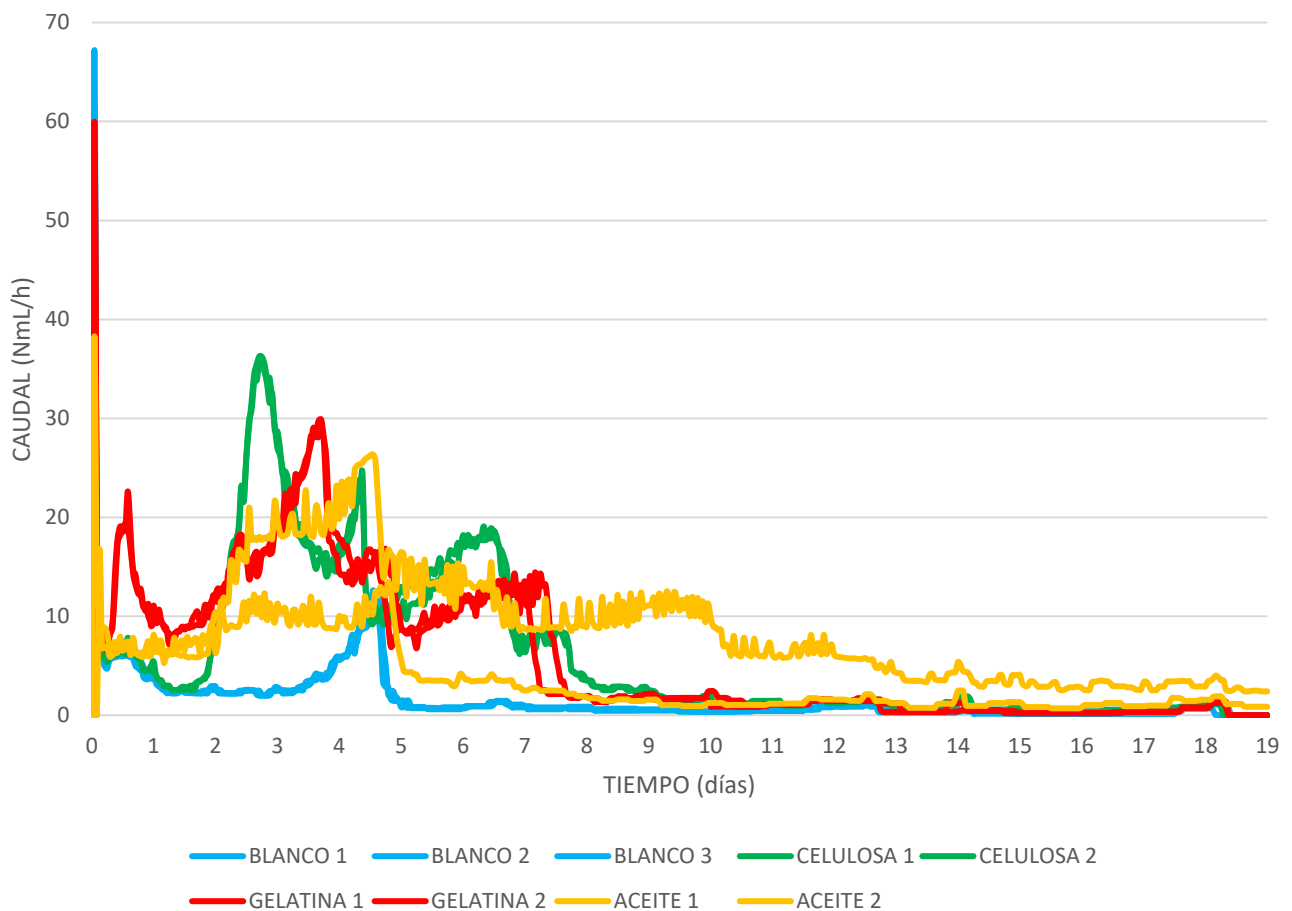


Figura 4-3 Gráfica de caudal de metano por día (elaboración propia).

En los reactores con únicamente inóculo (blancos experimentales representados en azul), el caudal se mantiene muy bajo durante todo el ensayo, con un pequeño pico durante el día 4. Después, desciende rápidamente hasta valores próximos a cero, lo que explica el bajo volumen acumulado final.

En los reactores con celulosa (color verde), el caudal presenta una fase de producción intensa entre los días 2 y 7, coincidiendo con el tramo de mayor pendiente del volumen acumulado, tras lo cual disminuye progresivamente hasta estabilizarse.

Los reactores con gelatina (color rojo) presentan una producción inicial de caudal ligeramente superior a la celulosa durante los primeros días, lo que coincide con la mayor producción temprana observada en el volumen acumulado. A partir del día 6 se aprecia una ligera divergencia entre réplicas, coherente con la pequeña diferencia observada en el volumen final.

Finalmente, los reactores con aceite (color amarillo) muestran la mayor diferencia entre botellas también en la gráfica de caudal. Una de ellas mantiene valores de producción más elevados durante un periodo más prolongado, lo que explica el mayor volumen acumulado final.

Todos los reactores, a excepción de aquellos que contienen aceite, cumplen el criterio de finalización de experimentos al presentar una variación inferior al 1 % en los dos últimos días. En cambio, los reactores con aceite aún evidencian capacidad de generación de metano, registrando una variación del 2 % en ese mismo periodo. No obstante, se decidió fijar una duración total de 19 días para todas las botellas, y así tener tiempo suficiente para realizar 3 experimentos diferentes.

4.1.3 Producción media total de metano

Seguidamente, se muestra la Figura 4-4 de barras correspondiente al volumen acumulado medio de metano (NmL) alcanzado al final del ensayo para cada tratamiento evaluado: blanco, celulosa, gelatina y aceite. La gráfica de barras de las medias permite establecer de forma clara el orden de rendimiento de los distintos tratamientos al finalizar el ensayo.

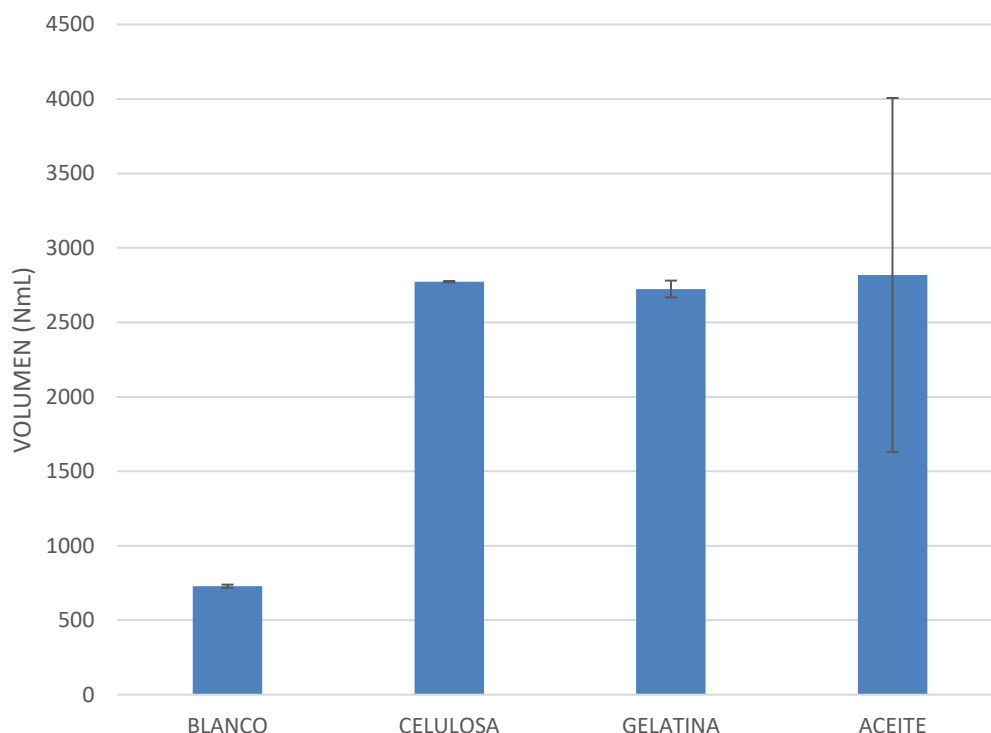


Figura 4-4 Gráfica de producción media total de metano por grupos (elaboración propia).

En términos de volumen acumulado medio de metano, las diferencias entre los tres sustratos no son muy significativas. El aceite ocupa la primera posición, presentando el valor más elevado con 2 792 NmL. En segundo lugar, se sitúa la celulosa con 2 773 NmL, un rendimiento ligeramente inferior al aceite, pero muy próximo a este. La gelatina ocupa la tercera posición con 2 724 NmL, mostrando un comportamiento muy similar al de la celulosa. Finalmente, los blancos presentan el menor volumen acumulado con 728 NmL, como era previsible al no incorporar co-sustrato adicional.

No obstante, es importante matizar que el aceite vence por un margen reducido debido a la elevada desviación observada entre sus dos réplicas. Una de las botellas alcanzó un valor muy superior al resto de tratamientos, mientras que la otra quedó claramente por debajo de la celulosa y la gelatina. Esta dispersión penaliza la media aritmética del aceite. En ausencia de dicha desviación, y considerando el potencial máximo observado, el aceite habría sido el tratamiento claramente dominante con una ventaja significativa sobre los demás sustratos.

La desviación estándar permite evaluar la estabilidad y reproducibilidad de cada tratamiento a partir de la dispersión entre réplicas, y así poder garantizar una correcta fiabilidad de los resultados obtenidos. En la Figura 4-4, la desviación entre replicas aparece como barras de error negras dentro de las barras azules. Dichas barras de error confirman que el aceite es el tratamiento con mayor desviación relativa entre réplicas (86 %), muy por encima del resto. Esta elevada desviación se explica por lo mencionado anteriormente: la posible distribución heterogénea del aceite durante la preparación, debido a su carácter inmiscible y su tendencia a permanecer en superficie, lo que pudo provocar una dosificación desigual entre ambas botellas. Por ello, en los siguientes experimentos las botellas de aceite se prepararon de manera individual para conseguir una distribución proporcional de aceite.

La gelatina presenta una desviación moderada (4 %), mientras que el blanco y, especialmente, la celulosa muestra una dispersión prácticamente nula. La celulosa se posiciona así, como el tratamiento más estable y reproducible del experimento.

4.1.4 Producción neta corregida por el blanco

Se procedió a realizar la corrección por blanco del conjunto de tratamientos del experimento. Para ello, se calculó la media diaria de los blancos experimentales y dicha producción se restó a cada una de las curvas de las medias de botellas gemelas correspondientes a las botellas con sustrato. El resultado se muestra en la Figura 4-5. Esta corrección permite eliminar la contribución asociada a la actividad endógena o de materia biodegradable remanente del inóculo y obtener la producción neta atribuible exclusivamente al sustrato añadido en cada reactor, garantizando así una comparación más precisa del rendimiento real de los distintos tratamientos.

Se observa un volumen final acumulado neto muy similar entre todos los sustratos evaluados. No obstante, el mayor valor al final del ensayo corresponde al aceite, con una producción de 2 064 NmL. Aun así, se debe tener en cuenta que la finalización del experimento se produjo con el caudal de los reactores con aceite aún por encima del criterio de estabilización establecido, por lo que, de haberse prolongado durante más tiempo, podrían haber seguido generando metano.

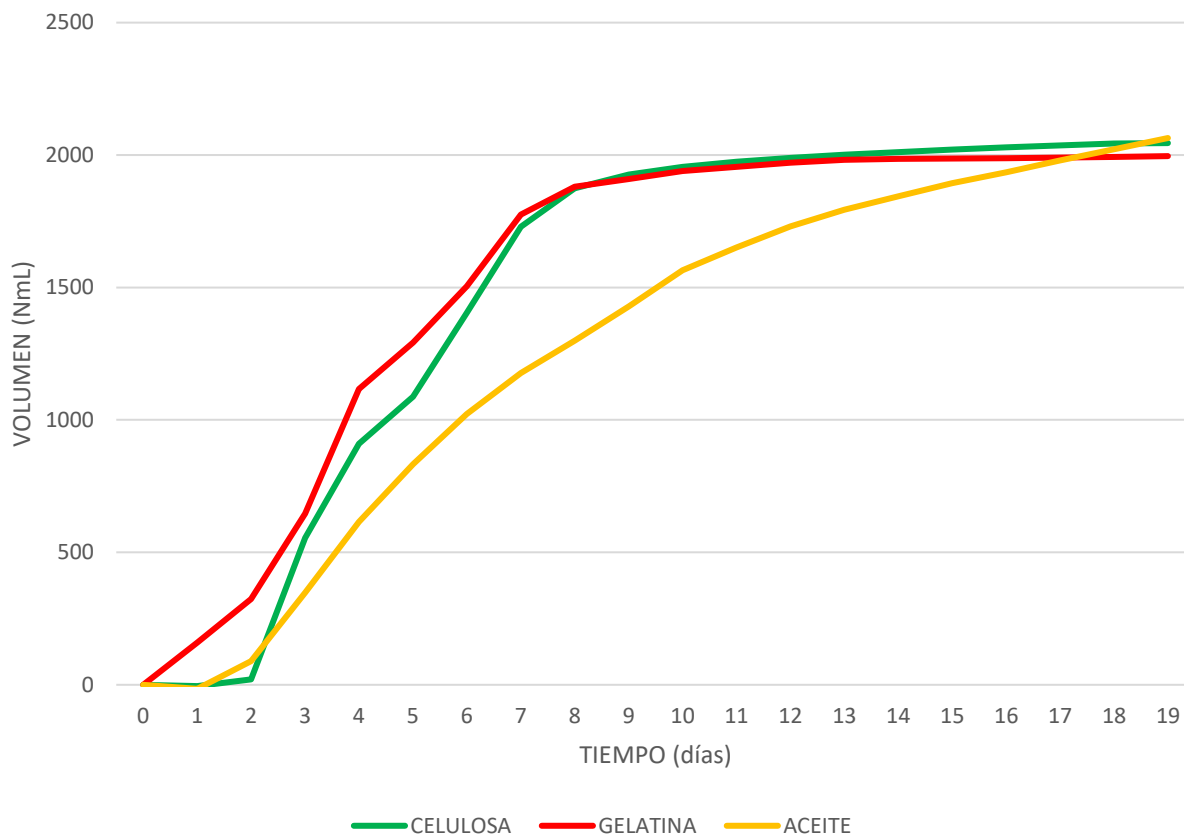


Figura 4-5 Gráfica de volumen acumulado neto corregido por el blanco (elaboración propia).

4.1.5 Producción neta por gramo de sólido volátil del sustrato

En la Figura 4-6 se muestra la producción neta obtenida tras la corrección por blanco normalizada respecto a la cantidad de sustrato añadido. Para ello, los valores diarios se dividieron entre los 5,6 g de sustrato incorporados en cada botella, con el objetivo de expresar la producción específica de metano por gramo de sólido volátil. Esta normalización permite comparar de forma directa el rendimiento intrínseco de cada sustrato, independientemente de la masa total adicionada en el reactor, por ello es la forma más habitual en la que se encuentra expresados los resultados en bibliografía.

Se observa un volumen neto de biogás por gramo de sólido volátil tras los 19 días de 365 NmL para la celulosa, 356 NmL para la gelatina, y 368 NmL para el aceite. No obstante, debe señalarse que la producción asociada al aceite debe interpretarse con cautela, ya que en el primer experimento se observó una desviación significativa entre réplicas. Se estima una producción de aceite claramente superior a la obtenida.

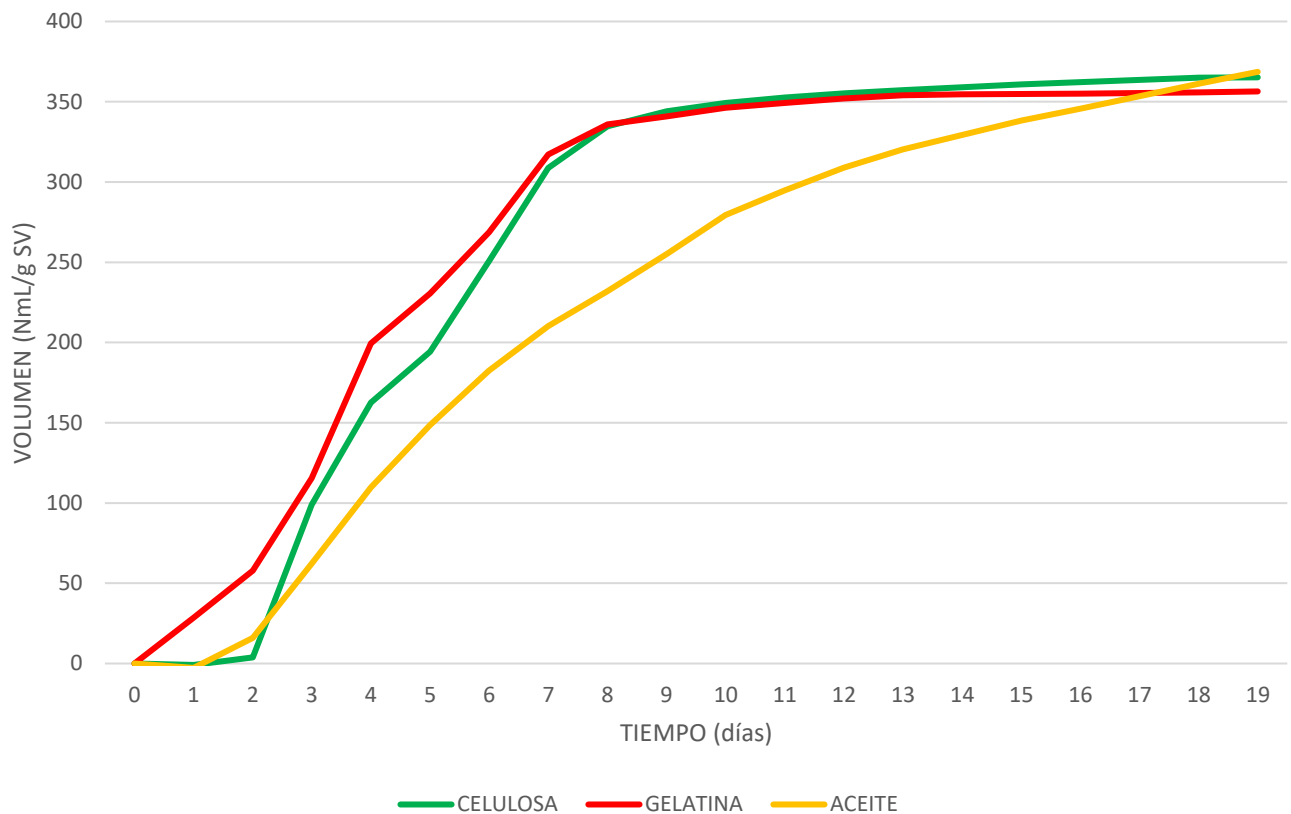


Figura 4-6 Gráfica de volumen de metano por cada gramo de SV (elaboración propia).

Se observa un volumen neto de biogás por gramo de sólido volátil tras los 19 días de 365 NmL para la celulosa, 356 NmL para la gelatina, y 368 NmL para el aceite. No obstante, debe señalarse que la producción asociada al aceite debe interpretarse con cautela, ya que en el primer experimento se observó una desviación significativa entre réplicas. Se estima una producción de aceite claramente superior a la obtenida.

4.2 Resultados de la digestión de residuos orgánicos procedentes de buques de la Armada a temperatura mesófila (experimento 2)

4.2.1 Volumen acumulado de metano

La Figura 4-7 refleja la evolución del volumen acumulado de metano (NmL) durante los 19 días de operación, equivalentes al TRH definido para este segundo ensayo, para las distintas configuraciones evaluadas.

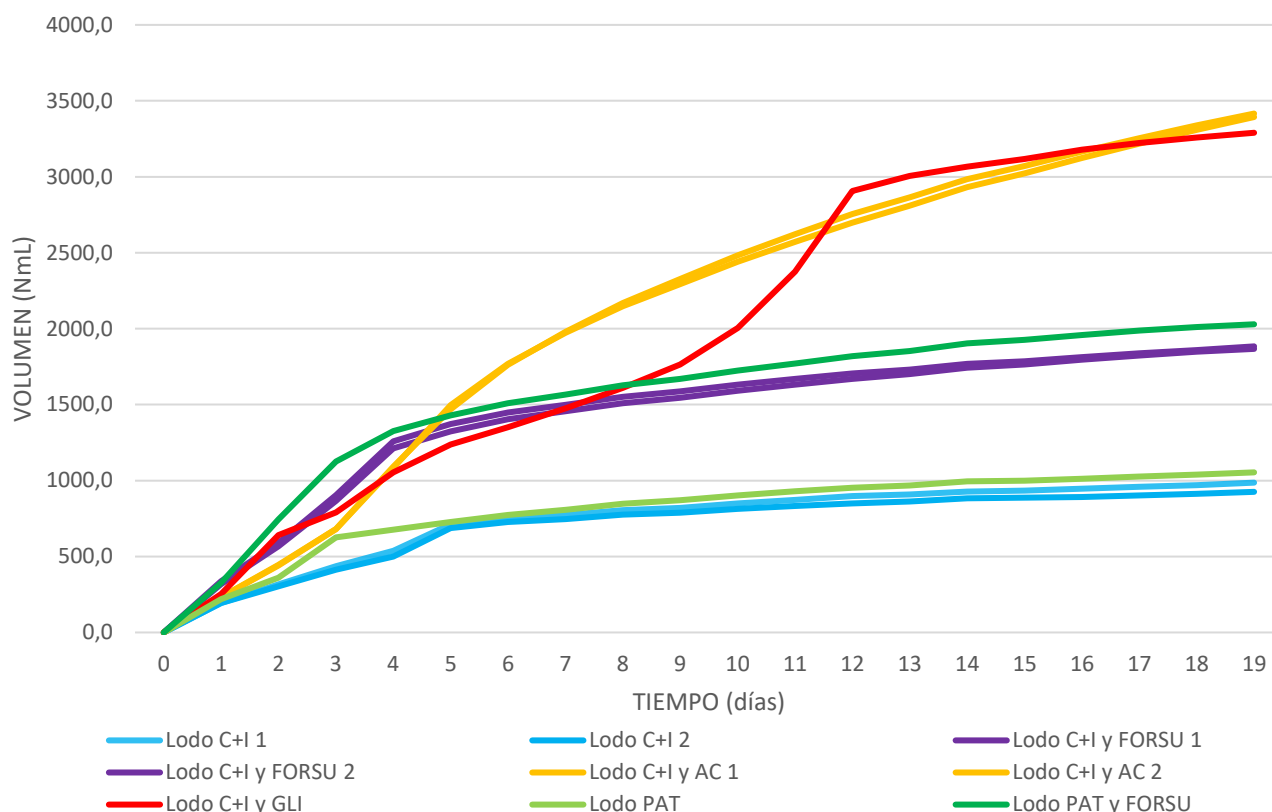


Figura 4-7 Gráfica de volumen acumulado de metano por día (elaboración propia).

Los dos reactores que contenían lodo C+I (representados en azul) registraron los valores más bajos de producción, alcanzando entre 925 y 986 NmL al final del ensayo. Este resultado era previsible al no incorporar co-sustrato adicional y tener una alta ISR. La razones de poner exclusivamente esta mezcla de lodos era para valorizar la mezcla de lodos usada en otras botellas y así, poder ver la variación de producción añadiendo diferentes co-sustratos, y para evaluar el potencial individual de los lodos. Ambas curvas presentan una tendencia muy similar, aunque se aprecia una ligera desviación entre réplicas al final del experimento.

En los reactores lodo C+I y FORSU (fracción orgánica del comedor, representados en lila) el volumen acumulado final se sitúa entre 1 867 y 1 883 NmL. Las dos curvas son prácticamente coincidentes durante todo el ensayo, lo que indica una buena homogeneización del sustrato y una adecuada reproducibilidad experimental. La adición de fracción orgánica incrementa de forma significativa la producción respecto al lodo sin co-sustrato.

Los reactores lodo C+I y AC (aceite de cocina usado, representados en naranja) muestran un rendimiento claramente superior, alcanzando valores finales entre 3 393 y 3 416 NmL. A diferencia de lo ocurrido en el experimento anterior, en este caso no se aprecia desviación significativa entre ambas réplicas, lo que indica una mejora en el procedimiento de preparación y una dosificación más homogénea del aceite. Esto es debido a que, gracias a la lección aprendida en el primer experimento, se prepararon ambas botellas de aceite por separado. Este resultado confirma el elevado potencial metanogénico del sustrato lipídico cuando se incorpora de manera adecuada.

Se observa que las curvas correspondientes a las botellas lodo C+I y AC mantienen una tendencia ascendente al finalizar el experimento, a diferencia del resto de curvas, que ya se encuentran estabilizadas. Este comportamiento indica que el aceite podría continuar produciendo metano durante un periodo más prolongado, lo que refuerza su elevado potencial de valorización energética.

La botella lodo C+I y GLI (glicerina, representada en rojo) presenta también un rendimiento elevado, situándose en 3 290 NmL el día 19. No obstante, su curva muestra una evolución menos progresiva y más irregular, especialmente en la fase intermedia, lo que sugiere una cinética diferente asociada a la rápida degradabilidad de la glicerina.

En cuanto a la única botella de lodo PAT (representada en verde claro), se observa una producción final ligeramente superior al lodo C+I, alcanzando 1 054 NmL. Este resultado confirma que el lodo PAT posee una mayor actividad metanogénica intrínseca que el lodo C+I, confirmando un mayor rendimiento en la producción de metano. Al igual que la primera mezcla, se realizó una botella exclusiva de lodo PAT con el objetivo de poder ver la variación de producción añadiendo diferentes co-sustratos a este lodo, como es el caso del siguiente y último reactor.

Finalmente, la botella lodo PAT y FORSU (representada en verde oscuro) alcanza 2 029 NmL, superando tanto al lodo PAT sin co-sustrato como al tratamiento lodo C+I y FORSU. Este comportamiento refuerza la idoneidad de la codigestión del lodo PAT cuando se combina con fracción orgánica, y reafirma la idea de que el lodo PAT tiene mayor potencial de valorización que el de lodo lodo C+I.

Estos resultados muestran que la adición de co-sustratos incrementa de forma significativa la producción de metano, siendo el aceite y la glicerina los tratamientos de mayor rendimiento, mientras que el lodo PAT presenta una mayor actividad base que el lodo C+I.

4.2.2 Caudal de metano

La gráfica de caudal (NmL/h) confirma y refuerza las conclusiones obtenidas a partir del análisis del volumen acumulado, ya que este último representa la integración temporal del caudal. La coherencia entre ambas representaciones valida la interpretación cinética del segundo experimento. La Figura 4-8 recoge el caudal de producción de cada botella a lo largo del experimento.

En los reactores que contenían lodo C+I (representados en azul), el caudal presenta un pico inicial moderado durante los primeros días, seguido de un descenso progresivo hasta valores próximos a cero. Este comportamiento explica la disminución del crecimiento de la gráfica de volumen acumulado a partir del día 5 y los bajos volúmenes acumulados finales. Estos datos confirman que la producción responde únicamente a la actividad metanogénica intrínseca del lodo.

En los reactores lodo C+I y FORSU (color lila) se observa un incremento claro del caudal durante los primeros días (días 1–4), con valores superiores a los del lodo sin co-sustrato. Posteriormente, el caudal desciende fuertemente y se estabiliza en niveles bajos a partir del día 7. Este comportamiento cinético es coherente con el incremento del volumen acumulado final frente al lodo por sí solo y confirma que la fracción orgánica del comedor aporta materia fácilmente biodegradable que intensifica la producción en la fase inicial.

Los reactores lodo C+I y AC (color naranja) muestran los perfiles de caudal más intensos y sostenidos. Durante los primeros 3 días no destaca frente a las demás curvas, sin embargo, a partir de este día experimenta una fuerte subida hasta el día 5, manteniendo posteriormente valores superiores al resto de tratamientos durante buena parte del ensayo. La coincidencia prácticamente exacta entre ambas réplicas confirma la correcta homogeneización del aceite en este segundo experimento y explica los elevados volúmenes finales alcanzados. Se observa que el aceite tarda unos días en llegar a una buena producción, pero a partir de ahí ostenta el mayor potencial de crecimiento.

La botella de lodo C+I y GLI (color rojo) presenta un comportamiento diferenciado. Tras un incremento inicial hasta el día 2, se observa un descenso progresivo, seguido de un segundo pico más pronunciado a partir del día 9, alcanzando su máximo en el día 12, para descender posteriormente de forma abrupta. Esta evolución sugiere que, tras la primera fase de producción, todavía permanecían algunos ácidos grasos volátiles en el sistema que no pudieron ser convertidos inicialmente y que, con el avance del proceso, terminaron degradándose, dando lugar a una nueva liberación de metano. Este

comportamiento irregular explica la forma menos progresiva de su curva de volumen acumulado y su valor final elevado. En conjunto, se trata de la botella con el perfil más irregular del experimento.

En cuanto al lodo PAT (color verde claro), el caudal inicial es ligeramente superior al de lodo C+I, sobre todo durante los 4 primeros días, lo que respalda su mayor actividad metanogénica intrínseca y justifica el mayor volumen final obtenido.

Finalmente, el reactor lodo PAT y FORSU (color verde oscuro) presenta picos de caudal más elevados que el lodo PAT solo, manteniendo durante los primeros días valores claramente superiores, lo que se traduce en el incremento del volumen acumulado y confirma la idoneidad de la codigestión.

Todos los reactores excepto los que llevan aceite cumplen con que la variación de los dos últimos días sea menor del 1 %. Los reactores con aceite aún mantienen potencial de producción, finalizando ambos con una variación del 3 % respecto a los dos últimos días. Esto confirma lo observado en el experimento 1. Sin embargo, se quería mantener el tiempo total de 19 días con los experimentos anteriores para obtener una comparación directa y para poder realizar un total de 3 experimentos.

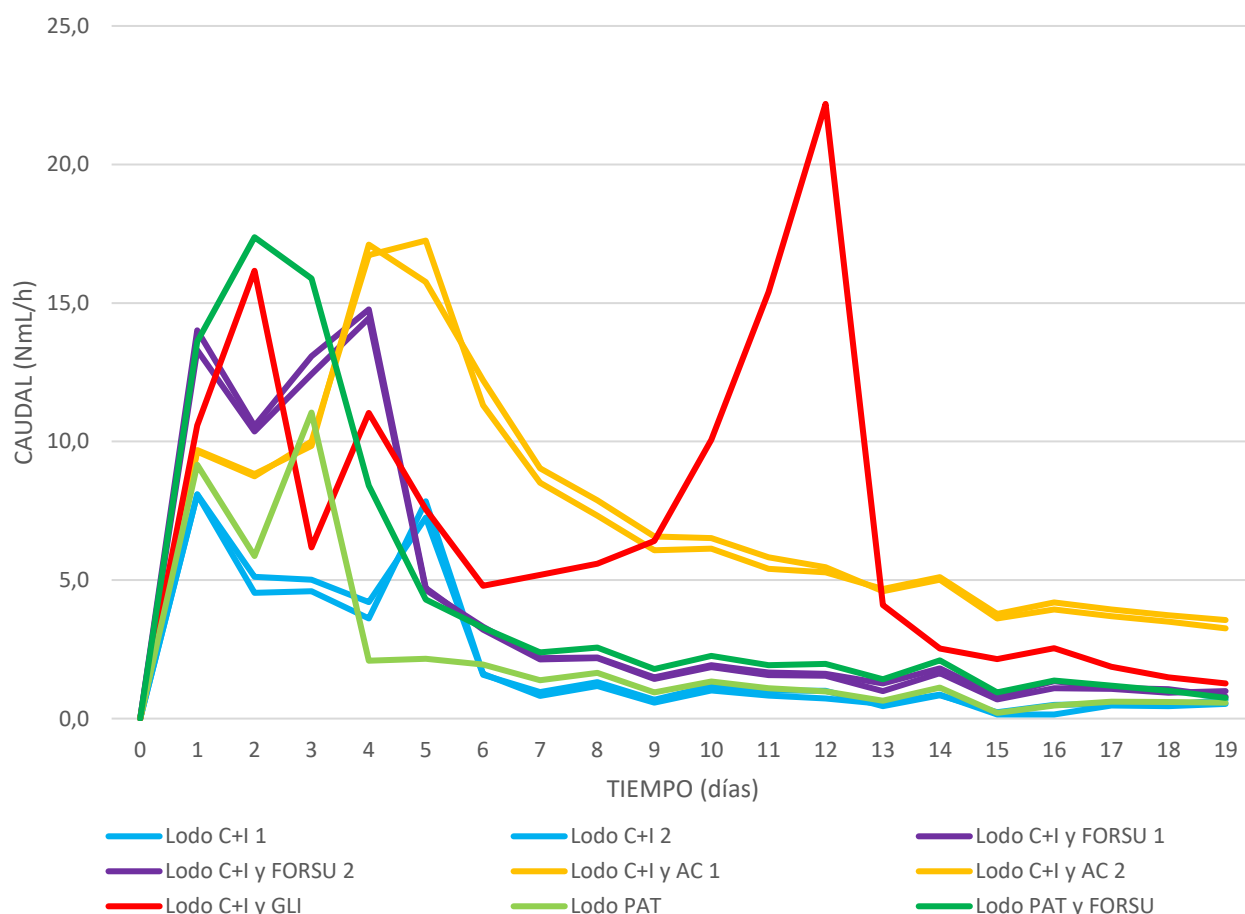


Figura 4-8 Gráfica de caudal de metano por día (elaboración propia).

4.2.3 Producción media total de metano

Seguidamente, se presenta la Figura 4-9 correspondiente al volumen acumulado medio de metano (NmL) alcanzado al final del ensayo para cada uno de los tratamientos evaluados en el segundo experimento. Esta representación permite establecer de forma clara el orden de rendimiento medio entre los tres tipos diferentes de botellas gemelas y compararlas con las demás tres botellas individuales.

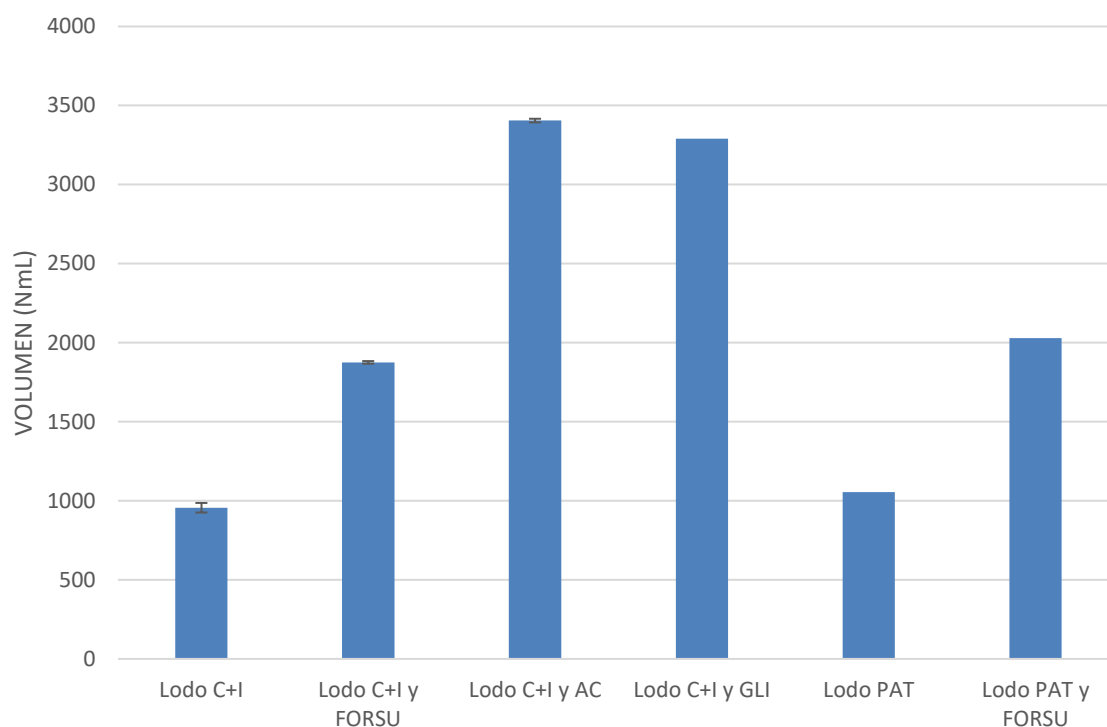


Figura 4-9 Gráfica de producción media total de metano por grupos (elaboración propia).

El tratamiento lodo C+I y AC presenta la mayor producción media total de metano, con 3 405 NmL, seguido de lodo C+I y GLI, con un valor cercano a 3 290 NmL. A continuación, se sitúa la botella lodo PAT y FORSU, con 2 029 NmL, mientras que lodo C+I y FORSU ocupa la última posición, con una media de 1 875 NmL. No obstante, esta comparación debe valorarse teniendo en cuenta que los volúmenes totales dependen no solo de la naturaleza del sustrato, sino también de la cantidad de materia orgánica añadida en cada botella. En este sentido, los tratamientos con menor ISR tienden a generar menores volúmenes absolutos de metano, por lo que la comparación entre botellas no resulta completamente representativa si no se normalizan los resultados por gramo de sólido volátil. Aun así, resulta destacable que la glicerina, pese a ensayarse con una relación ISR inferior a la del aceite, no superó la producción total de este último, lo que refuerza el elevado potencial metanogénico del aceite como co-sustrato. En el experimento 1, donde los tratamientos se evaluaron bajo una misma relación ISR, este condicionante no estaba presente, lo que permitía una comparación directa de los volúmenes producidos.

En cuanto a los tratamientos sin co-sustrato, la botella lodo PAT adquiere la quinta posición del experimento y presenta un valor ligeramente superior a la de lodo C+I, ya cuantificado anteriormente.

Estos resultados consolidan al aceite como el co-sustrato de mayor rendimiento medio en el segundo experimento, seguido muy de cerca por la glicerina. Asimismo, confirman que la codigestión incrementa de manera notable la producción de metano en comparación con el empleo exclusivo de lodos, y que el lodo PAT tiene mayor calidad que el lodo C+I en la producción de metano.

Las barras de error permiten medir desviación estándar para evaluar la estabilidad y reproducibilidad de los tratamientos que disponen de réplicas, es decir, lodo C+I, lodo C+I y FORSU y lodo C+I y AC.

Como se puede observar, el tratamiento lodo C+I presenta la mayor variabilidad relativa ($> 5\%$), que puede ser atribuida a un pequeño error experimental. No obstante, la magnitud de esta desviación es reducida y muy inferior a la observada en el Experimento 1 para el aceite, por lo que no se considera significativa.

Los tratamientos lodo C+I y FORSU y lodo C+I y AC muestran desviaciones muy bajas y apenas visibles, siendo especialmente reducida en el caso de lodo C+I y FORSU, que se posiciona como el

tratamiento más estable y reproducible del segundo experimento. Este resultado confirma una correcta homogeneización y dosificación del co-sustrato de fracción orgánica de comedor y lipídico, mejorando claramente respecto al ensayo anterior.

En conjunto, no se aprecian desviaciones preocupantes entre las botellas gemelas, lo que confirma la consistencia experimental y la fiabilidad de los datos obtenidos en el segundo experimento.

4.2.4 Producción neta corregida por el blanco

Al igual que en el experimento 1, al volumen de metano producido en cada grupo de botellas o en las botellas individuales se le resta el volumen generado por el blanco determinado en el experimento 1. De este modo, se obtiene la producción neta atribuible exclusivamente a cada sustrato, permitiendo valorizar por separado el volumen de metano producido por cada uno de ellos. La Figura 4-10 muestra las curvas obtenidas de cada sustrato:

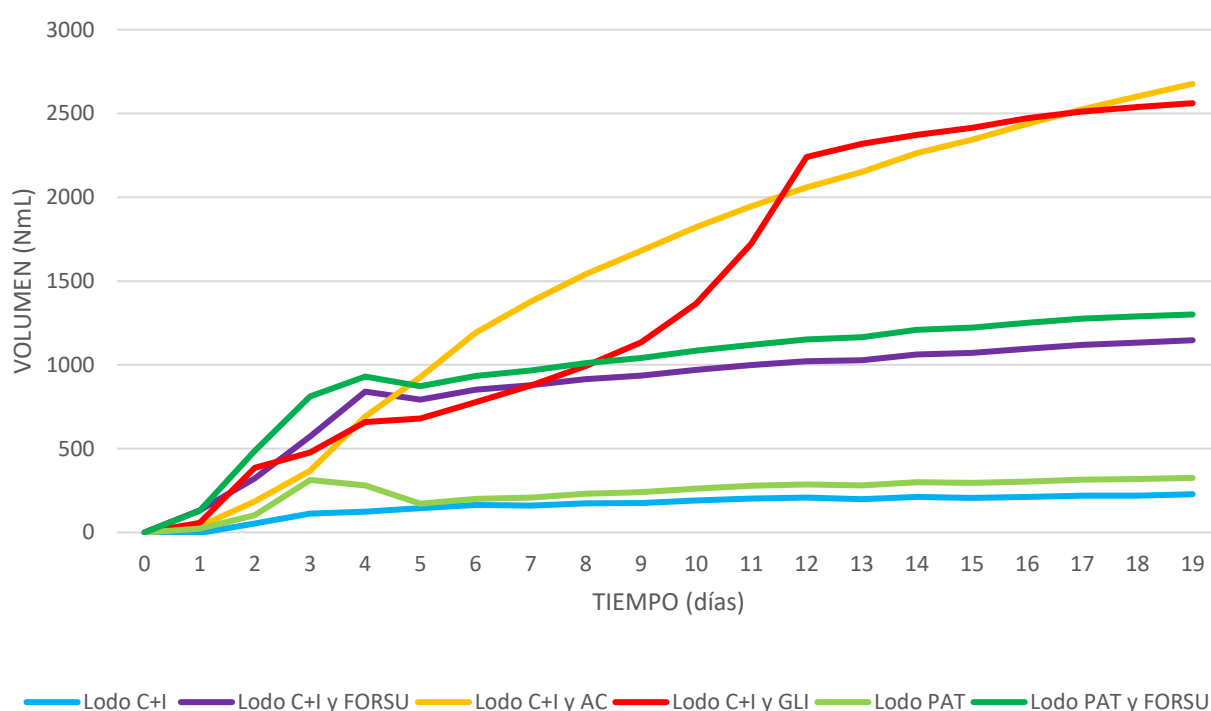


Figura 4-10 Gráfica de volumen de metano acumulado neto corregido por el blanco (elaboración propia).

Se observa una producción de metano significativamente superior en los co-sustratos aceite (color amarillo) y glicerina (color rojo) en comparación con la fracción orgánica de residuos, destacando especialmente el aceite. En este caso, se alcanza el mayor volumen acumulado del experimento, con un valor total de 2 676 NmL, atribuible exclusivamente a la adición de dicho co-sustrato.

4.2.5 Producción neta por gramo de sólido volátil del sustrato

La Figura 4-11 representa la producción de metano por gramo de sólido volátil de sustrato. Para ello, los valores diarios se dividieron por los gramos de sólidos volátiles de sustrato totales añadidos en cada caso:

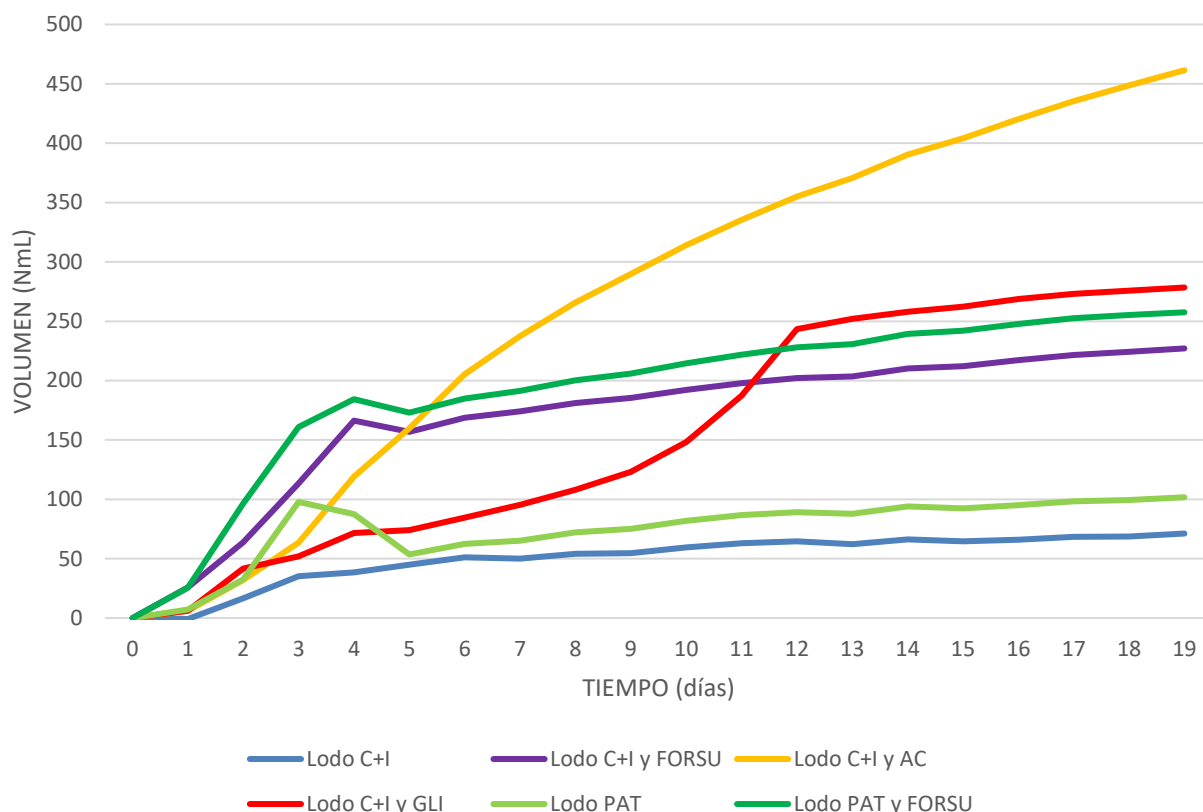


Figura 4-11 Gráfica de volumen de metano por gramo de SV (elaboración propia).

Esta gráfica permite comparar de forma más representativa el comportamiento de los distintos tratamientos, al expresar la producción de metano por gramo de sólido volátil incorporado. Bajo esta normalización, el tratamiento lodo C+I y AC alcanza el mayor valor, con 461 NmL/g SV, confirmando el elevado potencial metanogénico del aceite. En segundo lugar, se sitúa la botella lodo C+I y GLI, con una producción próxima, lo que indica también una alta aptitud de la glicerina como sustrato. A diferencia de la comparación en términos de volumen total, esta representación elimina la influencia de la relación ISR y de la distinta cantidad de materia orgánica añadida en cada reactor, por lo que constituye la base más adecuada para discutir el rendimiento específico de los sustratos. En este sentido, se confirma que el aceite fue el sustrato con mayor producción específica de metano, seguido por la glicerina, mientras que los tratamientos con FORSU presentaron valores inferiores.

4.3 Resultados de la digestión de residuos orgánicos procedentes de buques de la Armada a temperatura termófila (experimento 3)

4.3.1 Volumen acumulado de metano

En la Figura 4-12 se representa la evolución del volumen acumulado de metano (NmL) por día durante los 19 días de funcionamiento, que se corresponden con el TRH fijado para este ensayo, para las seis botellas estudiadas. Es conveniente recordar que este tercer experimento se llevó a cabo en condiciones termófilas (55 °C), a diferencia de los dos anteriores que se condujeron bajo condiciones mesófilas (38 °C).

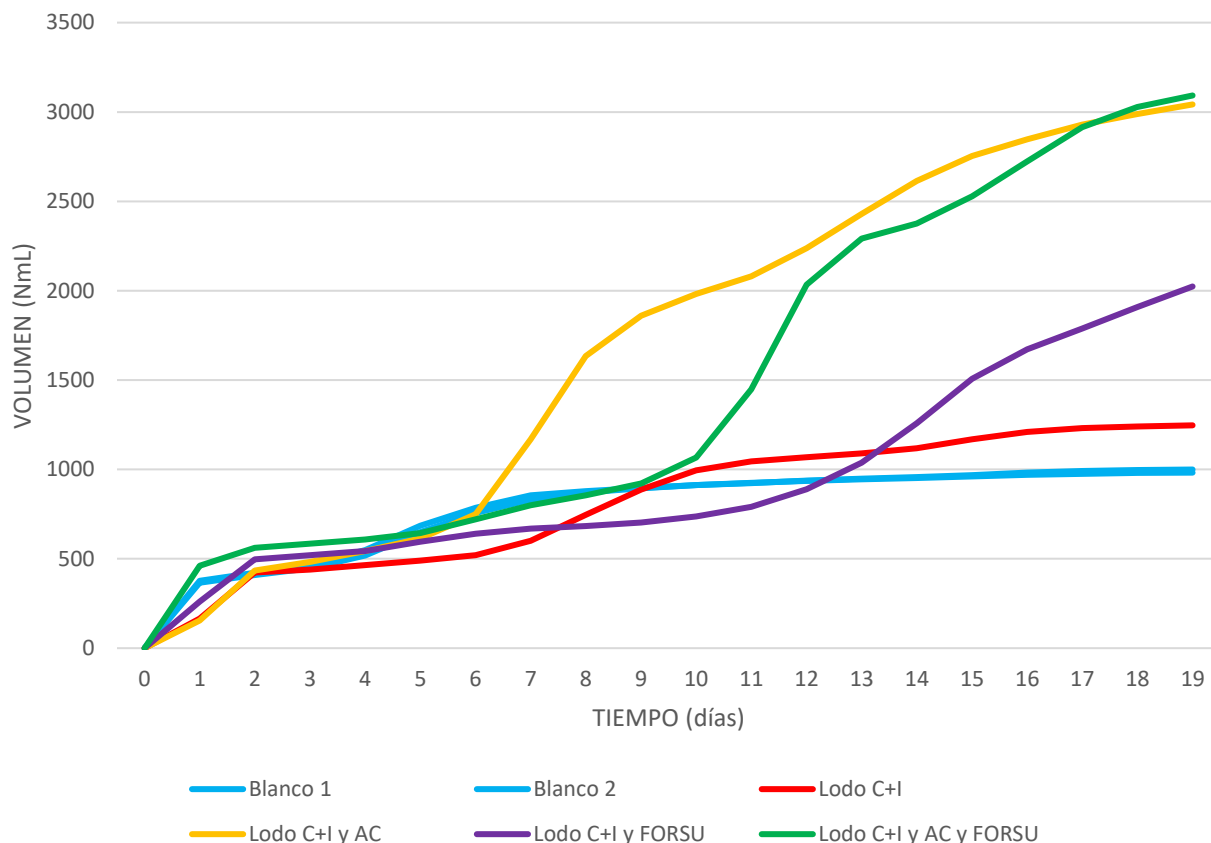


Figura 4-12 Gráfica de volumen acumulado de metano por día (elaboración propia).

Los dos reactores correspondientes a los blancos experimentales (representados en azul) alcanzaron valores finales de 982 y 1 000 NmL. Esta producción se atribuye a la actividad endógena del inóculo, al no haberse añadido en estos casos ningún sustrato externo. En comparación con el experimento 1, en el que los blancos registraron valores comprendidos entre 716 y 742 NmL, en este ensayo se obtuvieron producciones claramente superiores. Este comportamiento podría estar relacionado, por un lado, con el efecto de la operación en condiciones termófilas, que favorece una mayor velocidad de degradación y, por tanto, una mayor producción de metano, y, por otro, con la posible presencia de una mayor fracción de materia orgánica biodegradable remanente en el nuevo inóculo empleado, tal como sugieren los resultados de sólidos volátiles. La evolución de ambas curvas fue prácticamente coincidente durante todo el ensayo, con una rápida producción inicial y una posterior estabilización progresiva, lo que confirma una buena reproducibilidad experimental y valida el empleo de los blancos como referencia para interpretar el comportamiento de los reactores alimentados con sustrato.

El reactor alimentado únicamente con lodo C+I (representado en rojo) muestra una producción acumulada final de 1247 NmL, ligeramente superior a la de los blancos. La curva presenta un incremento moderado durante todo el ensayo, con una fase inicial de crecimiento suave y una tendencia posterior a la estabilización a partir de los días finales. Este comportamiento indica que el lodo por sí solo conserva capacidad de producción de metano, aunque claramente limitada en comparación con los sistemas co-digeridos.

En el caso del reactor con lodo C+I y aceite de cocina usado (representado en naranja), se observa uno de los comportamientos más destacados del ensayo, alcanzándose un volumen acumulado final de 3042 NmL. Tras una fase inicial similar a la del resto de reactores, entre los días 6 y 9 se produce un incremento muy acusado de la producción, seguido de una continuación ascendente más gradual hasta el final del ensayo. Este patrón pone de manifiesto el elevado potencial metanogénico del aceite, cuyo contenido lipídico aporta una fracción orgánica altamente energética. La fuerte aceleración observada a

partir de la primera semana puede asociarse al inicio efectivo de la degradación de los lípidos, una vez superada la fase de adaptación microbiana.

Por su parte, el reactor con lodo C+I y FORSU (representado en lila) alcanza un volumen final de 2024 NmL. Su comportamiento muestra una producción más contenida durante los primeros 12 días, con una fase inicial relativamente lenta, seguida de una aceleración más evidente a partir del día 13. En comparación con el aceite, la FORSU presenta por tanto una respuesta menos intensa y más retardada, aunque claramente superior a la obtenida con el lodo solo. Este comportamiento puede relacionarse con la naturaleza heterogénea de la fracción orgánica, en la que coexistirían compuestos fácilmente biodegradables con otros de hidrólisis más lenta, provocando una producción más escalonada en el tiempo.

El mayor valor del experimento corresponde al reactor con lodo C+I, aceite y FORSU (representado en verde), que alcanza 3092 NmL al día 19, situándose ligeramente por encima del reactor con aceite como único sustrato. La curva muestra una evolución particularmente interesante, con una fase inicial moderada hasta el día 10 y una fuerte aceleración posterior entre los días 11 y 13, manteniéndose después una tendencia ascendente hasta el final del ensayo. Este resultado sugiere un efecto positivo de la co-digestión conjunta, al combinar un sustrato de elevada carga energética como el aceite con otro de composición más variada como la FORSU, favoreciendo una producción acumulada elevada y sostenida.

Cabe destacar que, tras 19 días de digestión, los reactores lodo C+I y AC, lodo C+I y FORSU y lodo C+I, AC y FORSU aún no muestran una estabilización completa, ya que sus curvas mantienen pendiente positiva al final del periodo analizado. Esto indica que todavía conservaban potencial para seguir produciendo metano durante algunos días más.

Todos los valores obtenidos en este experimento, realizado en condiciones termófilas, fueron superiores a los registrados en el experimento 2, desarrollado en condiciones mesófilas, lo que pone de manifiesto el mayor potencial de producción de metano asociado a la operación a mayor temperatura.

4.3.2 Caudal de metano

La evolución del caudal de producción de metano confirma las tendencias observadas previamente en la gráfica de volumen acumulado, y se presenta en la Figura 4-13.

En los reactores con únicamente inóculo (blancos experimentales representados en azul), el caudal alcanza su máximo valor durante el primer día de ensayo, para descender rápidamente en los días siguientes hasta valores muy bajos, próximos a cero. Este comportamiento es coherente con el escaso volumen acumulado final obtenido y refleja únicamente la actividad endógena del inóculo, sin aporte externo de materia orgánica fácilmente biodegradable.

El reactor con lodo C+I presenta un caudal moderado durante la mayor parte del ensayo, con un máximo en torno a los días 8 y 9, tras lo cual desciende progresivamente hasta valores casi nulos al final del periodo. Este perfil explica la producción acumulada limitada observada previamente y confirma que el lodo por sí solo mantiene cierta actividad biológica, aunque claramente inferior a la de los otros sustratos.

En el reactor con lodo C+I y AC se identifican dos picos de caudal claramente diferenciados. El primero aparece de forma temprana, en torno a los días 1 y 2, probablemente como consecuencia de la mayor velocidad cinética asociada a las condiciones termófilas. Posteriormente, tras un descenso del caudal, se observa una reactivación del proceso entre los días 6 y 9, alcanzándose un segundo pico de mayor magnitud. Este comportamiento podría estar relacionado con una acumulación de ácidos que ralentizó temporalmente la producción de metano, antes de reanudarse con mayor intensidad. En conjunto, este perfil explica el elevado volumen acumulado final y confirma la alta capacidad metanogénica del aceite sustrato.

El reactor con lodo C+I y FORSU presenta una evolución más sostenida y gradual. Aunque su producción inicial también es apreciable, el aumento más importante del caudal se desplaza hacia la segunda mitad del ensayo, especialmente entre los días 13 y 16, donde se alcanzan los valores máximos de este tratamiento. Esta distribución más retardada del caudal es coherente con la evolución del volumen acumulado y sugiere una degradación más escalonada de la materia orgánica contenida en la FORSU, dada su mayor complejidad estructural.

Finalmente, el reactor con lodo C+I, aceite y FORSU presenta también un comportamiento parecido al reactor con lodo C+I y FORSU, con un primer pico muy temprano, en torno a los días 1 y 2, y un segundo máximo mucho más acusado alrededor del día 12. Al igual que en el caso anterior, este patrón puede atribuirse a una aceleración inicial de la cinética por efecto de la temperatura, seguida de una posible acumulación temporal de ácidos que ralentizó el proceso durante varios días, hasta su posterior reactivación. La intensidad del segundo pico y el mantenimiento de valores apreciables en la fase final del ensayo explican que este tratamiento alcance el mayor volumen acumulado del experimento.

En esta gráfica se observa claramente que los reactores lodo C+I y AC, lodo C+I y FORSU y lodo C+I, AC y FORSU aún mantienen potencial de producción, al presentar valores de caudal apreciables en los últimos días del ensayo.

Teniendo en cuenta que se debe parar el experimento cuando la variación de los dos últimos días sea menor del 1 %, se ha calculado que las variaciones para los 2 reactores con aceite son un 2 %, y para el reactor lodo C+I y FORSU es de 6 %, siendo este valor bastante superior al 1 % fijado. Sería ideal haber mantenido este último reactor unos días más hasta que la variación se acerque al 1 %. Sin embargo, se quería mantener el tiempo total de 19 días, comparable con los experimentos anteriores y no se disponía de más tiempo si se querían realizar 3 experimentos.

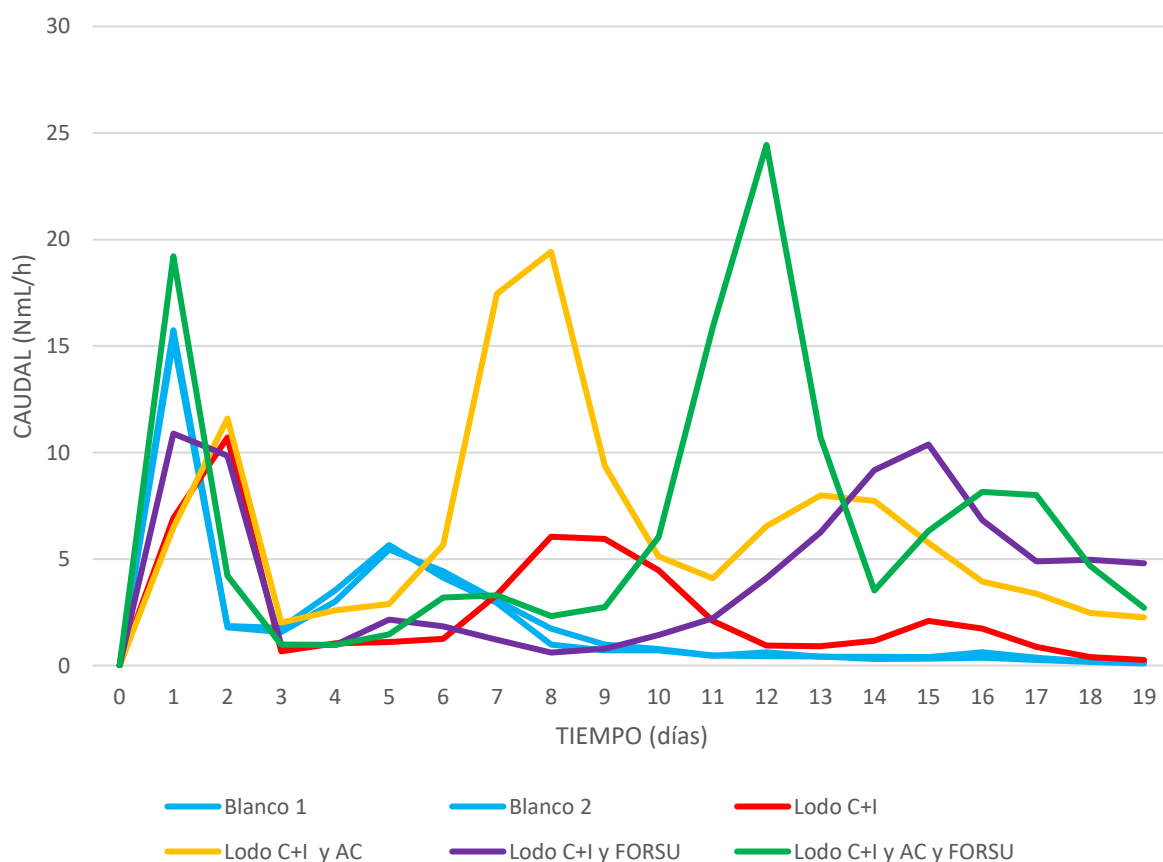


Figura 4-13 Gráfica de caudal de metano por día (elaboración propia).

4.3.3 Producción media total de metano

A continuación, se presenta la Figura 4-14, en la que se recoge el volumen acumulado medio de metano (NmL) alcanzado al final del ensayo para cada tratamiento evaluado. Esta representación en barras permite comparar de forma clara el rendimiento final de los distintos tratamientos.

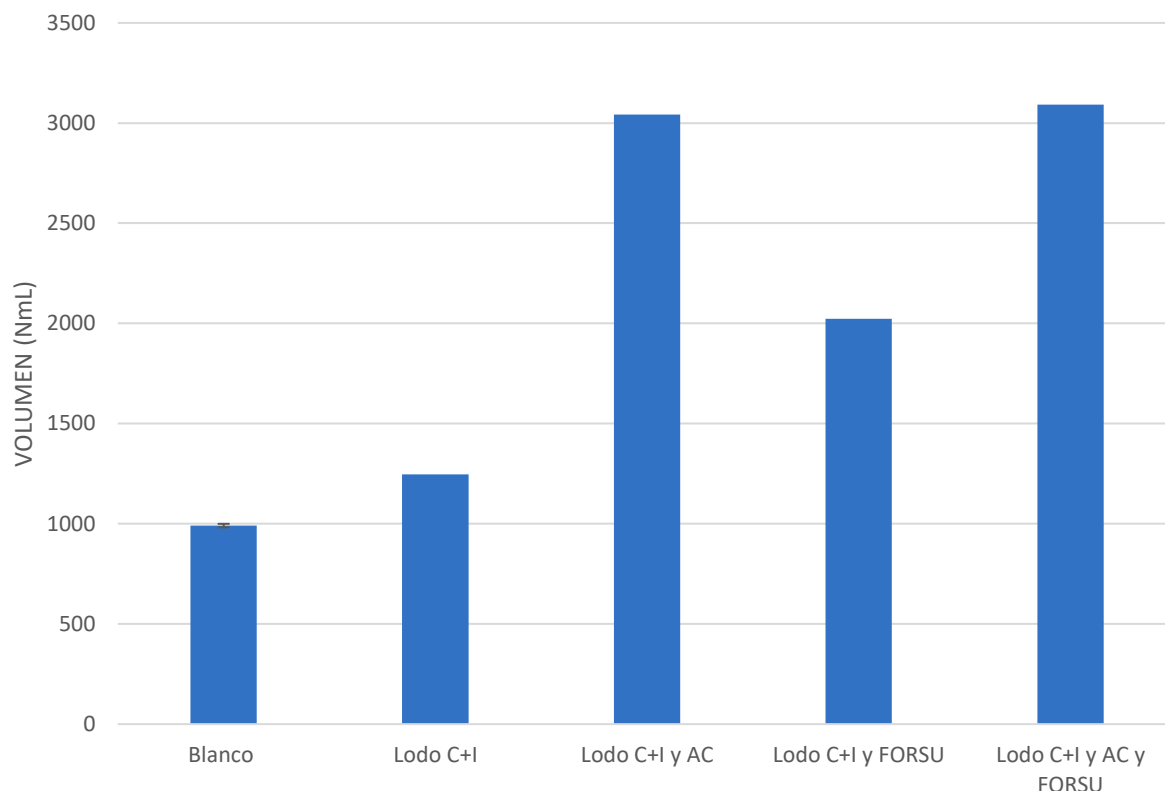


Figura 4-14 Gráfica de producción media total de metano por grupos (elaboración propia).

El único reactor ensayado por duplicado, correspondiente al blanco, presenta un volumen acumulado medio de 990 NmL. Su barra de error muestra una desviación prácticamente nula, lo que confirma una elevada reproducibilidad entre ambas réplicas. El reactor lodo C+I y AC y FORSU ocupa la primera posición, al presentar el valor más elevado, con 3092 NmL.

Estos resultados muestran que la adición de co-sustratos mejora de forma notable la producción final de metano respecto al lodo solo. En particular, los tratamientos que incorporan aceite de cocina usado son los que alcanzan los mayores rendimientos, lo que confirma el elevado potencial metanogénico de este co-sustrato. Además, la combinación conjunta de aceite y FORSU permite obtener el valor más alto del experimento, aunque con una ventaja reducida respecto al tratamiento con aceite como único co-sustrato. Esto sugiere que, bajo las condiciones ensayadas, el aceite fue el factor con mayor peso en la mejora de la producción, mientras que la FORSU aportó un efecto complementario más moderado.

4.3.4 Producción neta corregida por el blanco

A continuación, se aplicó la corrección por blanco a los distintos tratamientos del experimento, cuyo resultado se presenta en la Figura 4-15. De este modo, se obtuvo la producción neta de metano asociada a cada sustrato, permitiendo una comparación más ajustada entre tratamientos.

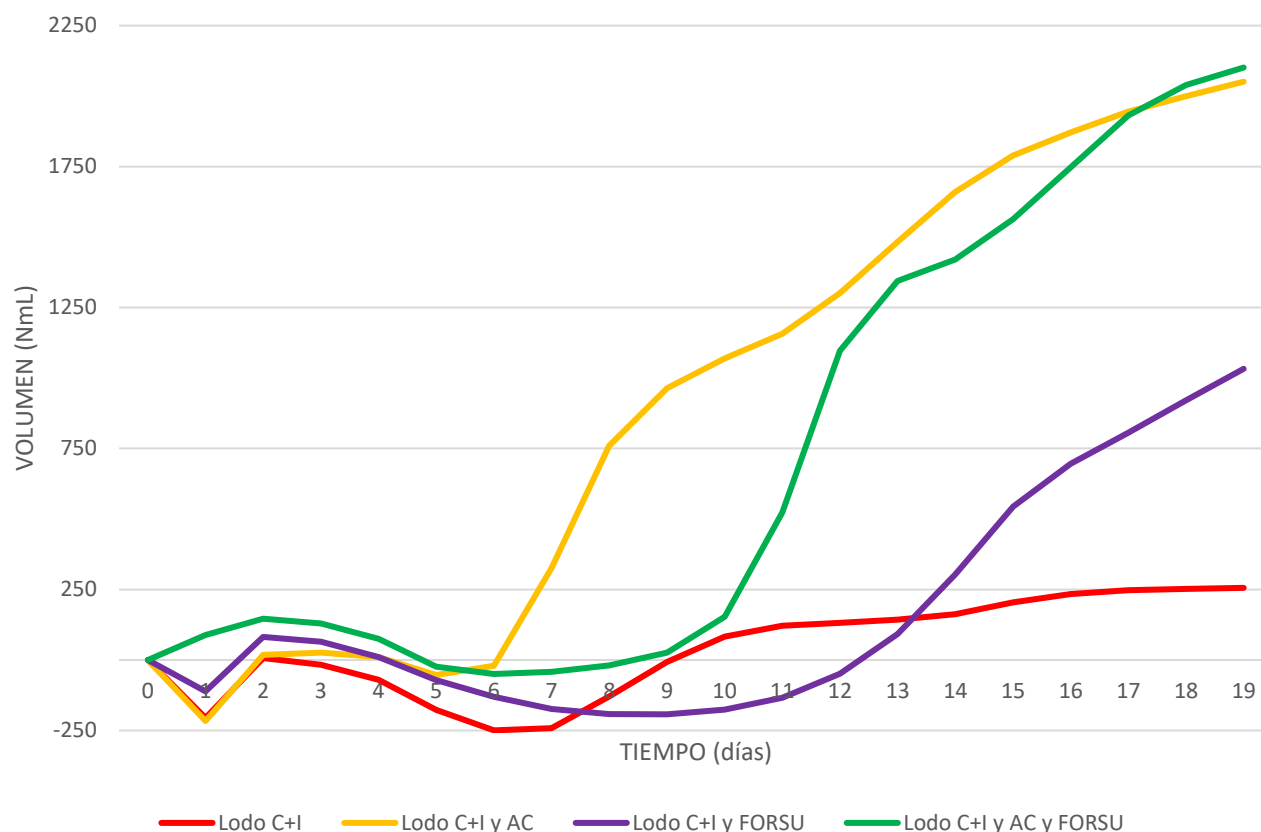


Figura 4-15 Gráfica de volumen acumulado neto corregido por el blanco (elaboración propia).

Tras la corrección por blanco, algunas curvas presentan valores negativos durante los primeros días porque, en ese intervalo, el blanco produjo más metano que los reactores con sustrato, que posiblemente sufrieron una pequeña inhibición. Por tanto, ese tramo negativo no implica consumo de metano, sino que la producción adicional atribuible al sustrato todavía no superaba la actividad del inóculo.

A medida que avanza el ensayo, las curvas vuelven a cortar el eje x, lo que indica el momento en que cada tratamiento empieza a producir más que el blanco. A partir de ese punto, la producción neta pasa a ser positiva y puede compararse con mayor claridad el efecto real de cada co-sustrato.

Como era esperable, se mantienen las posiciones relativas de los reactores en cuanto a producción de metano, correspondiendo el mayor valor al tratamiento con lodo C+I, AC y FORSU, con 2101 NmL, atribuibles exclusivamente a la acción conjunta de ambos co-sustratos.

4.3.5 Producción neta por gramo de sólido volátil del sustrato

La Figura 4-16 muestra la producción de metano referida al gramo de sólido volátil de sustrato. Para su obtención, los valores diarios se normalizaron dividiéndolos entre los gramos totales de sólidos volátiles de sustrato añadidos en cada reactor.

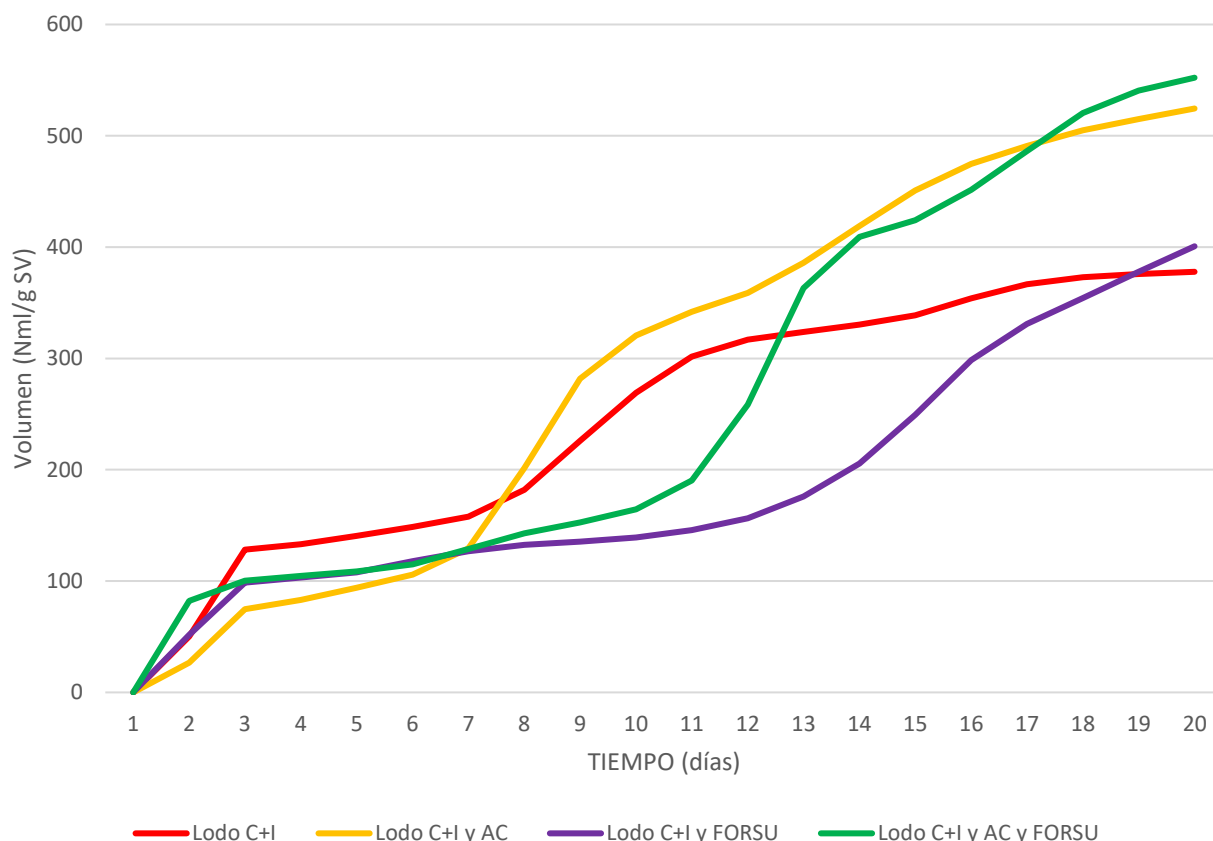


Figura 4-16 Gráfica de volumen de metano por gramo de SV (elaboración propia).

Hay que destacar como valores más elevados los alcanzados por los rectores C+I y AC y FORSU, con 552 NmL/g SV, y lodo C+I y AC, con 524 NmL/g SV al final del ensayo. Ambos tratamientos muestran un rendimiento claramente superior al resto, especialmente en la segunda mitad del experimento, donde sus curvas mantienen un crecimiento más intenso. En tercer lugar, se sitúa lodo C+I y FORSU, con un valor de 400 NmL/g SV, mientras que el tratamiento con lodo C+I presenta el menor rendimiento, con 377 NmL/g SV.

Se observaron resultados superiores en este último experimento, realizado en condiciones termófilas, respecto al anterior desarrollado en régimen mesófilo, lo que pone de manifiesto la idoneidad del funcionamiento termófilo para potenciar la digestión anaerobia. Los reactores lodo C+I, lodo C+I y FORSU, y lodo C+I y AC, aumentaron su producción en condiciones termófilas en un 430, 76 y 14 % respectivamente.

4.4 Resultado de los análisis de alcalinidad

A continuación, se presentan y discuten los valores de alcalinidad total y del ratio AGV/alcalinidad obtenidos experimentalmente en el laboratorio para cada una de las muestras analizadas. Asimismo, se analiza la evolución de este parámetro desde el valor inicial común previo al inicio de la digestión anaerobia hasta los valores medidos al final del experimento. Este análisis permite evaluar la variación de la capacidad tampón del sistema a lo largo del proceso y determinar si la digestión anaerobia se desarrolló en condiciones estables, evitando posibles fenómenos de acidificación asociados a la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV).

4.4.1 Experimento 1

Antes del inicio del proceso de digestión anaerobia, todas las muestras presentaban una alcalinidad inicial de 3 333 mg CaCO₃/L, valor que se sitúa dentro del rango considerado adecuado para mantener

la estabilidad del digestor anaerobio (2 000–5 000 mg CaCO₃/L) [27]. Este nivel inicial proporciona una capacidad tampón suficiente para neutralizar los ácidos grasos volátiles (AGV) generados durante las primeras etapas de la digestión.

Con los valores obtenidos para cada botella al finalizar el experimento, se procedió al tratamiento y análisis de los datos correspondientes. Se calculó la media de los valores obtenidos para cada grupo de botellas réplica del experimento, obteniéndose los resultados que se presentan en la Tabla 4-1:

Muestra	Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /L)	Ratio AGV/AT
Blanco	2 833	0,214
Celulosa	2 600	0,195
Gelatina	4 225	0,201
Aceite	2 706	0,203

Tabla 4-1 Valores de alcalinidad total (AT) y ratio AGV/AT al final del experimento 1 (elaboración propia).

Al finalizar el experimento 1, los valores de alcalinidad total se mantuvieron, en general, dentro de un intervalo compatible con un funcionamiento estable del proceso anaerobio, aunque con diferencias apreciables entre sustratos. El blanco presentó una alcalinidad total de 2 833 mg CaCO₃/L, ligeramente inferior al valor inicial de 3 333 mg CaCO₃/L, lo que indica un consumo moderado de capacidad tampón sin que ello comprometiese la estabilidad del medio. De forma similar, la celulosa y el aceite registraron valores finales de 2 600 y 2 706 mg CaCO₃/L, respectivamente, también por debajo del valor inicial, lo que sugiere una cierta utilización de la alcalinidad disponible para neutralizar los ácidos generados durante la digestión. No obstante, en ambos casos los valores finales permanecieron dentro del rango considerado adecuado, por lo que no se evidencian problemas de acidificación.

La gelatina fue la muestra que presentó el comportamiento más diferenciado, alcanzando una alcalinidad total final de 4 225 mg CaCO₃/L, superior al valor inicial y también al resto de muestras. Este aumento podría relacionarse con una mayor liberación de compuestos nitrogenados durante su degradación, favoreciendo la formación de especies con efecto tampón y reforzando así la capacidad de neutralización [27]. En cualquier caso, este valor continuó dentro del intervalo óptimo de estabilidad del proceso.

En cuanto al ratio AGV/AT, todas las muestras presentaron valores muy similares, comprendidos entre 0,195 y 0,214. Estos resultados se sitúan dentro del intervalo considerado óptimo para la estabilidad del proceso anaerobio (0,05–0,25), lo que indica que la acumulación de ácidos grasos volátiles se mantuvo adecuadamente compensada por la alcalinidad disponible. Por tanto, no se observan indicios de desequilibrio ácido-base ni riesgo de acidificación en ninguna de las muestras analizadas.

4.4.2 Experimento 2

Antes del inicio del proceso de digestión anaerobia, las muestras con lodo C+I y con lodo PAT presentaban una alcalinidad inicial de 3 722 y 3 646 mg CaCO₃/L respectivamente, valores que se encuentra dentro del intervalo habitualmente considerado adecuado para garantizar la estabilidad de los digestores anaerobios (2 000–5 000 mg CaCO₃/L). Este nivel inicial indica que el sistema disponía de una capacidad tampón suficiente para amortiguar la formación de ácidos grasos volátiles (AGV) generados durante las primeras etapas del proceso de digestión, contribuyendo a mantener condiciones favorables para el desarrollo de la actividad metanogénica.

A continuación, se presentan en la Tabla 4-2 los valores de alcalinidad total (AT) y ratio (AGV/AT) obtenidos al finalizar el experimento de digestión anaerobia para las diferentes combinaciones de sustratos analizadas y para las botellas sin réplicas:

Muestra	Alcalinidad total (mg CaCO₃/L)	Ratio AGV/AT
Lodo C+I	3 813	0,238
Lodo C+I y FORSU	3 856	0,251
Lodo C+I y AC	3 638	0,245
Lodo C+I y GLI	3 963	0,274
Lodo PAT	3 525	0,255
Lodo PAT y FORSU	3 825	0,265

Tabla 4-2 Valores de alcalinidad total (AT) y ratio AGV/AT al final del experimento 2 (elaboración propia).

Al finalizar el experimento 2, los valores de alcalinidad total se mantuvieron en todos los casos dentro de un intervalo compatible con la estabilidad del proceso anaerobio, aunque se observaron diferencias entre los grupos que partían de lodo C+I y los que empleaban lodo PAT como sustrato basal. En el caso del lodo C+I, cuya alcalinidad inicial era de 3 722 mg CaCO₃/L, la muestra presentó un valor final de 3 813 mg CaCO₃/L, ligeramente superior a la inicial, lo que indica una conservación adecuada de la capacidad tampón del sistema. De forma similar, la co-digestión con FORSU y con glicerina dio lugar a valores finales de 3 856 y 3 963 mg CaCO₃/L, respectivamente, ambos superiores al valor de partida. Por el contrario, la muestra del lodo C+I y AC registró una alcalinidad final de 3 638 mg CaCO₃/L, ligeramente inferior a la inicial, aunque todavía dentro del rango adecuado para mantener la estabilidad del digestor.

En el grupo de muestras con lodo PAT, que partía de una alcalinidad inicial de 3 646 mg CaCO₃/L, la muestra lodo PAT presentó un valor final de 3 525 mg CaCO₃/L, reflejando un leve descenso de la capacidad tampón. Sin embargo, la muestra lodo PAT y FORSU alcanzó una alcalinidad total de 3 825 mg CaCO₃/L, superior al valor inicial, lo que sugiere una mayor disponibilidad de compuestos con efecto amortiguador durante el proceso. En conjunto, estos resultados indican que el sistema conservó una capacidad tampón suficiente en todas las condiciones estudiadas, sin descensos acusados que apunten a una pérdida de estabilidad.

En cuanto al ratio AGV/AT, los valores obtenidos se situaron entre 0,238 y 0,274. Las muestras C+I y C+I y AC, con valores de 0,238 y 0,245, respectivamente, se mantuvieron dentro del intervalo óptimo de estabilidad del proceso (0,05–0,25). Por su parte, las muestras lodo C+I y FORSU, lodo C+I y GLI, lodo PAT y lodo PAT y FORSU presentaron valores ligeramente superiores a dicho intervalo, con 0,251, 0,274, 0,255 y 0,265, respectivamente. No obstante, en ningún caso se alcanzó el valor límite de 0,3, a partir del cual podrían comenzar a advertirse posibles desequilibrios por acumulación de ácidos grasos volátiles [16]. En consecuencia, aunque algunas muestras mostraron un margen de estabilidad más ajustado que en el experimento 1, el proceso pudo considerarse globalmente estable y sin indicios de acidificación severa.

4.4.3 Experimento 3

Antes de comenzar el proceso de digestión anaerobia, todas las muestras registraban una alcalinidad inicial de 3 503 mg CaCO₃/L. Este valor se encuentra dentro del intervalo considerado adecuado para garantizar la estabilidad del digestor anaerobio (2 000–5 000 mg CaCO₃/L). Asimismo, este nivel de alcalinidad inicial aporta una capacidad tampón suficiente para amortiguar los ácidos grasos volátiles

(AGV) generados en las etapas iniciales del proceso. En la Tabla 4-3 se pueden observar los valores de alcalinidad total (AT) y ratio (AGV/AT) obtenidos al finalizar el experimento 3.

Muestra	Alcalinidad total, AT (mg CaCO ₃ /L)	Ratio AGV/AT
Blanco	2 875	0,228
Lodo C+I	3 250	0,250
Lodo C+I y AC	3 250	0,288
Lodo C+I y FORSU	3 250	0,192
Lodo C+I y AC y FORSU	3 870	0,274

Tabla 4-3 Valores de alcalinidad total (AT) y ratio AGV/AT al final del experimento 3 (elaboración propia).

Al finalizar el experimento 3, los valores de alcalinidad total mostraron un comportamiento diferente según la muestra analizada, aunque en todos los casos se mantuvieron dentro de un intervalo compatible con la estabilidad del proceso anaerobio. Partiendo de una alcalinidad inicial común de 3 503 mg CaCO₃/L, el blanco presentó un valor final de 2 875 mg CaCO₃/L, lo que refleja un descenso apreciable de la capacidad tampón respecto al inicio del ensayo. De forma similar, las muestras lodo C+I, lodo C+I y AC y lodo C+I y FORSU registraron una alcalinidad final de 3 250 mg CaCO₃/L, también inferior al valor inicial, aunque todavía dentro del rango considerado adecuado para el funcionamiento estable del digestor. Por el contrario, la mezcla lodo C+I y AC y FORSU alcanzó una alcalinidad total final de 3 870 mg CaCO₃/L, superior a la inicial, lo que indica una mayor capacidad de amortiguación del sistema en esta condición.

En conjunto, estos resultados muestran que, aunque en varias muestras se produjo una reducción de la alcalinidad respecto al valor de partida, el sistema conservó una capacidad tampón suficiente para neutralizar los ácidos generados durante la digestión. La muestra con aceite y FORSU fue la que presentó el comportamiento más favorable desde este punto de vista, al mantener un nivel de alcalinidad incluso superior a la inicial.

En cuanto al ratio AGV/AT, los valores obtenidos oscilaron entre 0,192 y 0,288. La muestra lodo C+I y FORSU presentó el valor más bajo, 0,192, mientras que las mezclas lodo C+I y AC y lodo C+I, AC y FORSU registraron los valores más elevados, 0,288 y 0,274, respectivamente. En comparación con el experimento 2, se aprecia un ligero aumento de este ratio en condiciones termófilas, lo que apunta a una mayor acumulación de ácidos grasos volátiles. No obstante, todos los valores se mantuvieron por debajo de 0,3, por lo que no se observan indicios de acidificación severa y puede considerarse que el experimento 3 se desarrolló en condiciones estables.

4.5 Resultados de los cálculos teóricos del potencial energético de las muestras

4.5.1 Producción de metano y biogás

Los resultados obtenidos del análisis elemental de las distintas muestras analizadas se recogen en la Tabla 4-4:

Muestra	Descripción	N (%)	C (%)	H (%)	O (%)	Concentración (g SV/L)
Gelatina	Restos de alimentos	18,36	48,32	6,89	26,43	100 % SV
Lodo Patiño	Lodo	7,75	40,99	6,27	44,98	3,2
Lodo Castilla	Lodo	4,90	42,60	6,50	45,99	1,26
Lodo C+I	Lodo	6,78	42,74	6,36	44,12	3,2
FORSU	Restos de alimentos	4,13	54,08	8,22	33,57	193
Aceite	Restos de alimentos	0	76,00	12,09	11,91	100 % SV
Celulosa	Origen vegetal	0	44,45	6,21	49,34	100 % SV

Tabla 4-4 Composición elemental y concentración de sólidos volátiles de las muestras analizadas (elaboración propia).

A continuación, se recogen en la Tabla 4-5 los resultados obtenidos del cálculo teórico de producción de metano y de biogás para cada una de las muestras analizadas. Estos cálculos se realizaron siguiendo el mismo procedimiento de desarrollo expuesto previamente para la gelatina.

Muestra	BMP (mL CH ₄ /g SV)	Biogás (mL/ g SV)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	Biogás (mL/L muestra)	Biogás (mL/kg muestra)
Gelatina	440	902	48,8	51,2	-	902 000
Lodo Patiño	354	767	46,1	53,9	2 454	-
Lodo Castilla	388	795	48,8	51,2	1 002	-
Lodo C+I	380	798	47,6	52,4	2554	-
FORSU	591	1010	58,6	41,4	-	194 930
Aceite	1005	1 421	70,7	29,3	-	1 421 000
Celulosa	415	830	50	50	-	830 000

Tabla 4-5 Potencial teórico de metano y biogás de las muestras analizadas (elaboración propia).

El aceite presenta el mayor potencial teórico de metano y biogás, con 1005 mL CH₄/g SV y 1 421 mL biogás/g SV, además del mayor contenido de metano en el biogás (70,7 %). La FORSU muestra también valores altos, con 591 mL CH₄/g SV y 1 010 mL biogás/g SV, situándose por encima del resto de muestras no grasas. La gelatina presenta un comportamiento intermedio (440 mL CH₄/g SV y 902 mL biogás/g SV), mientras que los lodos registran los valores más bajos, entre 354 y 380 mL CH₄/g SV y entre 767 y 798 mL biogás/g SV. En conjunto, los resultados indican que los sustratos más reducidos, como el aceite, poseen un mayor potencial metanogénico, mientras que los lodos presentan un aprovechamiento energético teórico más limitado.

4.5.2 Producción de energía

Siguiendo el procedimiento indicado en el apartado 3.5.4, se recogen en la Tabla 4-6 los valores obtenidos del cálculo del poder calorífico superior para cada una de las muestras analizadas:

Muestra	PCS (MJ/kg SV)
Gelatina	21,62
Lodo Patiño	14,89
Lodo Castilla	15,59
Lodo C+I	15,77
FORSU	24,21
Aceite	41,15
Celulosa	15,14

Tabla 4-6 Poder calorífico superior teórico (PCS) de las muestras analizadas (elaboración propia).

El aceite presenta el mayor poder calorífico superior, con 41,15 MJ/kg SV, muy por encima del resto de muestras, lo que confirma su elevado contenido energético. A continuación, se sitúa la FORSU, con 24,21 MJ/kg SV, seguida de la gelatina, con 21,62 MJ/kg SV. Por el contrario, los lodos muestran los valores más bajos, con 15,77 MJ/kg SV para C+I, 15,59 MJ/kg SV para el Castilla y 14,89 MJ/kg SV para el Patiño. Estos resultados muestran que el aceite es la muestra con mayor capacidad de aportar energía, en cambio, los lodos tienen un potencial energético menor, por lo que su aprovechamiento térmico resulta más limitado en comparación con las demás muestras.

4.6 Potencial de producción de biogás en buques de la Armada

Se pretende estimar el potencial de producción de biogás en buques de la Armada y su PCS a partir de los sustratos orgánicos que se producen diariamente durante la navegación. Para ello, se consideran los principales residuos generados a bordo que presentan interés para su valorización mediante digestión anaerobia: la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) procedente del comedor, los lodos generados en los sistemas de tratamiento de aguas residuales y el aceite de cocina usado. Estos valores han sido consultados a Alféreces de navío pertenecientes a los buques citados, quienes han facilitado la información relativa a la generación de estos residuos a bordo. A partir de estos sustratos se evaluará su capacidad de generación de biogás y su potencial energético.

4.6.1 Potencial de producción de la FORSU

Se presentan en la Tabla 4-7 los datos correspondientes a la producción diaria de residuos orgánicos procedentes del comedor para distintos buques de la Armada (Cantabria, Méndez Núñez y Juan Carlos I) [42] [43] [44]. Aunque se recopilaban datos de generación de residuos orgánicos de otros buques de la Armada, en este trabajo se seleccionaron finalmente estos tres por presentar valores más coherentes, representativos y próximos entre sí, lo que permitió realizar una comparación más consistente y realista.

Buque	Residuos totales (kg/día)	Dotación (personas)	Residuos por persona (kg/persona·día)
Cantabria	246	164	1,5
Méndez Núñez	300	201	1,5
Juan Carlos I	1800	1200	1,5

Tabla 4-7 Cantidad de la FORSU generada en buques de la Armada (elaboración propia).

Se supone que, a bordo de los buques de la Armada, los restos de la fracción orgánica se trituran y se mezclan con una cantidad aproximada de agua añadida igual a como se hizo en el experimento. Bajo esta consideración, se asume que la concentración de sólidos volátiles de la FORSU se mantiene constante.

El procedimiento seguido para el cálculo del potencial de valorización de la FORSU se describe a continuación:

- 1) Se parte de 1,5 kg producidos al día por persona. Conociendo la concentración de sólidos volátiles por kilogramo de FORSU, así como la cantidad de biogás generada por gramo de sólido volátil, es posible estimar el potencial de producción de biogás asociado a este sustrato:

$$1,5 \frac{\text{kg FORSU}}{\text{persona} \cdot \text{día}} \cdot \frac{193 \text{ g SV}}{1 \text{ kg FORSU}} \cdot \frac{1\,010 \text{ mL biogás}}{1 \text{ g SV}} = 292\,395 \frac{\text{mL biogás}}{\text{persona} \cdot \text{día}} = 292,4 \frac{\text{L biogás}}{\text{persona} \cdot \text{día}}$$

- 2) Asimismo, se calcula el poder calorífico superior correspondiente a la FORSU, conociendo la energía producida por kilogramo de sólidos volátiles de los cálculos anteriores:

$$1,5 \frac{\text{kg FORSU}}{\text{persona} \cdot \text{día}} \cdot \frac{193 \text{ g SV}}{1 \text{ kg FORSU}} \cdot \frac{1 \text{ kg SV}}{1000 \text{ g SV}} \cdot \frac{24,21 \text{ MJ}}{1 \text{ kg SV}} = 7 \frac{\text{MJ}}{\text{persona} \cdot \text{día}}$$

A continuación, se muestra en la Tabla 4-8 el potencial de producción de biogás y el poder calorífico asociado para los diferentes buques de la Armada seleccionados, a partir de los residuos orgánicos del comedor generados diariamente a bordo:

Buque	Residuos por persona (kg/persona·día)	Biogás (L/día)	PCS (MJ/día)
Cantabria	1,5	47 954	1 148
Méndez Núñez	1,5	58 772	1 400
Juan Carlos I	1,5	350 880	8 400

Tabla 4-8 Potencial de producción de la FORSU (elaboración propia).

Los resultados obtenidos para la FORSU muestran un potencial de producción de biogás y de aprovechamiento energético relevante en los tres buques estudiados. Los valores aumentan desde 47 954 L/día y 1 148 MJ/día en el Cantabria hasta 350 880 L/día y 8 400 MJ/día en el Juan Carlos I, en relación con la mayor cantidad total de residuo generada en los buques de mayor dotación. Esto confirma que la FORSU puede considerarse una corriente de interés para su valorización mediante digestión anaerobia, especialmente en unidades navales de gran capacidad.

4.6.2 Potencial de producción del aceite

Se recogen en la Tabla 4-9 los datos relativos a la generación diaria de aceite de cocina usado para los buques de la Armada citados anteriormente. Estos valores permiten estimar la cantidad de este sustrato disponible a bordo y, a partir de ello, evaluar su potencial de valorización mediante digestión anaerobia:

Buque	Residuos totales (L/día)	Dotación (personas)	Residuos por persona (L/persona·día)
Cantabria	5,24	164	0,032
Méndez Núñez	6	201	0,030
Juan Carlos I	33	1200	0,028

Tabla 4-9 Cantidad de aceite generado en buques de la Armada (elaboración propia).

El procedimiento seguido para el cálculo del potencial de valorización del aceite se describe a continuación:

- 1) Se parte de un valor medio de 0,03 L de aceite de cocina usado por persona y día, que se toma como base para la realización de los cálculos. A partir de este valor y de los resultados obtenidos en los cálculos previos, se estima el potencial de producción de biogás asociado a este sustrato:

$$0,03 \frac{\text{L aceite}}{\text{persona} \cdot \text{día}} \cdot \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} \cdot \frac{0,92 \text{ g}}{1 \text{ mL}} \cdot \frac{1 \text{ 421 L biogás}}{1000 \text{ g}} = 39,2 \frac{\text{L biogás}}{\text{persona} \cdot \text{día}}$$

- 2) Asimismo, se calcula el poder calorífico superior del aceite a partir de los resultados obtenidos previamente, lo que permite estimar su potencial energético:

$$0,03 \frac{\text{L aceite}}{\text{persona} \cdot \text{día}} \cdot \frac{1 \text{ 000 mL}}{1 \text{ L}} \cdot \frac{0,92 \text{ g}}{1 \text{ mL}} \cdot \frac{41,15 \text{ MJ}}{1000 \text{ g}} = 1,14 \frac{\text{MJ}}{\text{persona} \cdot \text{día}}$$

A continuación, en la Tabla 4-10 se puede visualizar el potencial de producción de biogás y el poder calorífico asociado para diferentes buques de la Armada, a partir del aceite de cocina generado diariamente a bordo.

Buque	Residuos por persona (L/persona·día)	Biogás (L/día)	PCS (MJ/día)
Cantabria	0,03	6 429	186
Méndez Núñez	0,03	7 879	228
Juan Carlos I	0,03	47 040	1 368

Tabla 4-10 Potencial de producción del aceite (elaboración propia).

En el caso del aceite usado, los valores de producción de biogás y PCS son inferiores a los de la FORSU, aunque la diferencia no es tan acusada como cabría esperar a partir de la cantidad de residuo generada. Así, pese a producirse en volúmenes mucho menores a bordo, el aceite alcanza valores energéticos relativamente próximos, lo que corrobora su elevado potencial de valorización energética mediante digestión anaerobia. Además, al igual que ocurría con la FORSU, los mayores valores se obtienen en el Juan Carlos I por su mayor dotación y generación total de residuos.

4.6.3 Potencial de producción del lodo

Se presentan en la Tabla 4-11 la cantidad de aguas negras generadas en los buques de la Armada [45], con el objetivo de estimar posteriormente su potencial de valorización, de forma análoga a lo realizado para los sustratos anteriores:

Buque	Residuos totales (L/día)	Tripulación (personas)	AN (L/persona·día)
Cantabria	4 500	180	25
Méndez Núñez	5 750	201	28
Juan Carlos I	30 000	1 200	25

Tabla 4-11 Cantidad de aguas negras generada en buques de la Armada (elaboración propia).

El procedimiento seguido para el cálculo del potencial de valorización del lodo se describe a continuación:

- 1) Para el cálculo del potencial de valorización de los lodos se emplearán las muestras obtenidas de los buques Castilla, Patiño e I+C. Con el fin de disponer de un valor representativo, se realizan las medias de la cantidad de sólidos volátiles por litro de lodo, de la cantidad de producción de biogás y de la cantidad de energía generada de cada lodo, dado que los valores obtenidos para las distintas muestras presentan magnitudes muy similares debido a su naturaleza y origen común.
- 2) Como se observa en la tabla, se toma como base de cálculo una generación de 25 L de aguas negras por persona y día. Para estimar la cantidad de lodos producidos a partir de este volumen, se considera de forma aproximada que el 24 % de las aguas negras se transforma en lodos [31]. Se utilizan los datos calculados previamente de conversión a biogás a partir de las muestras de lodos:

$$25 \frac{\text{L AN}}{\text{persona} \cdot \text{día}} \cdot \frac{0,24 \text{ L lodos}}{1 \text{ L AN}} \cdot \frac{2\,003 \text{ mL biogás}}{1 \text{ L lodos}} \cdot \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} = 12 \frac{\text{L biogás}}{\text{persona} \cdot \text{día}}$$

- 3) De igual manera que para los dos sustratos anteriores, se toman como referencia los resultados de producción energética obtenidos a partir de los lodos analizados para calcular el potencial energético asociado:

$$25 \frac{\text{L AN}}{\text{persona} \cdot \text{día}} \cdot \frac{0,24 \text{ L lodos}}{1 \text{ L AN}} \cdot \frac{2,5 \text{ g SV}}{1 \text{ L lodos}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1\,000 \text{ g}} \cdot \frac{15,41 \text{ MJ}}{1 \text{ kg SV}} = 0,24 \frac{\text{MJ}}{\text{persona} \cdot \text{día}}$$

En la Tabla 4-12 se puede observar el potencial de producción de biogás y el poder calorífico asociado para los buques de la Armada, a partir de las aguas negras generadas diariamente a bordo:

Buque	AN (L/persona·día)	Biogás (L/día)	PCS (MJ/día)
Cantabria	25	1 968	43
Méndez Núñez	25	2 412	55
Juan Carlos I	25	14 400	288

Tabla 4-12 Potencial de producción de las aguas negras (elaboración propia).

En el caso de los lodos, aunque se generan en cantidades elevadas a bordo, su producción estimada de biogás y su PCS asociado son claramente inferiores a los obtenidos para la FORSU y el aceite. Esto indica que, de forma individual, su potencial energético es más limitado. No obstante, su interés sigue siendo notable, ya que constituyen el sustrato base del proceso y resultan necesarios para formular mezclas de codigestión más equilibradas y favorables para la digestión anaerobia.

4.6.4 Potencial de producción del conjunto de sustratos

Finalmente, se procede a sumar los resultados de producción de biogás y de energía obtenidos para cada uno de los tres sustratos en cada buque, con el objetivo de determinar la generación total conjunta asociada al conjunto de residuos orgánicos producidos a bordo. Una vez realizado el sumatorio de los valores obtenidos para cada tipo de residuo orgánico generado en cada buque, se presenta en la Tabla 4-13 el potencial de producción de biogás total y en la Tabla 4-14 el poder calorífico asociado correspondiente a cada buque:

Buque	FORSU (L/día)	Aceite (L/día)	AN (L/día)	Biogás (L/día)
Cantabria	47 954	6 429	1 968	56 351
Méndez Núñez	58 772	7 879	2 412	69 063
Juan Carlos	350 880	47 040	14 400	412 320

Tabla 4-13 Potencial de producción de biogás en buques de la Armada (elaboración propia).

Buque	FORSU (MJ/día)	Aceite (MJ/día)	AN (MJ/día)	PCS (MJ/día)
Cantabria	1 148	186	43	1 377
Méndez Núñez	1 400	228	55	1 683
Juan Carlos I	8 400	1 368	288	10 056

Tabla 4-14 Poder calorífico del biogás en buques de la Armada (elaboración propia).

De la comparación de ambas tablas se deduce que la FORSU es la principal responsable del potencial total de producción de biogás y del PCS en los tres buques estudiados. El aceite, pese a generarse en cantidades mucho menores, presenta una aportación energética significativa en relación con su volumen, mientras que las aguas negras muestran la contribución más baja. En conjunto, se estimaron producciones totales de 56 351 L/día de biogás en el Cantabria, 69 063 L/día en la Méndez Núñez y 412 320 L/día en el Juan Carlos I, con poderes caloríficos asociados de 1377 MJ/día, 1683 MJ/día y 10 056 MJ/día, respectivamente.

4.7 Comparación entre valores experimentales, teóricos y bibliográficos

Con el fin de integrar los resultados obtenidos en los ensayos experimentales con las estimaciones teóricas derivadas del análisis elemental y con los valores esperados según la bibliografía, se presenta a continuación una comparación específica para cada uno de los experimentos realizados. Esta organización permite interpretar los resultados en función de la naturaleza de los sustratos estudiados y de las condiciones de operación empleadas en cada ensayo.

4.7.1 Comparación correspondiente al experimento 1

En el experimento 1 se evaluó el comportamiento de sustratos representativos ricos en carbohidratos, proteínas y grasas, concretamente celulosa, gelatina y aceite de cocina usado, y bajo condiciones mesófilas. En la Tabla 4-15 se comparan los valores experimentales obtenidos en los ensayos BMP con los valores teóricos calculados y los esperados según la bibliografía para cada uno de estos sustratos.

Sustrato	BMP experimental (mL CH ₄ /g SV)	BMP teórico (mL CH ₄ /g SV)	Valor bibliográfico esperado (mL CH ₄ /g SV)
Celulosa	365	415	450 [4]
Gelatina	356	440	420 [22]
Aceite	368	1 005	1000 [4]

Tabla 4-15 Comparación entre el BMP experimental, el BMP teórico y el valor bibliográfico esperado para los sustratos del experimento 1 (elaboración propia).

Cabe destacar que, debido al error experimental ya señalado en el experimento 1, el valor obtenido para el aceite debe interpretarse con cierta cautela, ya que previsiblemente su rendimiento experimental real habría sido superior al registrado. No obstante, en conjunto se observa una concordancia general entre los valores experimentales, teóricos y bibliográficos para los distintos sustratos analizados, destacando el aceite como el sustrato con mayor potencial metanogénico.

4.7.2 Comparación correspondiente al experimento 2

El experimento 2 se centró en la digestión anaerobia mesófila de residuos orgánicos procedentes de buques de la Armada, incluyendo lodos, fracción orgánica de residuos de comedor, aceite de cocina usado y distintas mezclas de codigestión. En la Tabla 4-16 se presenta una comparación entre los valores experimentales obtenidos y las estimaciones teóricas por sustrato.

Se observa que los lodos son el sustrato que presenta una mayor diferencia entre el valor experimental y el teórico, ya que el resultado obtenido en el ensayo queda bastante por debajo del esperado. Esta diferencia puede deberse a que el valor teórico representa un potencial máximo ideal, mientras que experimentalmente no toda la materia orgánica del lodo llega a transformarse en metano. En estos sustratos, parte de la fracción orgánica puede estar ya parcialmente degradada, ser poco biodegradable o encontrarse asociada a compuestos refractarios e inertes. Además, la hidrólisis suele actuar como etapa limitante y puede existir cierto efecto inhibitorio derivado de la propia composición del lodo, lo que reduce el rendimiento real del proceso. En cambio, en los demás sustratos los valores experimentales se acercan más a los teóricos, ya que es necesario tener en cuenta el potencial de producción de cada co-sustrato, generándose resultados experimentales lógicos. Se mantiene el aceite como el sustrato de mayor interés.

Sustrato	BMP experimental (mL CH ₄ /g SV)	BMP teórico Lodo (mL CH ₄ /g SV)	BMP teórico co-sustrato (mL CH ₄ /g SV)	Valor bibliográfico esperado (mL CH ₄ /g SV)
Lodo C+I	71	380	-	-
Lodo C+I y FORSU	227	380	591 (FORSU)	400 (FORSU) [46]
Lodo C+I y AC	461	380	1 005 (AC)	-
Lodo C+I y GLI	406	380	-	290-400 (GLI) [20]
Lodo PAT	131	354	-	-
Lodo PAT y FORSU	257	354	591 (FORSU)	400 (FORSU) [46]

Tabla 4-16 Comparación entre el BMP experimental, el BMP teórico y el valor bibliográfico esperado para los sustratos del experimento 2 (elaboración propia).

Se observa que los lodos son el sustrato que presenta una mayor diferencia entre el valor experimental y el teórico, ya que el resultado obtenido en el ensayo queda bastante por debajo del esperado. Esta diferencia puede deberse a que el valor teórico representa un potencial máximo ideal, mientras que experimentalmente no toda la materia orgánica del lodo llega a transformarse en metano. En estos sustratos, parte de la fracción orgánica puede estar ya parcialmente degradada, ser poco biodegradable o encontrarse asociada a compuestos refractarios e inertes. Además, la hidrólisis suele actuar como etapa limitante y puede existir cierto efecto inhibitorio derivado de la propia composición del lodo, lo que reduce el rendimiento real del proceso. En cambio, en los demás sustratos los valores experimentales se acercan más a los teóricos, ya que es necesario tener en cuenta el potencial de producción de cada co-sustrato, generándose resultados experimentales lógicos. Se mantiene el aceite como el sustrato de mayor interés.

4.7.3 Comparación correspondiente al experimento 3

El experimento 3 se desarrolló en condiciones termófilas, manteniendo como sustratos la mezcla de lodos C+I, el aceite de cocina usado y la fracción orgánica de residuos de comedor. La Tabla 4-17 recoge la comparación entre los valores experimentales obtenidos en estas condiciones y los correspondientes valores teóricos, con el fin de evaluar la influencia del régimen térmico sobre el rendimiento alcanzado.

Sustrato	BMP experimental (mL CH ₄ /g SV)	BMP teórico Lodo (mL CH ₄ /g SV)	BMP teórico co- sustrato (mL CH ₄ /g SV)
Lodo C+I	377	380	-
Lodo C+I y AC	524	380	1 005 (AC)
Lodo C+I y FORSU	400	380	591 (FORSU)
Lodo C+I y AC y FORSU	552	380	1 005 (AC) y 591 (FORSU)

Tabla 4-17 Comparación entre el BMP experimental, el BMP teórico y el valor bibliográfico esperado para los sustratos del experimento 3 (elaboración propia).

Se observa que el régimen termófilo permitió superar todos los valores alcanzados en régimen mesófilo, debido a la mayor velocidad de degradación de la materia orgánica y al consiguiente aumento del potencial metanogénico. Por ejemplo, se consiguió pasar de los 71 mL CH₄/g SV del Lodo C+I en el experimento 2 a los 377 mL CH₄/g SV en el experimento 3, y de la misma manera, de los 461 mL CH₄/g SV del Lodo C+I y AC a los 524 mL CH₄/g SV. Sin embargo, esta mejora del rendimiento podría ocasionar una pérdida de estabilidad del proceso, al tratarse de un régimen más sensible a desequilibrios operativos, aunque no fue el caso.

La codigestión permitió mejorar claramente todos los resultados. En el experimento 2, el lodo C+I pasó de 71 mL CH₄/g SV en solitario a 227 mL CH₄/g SV con FORSU, 461 mL CH₄/g SV con aceite y 406 mL CH₄/g SV con glicerina. Del mismo modo, el lodo PAT pasó de 131 mL CH₄/g SV a 257 mL CH₄/g SV al mezclarse con FORSU. En el experimento 3, se pasó de 377 mL CH₄/g SV en solitario hasta una producción de 552 mL CH₄/g SV para la codigestión de lodo, aceite y FORSU, siendo la mayor producción experimental.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

En relación con los objetivos específicos planteados al inicio este Trabajo Fin de Grado, puede afirmarse que todos ellos fueron alcanzados de forma satisfactoria. En primer lugar, se estudiaron diversas mezclas de codigestión y distintos regímenes de temperatura, lo que permitió identificar las configuraciones más favorables dentro de las condiciones analizadas. En segundo lugar, se determinó experimentalmente el potencial de producción de metano de distintos residuos orgánicos generados a bordo mediante ensayos de digestión anaerobia en laboratorio. En tercer lugar, se determinó el potencial teórico de los residuos a partir de su análisis elemental, calculando la producción teórica de biogás y el poder calorífico asociado para diferentes buques de la Armada Española. Por último, se analizó la estabilidad de los reactores mediante la determinación de la alcalinidad y de la relación AGV/AT.

A partir de los resultados obtenidos a lo largo de este Trabajo Fin de Grado, pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- La combinación de la estimación teórica, basada en el análisis elemental de las muestras, y de la validación experimental mediante ensayos BMP permitió obtener una evaluación más completa del potencial de producción de metano de los residuos orgánicos generados a bordo de distintos buques de la Armada Española.
- El aceite de cocina usado se confirmó como el sustrato de mayor interés, tanto desde el punto de vista teórico como experimental, al presentar los valores más elevados de producción de metano entre todas las muestras estudiadas.
- Los tres lodos analizados presentaron el menor potencial metanogénico del conjunto de sustratos estudiados, tanto en la estimación teórica como en los ensayos experimentales, lo que limita su aprovechamiento energético cuando se consideran de forma individual.
- La codigestión permitió mejorar claramente los resultados obtenidos con los lodos ensayados por separado, observándose en todos los experimentos una mejora del rendimiento al combinarlos con otros sustratos.

- El régimen termófilo permitió superar los valores obtenidos en condiciones mesófilas, lo que indica que, en las condiciones ensayadas, esta temperatura favoreció el rendimiento del proceso.
- Los análisis de alcalinidad y del ratio AGV/AT confirmaron un funcionamiento globalmente estable de los reactores a lo largo de los experimentos.
- Mediante la estimación teórica de la producción de biogás y de su poder calorífico asociado, se obtuvieron valores relevantes para los buques Cantabria, Méndez Núñez y Juan Carlos I, lo que pone de manifiesto el interés energético de los residuos generados a bordo.
- En conjunto, los resultados obtenidos muestran que los residuos orgánicos generados a bordo presentan un potencial real de valorización energética y que la digestión anaerobia constituye una alternativa de interés para el entorno naval. No obstante, su aplicación real a bordo debe considerarse todavía preliminar, ya que los resultados proceden de ensayos de laboratorio y de estimaciones teóricas, por lo que será necesario seguir avanzando en estudios de operación continua e integración en buques reales.

5.2 Líneas futuras

Este estudio plantea diversas líneas de investigación de interés en el ámbito naval, energético y ambiental:

- **Estudio del aprovechamiento energético del biogás a bordo:** Convendría profundizar en las posibles aplicaciones energéticas del biogás generado, analizando su empleo para la producción de calor y electricidad, así como su potencial para sustituir parcialmente combustibles convencionales en determinados sistemas del buque.
- **Diseño y desarrollo de una planta piloto a bordo:** Como continuación de los ensayos de laboratorio, resultaría de interés abordar el escalado del sistema mediante el diseño de una planta piloto basada en un reactor tipo CSTR, adaptada a las condiciones operativas del entorno naval e integrando condicionantes como las limitaciones de peso, las vibraciones y la escora.
- **Estudio de viabilidad económica a escala de flota:** Sería de gran interés desarrollar un análisis económico detallado que permita estimar el ahorro potencial en combustible para la Armada, así como evaluar la rentabilidad de la implantación de estos sistemas en distintas unidades navales.
- **Mejora de la integración térmica del sistema:** Otra línea futura relevante consiste en profundizar en el aprovechamiento del calor residual de los motores principales para mantener el digestor en condiciones termófilas de forma estable, favoreciendo así una mayor eficiencia del proceso.
- **Optimización del upgrading del biogás:** También sería conveniente estudiar tecnologías compactas y de bajo mantenimiento, como membranas o sistemas PSA, que permitan mejorar la calidad del biogás hasta obtener biometano apto para usos energéticos más exigentes a bordo.
- **Evaluación de la viabilidad de plantas de digestión anaerobia en tierra:** Otra línea futura de interés consistiría en analizar si resulta más factible implantar plantas de digestión anaerobia en instalaciones terrestres de las Fuerzas Armadas que a bordo de los buques de la

Armada. Para ello, podría estudiarse el tratamiento conjunto de los residuos orgánicos generados en los buques durante las navegaciones o en tierra, junto con los procedentes de otras instalaciones militares. Este enfoque permitiría concentrar una mayor cantidad de sustrato y valorar si una solución centralizada en tierra resulta más viable técnica y logísticamente.

- **Valorización del digestato generado:** Por último, sería necesario analizar la gestión del digestato en el entorno naval, estudiando alternativas de deshidratación, reducción de volumen y posibles aplicaciones posteriores en puerto dentro de estrategias de economía circular.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL)» [En línea]. Available: [https://www.imo.org/es/about/conventions/pages/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-\(marpol\).aspx](https://www.imo.org/es/about/conventions/pages/international-convention-for-the-prevention-of-pollution-from-ships-(marpol).aspx). [Último acceso: 7 febrero 2026].
- [2] «El Pacto Verde Europeo - Comisión Europea» [En línea]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es. [Último acceso: 21 marzo 2026].
- [3] C. Sánchez Sánchez, Tratamientos físico-químico-biológicos para optimizar la valorización energética de residuos orgánicos, Universidad de Extremadura, 2023.
- [4] X. Flotats Ripoll, Co-digestión anaerobia de sustratos orgánicos de diferente origen. De residuo a recurso. El camino hacia la sostenibilidad, Editorial Mundi-Prensa, 2016.
- [5] M. Kayhanian, G. Tchobanoglous y R. C. Brown, Biomass Conversion Processes For Energy Recovery, Handbook of Energy Conservation and Renewable Energy, 2007.
- [6] H. Zabed, J. N. Sahu, A. Suely, A. N. Boyce y G. Faruq, Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017.
- [7] «Hoja de Ruta del Biogás». [En línea]. Available: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/energia/files-1/es-es/Novedades/Documents/00HR_Biogas_V6.pdf. [Último acceso: 24 enero 2026].
- [8] M. Martín-Albo Martín, Biogás y biometano y su uso estratégico como fuente de energía, Universidad Rey Juan Carlos, 2023.
- [9] «Biogases systems as circular bioeconomy hubs». [En línea]. Available: https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2025/10/20250623_EBA-Position-Paper_Circular-bioeconomy.pdf. [Último acceso: 24 enero 2026]
- [10] «8 powerful reasons to choose biogases». [En línea]. Available: <https://www.europeanbiogas.eu/biogas-biomethane-in-a-nutshell/>. [Último acceso: 24 enero 2026].
- [11] «Decoding Biogases». [En línea]. Available: https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2025/06/Decoding-Biogases-2025_ONLINE.pdf. [Último acceso: 25 enero 2026]
- [12] M. Garamendi Smith, Evaluación medioambiental de la producción de biogás a partir de materia orgánica residual mediante análisis de ciclo de vida, Universidad Pontificia Comillas, 2023.

- [13] J. Benítez Soldevilla, A. Campos García, C. Francoy Olagüe, F. J. Martínez Bedia, P. Seonae Spiegelberg y J. Vivas Justel, Perfil Ambiental de España 2024. Informe resumen, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2024.
- [14] AEBIG, Situación del biogás y biometano en España, 2025.
- [15] M. E. Montes Carmona, Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás, Universidad Politécnica de Madrid, 2008.
- [16] A. Pacherrres Ato, Estudio comparativo de la producción de biogás mediante tecnología de biorreactores anaerobios de codigestión a escala laboratorio, Universitat Politècnica de València, 2018.
- [17] «Los microorganismos en la digestión anaerobia y la producción de biogás. Consideraciones en la elección del inóculo para el mejoramiento de la calidad y el rendimiento». [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120681002.pdf>. [Último acceso: 28 enero 2026].
- [18] A. Castro Sierra, M. M. Solís Oba, A. R. Sánchez Camarillo, A. Romero Rodríguez y J. L. Soto García, Producción de Ácidos Grasos Volátiles Mediante la Digestión Anaerobia: una Revisión, Frontera Biotecnológica, 2023.
- [19] X. Flotats Ripoll, Reactores aplicables al proceso. De residuo a recurso. El camino hacia la sostenibilidad, Editorial Mundi-Prensa, 2016.
- [20] W. L. Chow, S. Chong, J. W. Lim, Y. J. Chan, M. F. Chong, T. J. Tiong, J. K. Chin y G.-T. Pan, Anaerobic Co-Digestion of Wastewater Sludge: A Review of Potential Co-Substrates and Operating Factors for Improved Methane Yield, Processes, 2020.
- [21] A. P. da Cunha, M. C. Cammarota e I. Volschan Jr., Anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste: Effect of pre-fermentation of food waste in bench- and pilot-scale digesters, Bioresource Technology Reports, 2021.
- [22] F. Sakaveli, M. Petala, V. Tsiridis y E. Darakas, Enhancing Methane Yield in Anaerobic Co-Digestion of Primary Sewage Sludge: A Comprehensive Review on Potential Additives and Strategies, Waste, 2024.
- [23] R. Cano, A. Nielfa, A. Pérez, L. Bouchy y M. Fdz-Polanco, Grease waste and sewage sludge co-digestion enhancement by thermal hydrolysis: batch and fed-batch assays, Water Science & Technology, 2014.
- [24] P. Weiland, Biogas production: current state and perspectives, Springer-Verlag, 2009.
- [25] X. Flotats Ripoll, Control automático de digestores anaerobios. De residuo a recurso. El camino hacia la sostenibilidad, Editorial Mundi-Prensa, 2016.
- [26] X. Flotats Ripoll, Fundamentos del diseño de reactores para la digestión anaerobia. De residuo a recurso. El camino hacia la sostenibilidad, Editorial Mundi-Prensa, 2016.
- [27] G. Tchobanoglous, H. D. Stensel, R. Tsuchihashi y F. Burton, Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, McGraw-Hill Education, 2014.
- [28] X. Flotats Ripoll, Aplicación de la digestión anaerobia a deyecciones ganaderas. De residuo a recurso. El camino hacia la sostenibilidad, Editorial Mundi-Prensa, 2016.
- [29] X. Flotats Ripoll, Tratamientos y usos del biogás. De residuo a recurso. El camino hacia la sostenibilidad, Editorial Mundi-Prensa, 2016.

- [30] M. Elmallah, E. Madariaga, J. A. González-Almeida, M. Elgohary, M. A. N. Saadeldin y M. Shouman, The Environmental Impact of Anaerobic Digestion for Methane Generation on Cruise Ships, *Journal of Maritime Research*, 2025.
- [31] A. Bosch Martí, Estudio de viabilidad de la instalación de una planta de metanización en un buque crucero, Universidad Politécnica de Cataluña, 2011.
- [32] Y. García Méndez, Estudio de la viabilidad de la implementación de biodigestores en buques de transporte de animales vivos, Universidad Politécnica de Cataluña, 2024.
- [33] J. Filer, H. H. Ding y S. Chang, Biochemical Methane Potential (BMP) Assay Method for Anaerobic Digestion Research, Water, 2019.
- [34] M. A. Rosato, Managing Biogas Plants. A Practical Guide, CRC Press, 2020.
- [35] T. M. Cabrita y M. T. Santos, Biochemical Methane Potential Assays for Organic Wastes as an Anaerobic Digestion Feedstock, Sustainability, 2023.
- [36] AMPTS III – BPC Instruments». [En línea]. Available: https://bpcinstruments.com/bpc_products/ampts3/. [Último acceso: 6 febrero 2026].
- [37] R. A. Labatut, L. T. Angenent y N. R. Scott, Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates, Bioresource Technology, 2011.
- [38] C. Holliger y M. Alves, Towards a standardization of biomethane potential tests, Water Science & Technology, 2016.
- [39] «B.A.C. “Patiño” (A-14) - B.A.C. Patiño - Buques - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspanola/buques-superficie/prefLang-es/06buques-logisticos--01buque-aprovisionamiento-combate-patinno>. [Último acceso: 25 marzo 2026].
- [40] R. M. Rowell, R. Pettersen, J. S. Han, J. S. Rowell y M. A. Tshabalala, Cell Wall Chemistry, Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, 2005.
- [41] J. F. Fernández, Poder calorífico de combustibles industriales, Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Mendoza.
- [42] «Buque de Aprovisionamiento de Combate “Cantabria” (A-15) - B.A.C. Cantabria - Buques - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspanola/buques-superficie/prefLang-es/06buques-logisticos--02buque-aprovisionamiento-combate-cantabria>. [Último acceso: 20 marzo 2026].
- [43] «31ª Escuadrilla de Superficie - Fragatas clase “Álvaro de Bazán” - Buques - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspanola/buques-superficie/prefLang-es/04Fragatas-F100-F80--01fragatas-clase-alvaro-de-bazan-f-100>. [Último acceso: 20 marzo 2026].
- [44] «LHD “Juan Carlos I” (L-61) - Buques - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspanola/buques-superficie/prefLang-es/02lhd-juan-carlos-i--03lhd-juan-carlos-i-l-61>. [Último acceso: 20 marzo 2026].
- [45] S. Garro Martínez, Cuantificación y caracterización de aguas residuales generadas en buques de la Armada, Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, 2025.

- [46] Y. Li, S. Y. Park y J. Zhu, Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011.
- [47] Comisión Europea, Plan REPowerEU, 2022.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS, AMBIENTALES

La implantación de sistemas de digestión anaerobia para el tratamiento y valorización de residuos orgánicos presenta implicaciones que van más allá del ámbito estrictamente técnico. Su interés no reside únicamente en la capacidad de producir biogás a partir de residuos, sino también en los efectos sociales, económicos y ambientales que puede generar su aplicación. En este sentido, la digestión anaerobia debe entenderse como una tecnología con potencial para contribuir a un modelo de gestión más sostenible, eficiente y alineado con las exigencias actuales de transición energética y reducción del impacto ambiental.

Desde el punto de vista social, la digestión anaerobia puede aportar beneficios relevantes al transformar un residuo problemático en un recurso útil. Esta idea de aprovechamiento favorece, en general, una mayor aceptación social, ya que la sociedad tiende a percibir de forma positiva aquellas soluciones que reducen la contaminación y, al mismo tiempo, generan energía renovable. Además, la valorización de residuos orgánicos contribuye a reforzar la conciencia sobre la importancia de una gestión más responsable de los recursos, promoviendo una visión más circular y menos dependiente del modelo tradicional de usar y desechar. No obstante, la aceptación social no depende solo de los beneficios teóricos de la tecnología, sino también de su correcta implantación, de la seguridad de las instalaciones y de la confianza que genere su funcionamiento real.

En relación con la seguridad y la salud de las personas, la digestión anaerobia puede suponer una mejora importante si se gestiona adecuadamente. El tratamiento controlado de los residuos orgánicos reduce su acumulación y, con ello, minimiza problemas asociados a malos olores, proliferación de microorganismos no deseados y riesgos sanitarios derivados de una gestión deficiente. Del mismo modo, al sustituir parcialmente combustibles fósiles por biogás, se favorece una reducción indirecta de emisiones contaminantes, lo que repercute positivamente en la calidad ambiental y, en consecuencia, en la salud humana. Sin embargo, también es necesario considerar que el biogás es un gas combustible y que, por tanto, su manejo exige protocolos estrictos de seguridad, ventilación, control de fugas y mantenimiento. Por ello, el efecto social de esta tecnología será positivo siempre que vaya acompañado de una explotación responsable y técnicamente bien diseñada.

En el plano económico, la digestión anaerobia representa una alternativa de interés al permitir que un residuo deje de ser un coste de gestión para convertirse en una fuente de valor. En primer lugar, se produce un ahorro potencial al reducir los gastos asociados al tratamiento o eliminación de los residuos generados. En segundo lugar, el biogás obtenido puede emplearse como fuente energética, disminuyendo la demanda de combustibles convencionales y generando, por tanto, un ahorro económico adicional. El biogás puede incluso almacenarse para su uso posterior, aspecto especialmente relevante en el contexto naval, ya que se asocia a una mayor autonomía energética, lo que añade un valor estratégico y operativo. A ello se suma la posibilidad de vender el digestato resultante, que, tras su adecuado tratamiento y deshidratación, puede adquirir valor como producto fertilizante o enmienda orgánica, ampliando así las vías de retorno económico. No obstante, conviene mantener una visión realista: estos beneficios deben ponderarse frente a la inversión inicial, los costes de operación, mantenimiento y control del sistema, así como frente a las limitaciones logísticas propias de cada instalación.

Finalmente, las implicaciones ambientales constituyen uno de los argumentos más sólidos a favor de la digestión anaerobia. Su principal aportación radica en que permite gestionar residuos orgánicos de una forma más respetuosa con el medio ambiente, evitando en parte los impactos derivados de su vertido o tratamiento inadecuado. Al generar energía renovable en forma de biogás, se reduce la dependencia de combustibles fósiles y se favorece la disminución de emisiones asociadas al sistema energético convencional. Desde esta perspectiva, la digestión anaerobia encaja de manera clara en estrategias de

sostenibilidad y economía circular, ya que combina tratamiento de residuos, recuperación energética y aprovechamiento de subproductos.

Asimismo, el aprovechamiento del biogás se alinea con los principales instrumentos estratégicos actualmente vigentes en esta materia. En España, la Hoja de Ruta del Biogás impulsa su desarrollo como vía para avanzar en la transición energética, la valorización de residuos y la descarbonización. En el ámbito europeo, el REPowerEU Plan [47] incorpora de forma expresa el impulso del biogás, incluyendo un apartado específico orientado a aumentar su producción, con el fin de reducir la dependencia de combustibles fósiles importados y reforzar la seguridad energética. Por ello, la implantación de la digestión anaerobia no solo aporta beneficios ambientales directos, sino que también contribuye al cumplimiento de las líneas de actuación actuales promovidas tanto en España como en la Unión Europea para el desarrollo de los gases renovables.

En conjunto, puede afirmarse que la digestión anaerobia presenta un balance global favorable desde el punto de vista social, económico y ambiental. Más allá de sus rendimientos técnicos, su verdadero interés reside en la capacidad de integrar la gestión de residuos con la producción de energía renovable y la reducción del impacto ambiental. Precisamente por ello, su aplicación no debe valorarse solo como una solución tecnológica, sino como una herramienta con implicaciones amplias, capaz de contribuir a sistemas más seguros, eficientes y sostenibles.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La aplicación de la digestión anaerobia al tratamiento de residuos orgánicos no solo plantea ventajas técnicas, energéticas o ambientales, sino también cuestiones éticas y sociales que conviene valorar con cierta profundidad. En esencia, esta tecnología obliga a reflexionar sobre cómo se gestionan los residuos que genera una actividad humana y sobre la responsabilidad colectiva de transformarlos en recursos útiles en lugar de tratarlos únicamente como un problema del que deshacerse. Desde esta perspectiva, la digestión anaerobia representa una alternativa coherente con una visión más responsable del desarrollo, al integrar aprovechamiento energético, reducción de impactos y uso más racional de los recursos disponibles.

Desde el punto de vista ético, uno de los aspectos más relevantes es que esta tecnología se apoya en un principio de responsabilidad ambiental intergeneracional. Apostar por sistemas que reduzcan emisiones, limiten la dependencia de combustibles fósiles y valoricen residuos orgánicos implica asumir que el progreso técnico no debe medirse solo por su rendimiento inmediato, sino también por sus consecuencias futuras sobre el entorno y sobre la calidad de vida de las personas. En este sentido, la digestión anaerobia no puede entenderse únicamente como una solución eficiente, sino como una decisión que refleja un determinado modelo de sociedad: uno más comprometido con la sostenibilidad, con la prevención del daño ambiental y con la búsqueda de alternativas menos agresivas para el medio natural. La ingeniería no puede medirse solo por su capacidad para ofrecer soluciones funcionales e inmediatas, sino también por el tipo de consecuencias que proyecta a medio y largo plazo.

En el plano social, su implantación puede reforzar la aceptación de modelos energéticos más limpios, especialmente cuando la población percibe que los residuos se gestionan de forma útil, segura y beneficiosa. Además, contribuye a trasladar una idea importante: la sostenibilidad no depende solo de grandes decisiones políticas, sino también de cómo se resuelven problemas concretos de gestión cotidiana. Sin embargo, también debe señalarse que ninguna tecnología es socialmente positiva por sí misma. Su valor depende de que se implante con criterios de seguridad, transparencia y utilidad real, evitando que el discurso de la sostenibilidad se convierta en una justificación superficial sin resultados efectivos. Por ello, desde un punto de vista ético-social, la digestión anaerobia resulta valiosa no solo por lo que produce, sino por lo que representa: una forma más consciente, responsable y equilibrada de relacionarse con los residuos, la energía y el medio ambiente.

ANEXO III: DECLARACIÓN DE USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Durante la elaboración del presente Trabajo Fin de Grado se han utilizado, de forma puntual y responsable, herramientas de inteligencia artificial generativa como apoyo en tareas auxiliares de redacción y revisión lingüística.

Su empleo ha tenido en todo momento un carácter estrictamente complementario, centrado principalmente en la reformulación de expresiones y en la mejora de la estructura de determinados apartados. En ningún caso estas herramientas han sustituido el trabajo personal del autor en aspectos fundamentales como el planteamiento del estudio, el desarrollo metodológico, el análisis de los resultados o la elaboración de las conclusiones.

Por otra parte, la inteligencia artificial no se ha empleado para generar de manera autónoma el contenido científico esencial del trabajo, sino únicamente como recurso de apoyo destinado a mejorar la calidad de la comunicación escrita, facilitar la organización del texto y agilizar tareas secundarias de carácter académico, siempre bajo la supervisión y revisión crítica del autor.

Por todo ello, tanto el contenido final del documento como las decisiones adoptadas durante su desarrollo, el enfoque seguido y las conclusiones expuestas son responsabilidad exclusiva del autor.