



**Universidad
de La Laguna**

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Grado en Ingeniería Química Industrial

Trabajo de Fin de Grado

**Producción de biogás a partir de residuos
generados en el sector hotelero para su
autoabastecimiento desde el punto de vista
energético**

Autor: Adrian Alberto Francisco Rodríguez

Tutora: Dra. María Emma Borges China

San Cristóbal de La Laguna, Septiembre 2019





Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a la Dra. Emma Borges por su dedicación y diligencia como tutora de este TFG, Además de su excelente labor como profesora durante todos estos años.

Por otro lado, me gustaría agradecer también a la cadena hotelera que ha colaborado con la elaboración de este proyecto. Gracias a su ayuda ha sido posible darle un enfoque más práctico a este estudio.

A todo el Departamento de Ingeniería Química Industrial y a la Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología, mis agradecimientos por aportarme las competencias necesarias a lo largo de la carrera para poder impartirlas en un futuro en el mundo laboral.

A todos, muchas gracias.



RESUMEN

Los residuos urbanos son un problema cada vez más importante en Canarias. Debido a la naturaleza insular del archipiélago, el espacio del cual se dispone para tratarlos es cada vez más reducido. Así pues, la valorización de estos residuos se muestra como una alternativa ante la problemática de las islas. Si hablamos de la fracción orgánica de estos residuos, la obtención de biogás mediante biodigestión anaerobia es una solución viable, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

En este proyecto se ha llevado a cabo un estudio sobre la aplicabilidad de esta tecnología en un complejo hotelero situado al sur de Tenerife, el cual debido a su gran afluencia de huéspedes es capaz de producir cantidades suficientes de materia orgánica como para que una inversión en este tipo de tecnología sea rentable.

Se han tomado datos reales y se han elegido los equipos adecuados para el tratamiento de estos residuos mediante biodigestión anaerobia, obteniendo biogás, el cual puede ser empleado para la generación de energía, y un subproducto del proceso de biodigestión conocido como digestato, el cual con un tratamiento adecuado puede ser empleado como fertilizante de calidad.

La producción de estos compuestos puede ser aprovechado por el establecimiento hotelero tanto para autoabastecer energéticamente algunas zonas del complejo como la cocina o las piscinas utilizando el biogás producido, como para emplear el digestato en jardines o cultivos dentro del hotel.

La biodigestión es una alternativa sostenible para el tratamiento de residuos orgánicos, y la implantación de un sistema a pequeña escala para el aprovechamiento de este tipo de residuos permite reducir significativamente el impacto ambiental de un sector tan importante para las islas como es el de la hostelería.

Palabras clave: Biogás, Biodigestión, Sector hotelero, Residuos.



ABSTRACT

Urban waste is an increasingly important problem in the Canary Islands. Due to the insular nature of the archipelago, the space available to treat them is limited. Thus, the recovery of this waste is shown as an alternative to the problems of the islands. If we talk about the organic fraction of these wastes, obtaining biogas through anaerobic biodigestion is a viable solution, both technically and economically.

In this project a study has been carried out on the applicability of this technology in a hotel complex located in the south of Tenerife, which due to its large influx of guests is able to produce enough amount of organic matter so that an investment in this type of technology may be profitable.

Real data have been taken and the appropriate equipment has been chosen for the treatment of these wastes through anaerobic biodigestion, a method in which is possible to obtain biogas, which can be used for energy generation, and a byproduct of the biodigestion process known as digestate, which, with an appropriate treatment, can be used as a quality fertilizer.

The production of these compounds can be used by the hotel establishment both to self-supply energy in some areas of the complex such as the kitchen or swimming pools using the biogas produced, and to use digestate in gardens or crops within the hotel.

Biodigestion is a sustainable alternative for the treatment of organic waste, and the implementation of a small-scale system for the use of this type of waste allows to significantly reduce the environmental impact of such an important sector for the islands such as the hotel business.

Keywords: Biogas, Biodigestion, Hotel sector, Waste.



ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción. | 6 |
| 1.1. Importancia del tratamiento de residuos orgánicos en Canarias. | 6 |
| 1.2. Objetivos. | 7 |
| 2. Fundamentos teóricos. | 8 |
| 2.1. Producción de Biogás. | 8 |
| 2.2. Influencia de parámetros ambientales y operacionales. | 11 |
| 3. Caracterización del biogás y subproductos. | 19 |
| 3.1. Propiedades del biogás. | 19 |
| 3.2. Propiedades del digestato. | 20 |
| 4. Descripción del proceso de obtención de biogás. | 23 |
| 4.1. Funcionamiento de una planta de biogás. | 23 |
| 4.2. Codigestión. | 25 |
| 5. Uso del biogás y derivados. | 27 |
| 6. Estudio de viabilidad. | 29 |
| 6.1. Datos de partida. | 29 |
| 6.2. Estrategias de aprovechamiento de residuos orgánicos. | 32 |
| 6.3. Estudio técnico. | 33 |
| 6.4. Estudio normativo. | 39 |
| 6.5. Presupuesto. | 40 |
| 6.6. Estudio económico. | 43 |
| 7. Conclusiones. | 48 |
| 8. Bibliografía. | 50 |
| 9. Marco legal y administrativo. | 53 |
| 9.1. Legislación de la UE. | 53 |
| 9.2. Legislación nacional. | 54 |
| 9.3. Legislación autonómica. | 54 |



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Importancia del tratamiento de residuos orgánicos en Canarias

El sector turístico en Canarias es esencial para el archipiélago, siendo uno de los sectores que más trabajo generan y que más contribuyen a la economía de las islas, aportando un 35% del total de la economía canaria.

De entre los numerosos beneficiarios de este sector se encuentra el sector hotelero, el cual supone un 48,5% de la inversión turística en el archipiélago, además de tratarse de la actividad característica relacionada al turismo que más empleo genera, con un 19,1% del empleo turístico en Canarias [1].

Al tratarse de un destino de ocio tan demandado, millones de visitantes llegan a Canarias cada año, los cuales no solo contribuyen a la economía de las islas, sino también a la generación de residuos. Canarias es la segunda comunidad autónoma en cuanto a generación de residuos urbanos por habitante del país se refiere [2], y si a ese problema se le añade la condición geográfica y territorial de las islas, se llega a la conclusión de que la gestión de dichos residuos pasa a ser un problema de especial importancia, del cual muchas empresas del sector turístico están empezando a tomar conciencia, apostando por la autosuficiencia y la búsqueda de soluciones para minimizar el impacto ambiental que generan sus residuos.



Una de esas soluciones es la valorización de residuos a partir de la biodigestión anaerobia, que consiste en la descomposición de materia orgánica en un entorno anaerobio (sin oxígeno) para producir una mezcla de gases conocida como biogás. Este biogás es rico en metano, por lo que es un combustible de alto valor energético, y puede ser empleado para producir energía eléctrica mediante el uso de equipos de cogeneración.

Además, durante el proceso de biodigestión se genera una fracción líquida, llamada digestato o digerido, la cual debido a su alto contenido en nutrientes puede ser empleada como fertilizante.

Otra de las razones por las que este tipo de procesos resulta viable para el tratamiento de residuos es la codigestión, un proceso de digestión anaerobia en el cual se somete a descomposición dos o varios sustratos distintos. Esto permite el aprovechamiento de una mayor cantidad de residuos orgánicos siempre que se haya llevado previamente una separación de estos residuos para evitar problemas de inhibición y una recogida selectiva adecuada.

La implementación de este tipo de tecnología supone una mejora en el modelo de gestión de residuos de cualquier complejo hotelero, proporcionando una mayor eficiencia energética, un menor impacto ambiental y, en definitiva, un beneficio general del que se puede beneficiar el establecimiento.

1.2. Objetivo

En este estudio se pretende plantear una estrategia de valorización de los residuos orgánicos que se generan en el sector hotelero, aprovechando dichos residuos mediante un proceso de biodigestión anaerobia para obtener biogás, el cual puede ser utilizado para producir energía eléctrica.

Se aborda esta estrategia desde un punto de vista técnico y económico, estudiando la viabilidad de su aplicabilidad en un recinto hotelero, el cual recibe anualmente una cantidad considerablemente alta de huéspedes, lo que implica una mayor generación de residuos que pueden ser aprovechados. El objetivo principal de este estudio es la selección y descripción del sistema de biodigestión más adecuado para la gestión y valorización esos residuos generados dentro del establecimiento.



2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Producción de Biogás

El biogás se produce en un proceso biológico en el cual, en ausencia de oxígeno, la materia orgánica se descompone formando una mezcla de gases. Ese proceso se conoce como biodigestión, y está muy presente en la naturaleza, ocurriendo en el proceso de digestión de los rumiantes o en el fondo de los lagos, por ejemplo. La mayor parte de la materia orgánica se convierte en biogás gracias a la acción de distintos microorganismos, que intervienen en el proceso de biodigestión. Durante este proceso también se genera energía, en forma de calor y nueva biomasa.

La mezcla de gases resultantes está compuesta principalmente de metano, con una concentración del 50-75 % en volumen, y de dióxido de carbono, con un 25-50 % en volumen. El biogás también contiene pequeñas cantidades de hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y otros gases traza. La composición del biogás resultante puede variar dependiendo de los sustratos, la fermentación (digestión) y los distintos diseños técnicos de la planta [3]. El proceso por el que se forma el biogás consiste en una serie de etapas:



- Hidrólisis: Durante esta primera etapa, los compuestos complejos de la materia orgánica de entrada (por ejemplo carbohidratos, proteínas y grasas) se dividen en compuestos orgánicos más simples (como aminoácidos, azúcares y ácidos grasos). Las bacterias hidrolíticas que participan en esta etapa liberan enzimas que descomponen el material a través de procesos bioquímicos.
- Acidogénesis: Los productos intermedios formados a lo largo del proceso de hidrólisis se dividen luego durante la acidogénesis o fase de acidificación por medio de bacterias fermentadoras para formar ácidos grasos como el acético, o el butírico, además de dióxido de carbono e hidrógeno. También se generan pequeñas cantidades de ácido láctico y de alcoholes. La naturaleza de los productos formados depende de la concentración de hidrógeno que se forme como subproducto durante esta etapa.
- Acetogénesis: A través de este proceso se forma el ácido acético, convirtiendo los ácidos grasos producidos durante la acidogénesis en compuestos precursores del biogás (ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono) por medio de bacterias acetogénicas. Cabe destacar la importancia de mantener un control sobre la presión parcial del hidrógeno, pues un contenido de hidrógeno excesivamente alto impide la conversión de los productos intermedios de la acidogénesis. En consecuencia, se acumulan los ácidos orgánicos, como el ácido propiónico, isobutírico o hexanoico, e inhiben la formación del metano. Es por esto por lo que las bacterias acetogénicas deben coexistir en una comunidad biótica cerrada (biocenosis) con las bacterias metanógenas que consumen el hidrógeno y el dióxido de carbono durante la formación de metano (transferencia de hidrógeno entre especies), asegurando así un ambiente aceptable para las bacterias acetogénicas.
- Metanogénesis: Es la etapa final de generación de biogás, transformando el ácido acético principalmente, pero también el hidrógeno y el dióxido de carbono, en metano por medio de bacterias metanogénicas estrictamente anaerobias. Los metanógenos hidrogenotróficos producen metano a partir del hidrógeno y el dióxido de carbono, mientras que las bacterias acetoclásticas que forman metano lo producen a partir de la división del ácido acético. [3][4]



El diagrama siguiente (Figura 1) representa las distintas etapas de la biodigestión anaerobia y los productos que generan cada una, hasta llegar a la producción final del biogás.

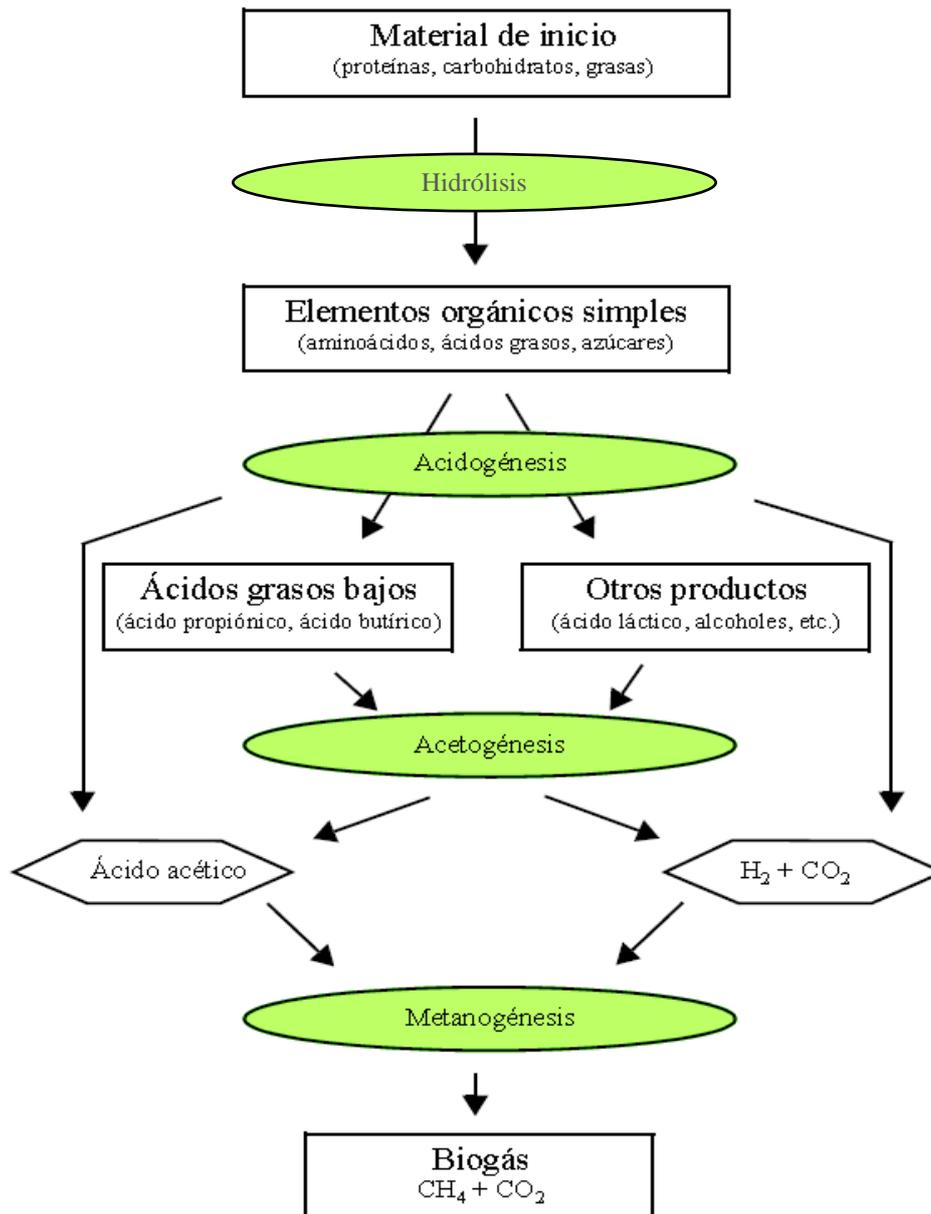


Figura 1. Representación esquemática de la descomposición anaerobia [3]



Las cuatro fases de la degradación anaerobia ocurren simultáneamente en procesos de una única etapa. Las bacterias acidogénicas producen cadenas orgánicas cortas y se generan en condiciones anaerobias, creando así un entorno idóneo para el desarrollo de las bacterias metanogénicas. Las metanogénicas a su vez usan los productos intermedios de las acidogénicas, que si no fueran consumidos serían perjudiciales para las mismas. [3]

Conviene adaptar las condiciones ambientales a las necesidades de las bacterias que forman metano, ya que los microorganismos metanogénicos son el eslabón más débil en la biocenosis debido a su baja tasa de crecimiento (hasta cinco veces menor que las del resto de fases) y son los más sensibles en responder a las perturbaciones, como el potencial redox, el pH o la presencia de oxígeno molecular.

2.2. Influencia de parámetros ambientales y operacionales

Para que el proceso de biodigestión se produzca de forma adecuada, es necesario mantener ciertas condiciones ambientales y operacionales óptimas. Para ello se deben controlar varios parámetros, entre los que hay que destacar:

- Composición del residual:

Las mejores condiciones de operación se dan empleando una alimentación con menos de un 10% de sólidos totales, por lo que conviene utilizar una biomasa con un alto contenido en humedad. La codigestión también incrementa la producción de metano debido a la compensación de propiedades de distintos sustratos. [5]

Las sustancias, tanto orgánicas como inorgánicas, que conforman la biomasa del sustrato juegan un papel importante en el desarrollo del proceso de biodegradación anaerobia. Cuanto más complejo sea el residual que alimenta el biodigestor, más ácidos grasos volátiles se producen, resultando en un mayor rendimiento del CH₄ obtenido. En la Tabla 1 se muestran los rendimientos teóricos de gas correspondientes a sustancias presentes en muchos residuales.



Tabla 1. Rendimiento de gas metano para diferentes sustratos [4]

| Componente | %CH ₄ | m ³ /kg SV destruido |
|---|------------------|---------------------------------|
| Carbohidratos (C ₆ H ₁₀ O ₅) | 50 | 0,886 |
| Grasas (C ₅₀ H ₃₀ O ₆) | 70 | 1,335 |
| Proteínas (6C.2NH ₃ .3H ₂ O) | 84 | 0,587 |

Se prefiere expresar el rendimiento de gas en base a kg de sólidos volátiles (SV) destruidos y no totales ya que no todos los SV son biodegradables, es decir, que no todos van a producir biogás. [4]

- Acidez:

La acidez es un parámetro crucial para el funcionamiento óptimo del digester. Un control adecuado de los diferentes valores de pH permite que los microorganismos que participan en las distintas etapas de descomposición crezcan correctamente.

Para la producción de metano, las bacterias viven mejor bajo condiciones próximas a la neutralidad, con valores de pH entre 6,5 y 7,5. En cada fase del proceso los microorganismos presentan máxima actividad en un rango de pH determinado: los hidrolíticos entre 7,2 y 7,4, los acetogénicos entre 7 y 7,2, y los metanogénicos entre 6,5 y 7,5. [7]

El pH también influye en la actividad microbiana, propiciando un cambio de los grupos hidrolizables de las enzimas y alterando los compuestos no enzimáticos del sistema. Además también influye en la concentración de iones hidrógeno, la cual interviene en las diferentes reacciones químicas, bioquímicas y biológicas que ocurren en este sistema. [5]



- Nutrientes:

Las bacterias responsables del proceso de biodegradación anaerobia tienen necesidades distintas en cuanto a macronutrientes, micronutrientes o vitaminas. Su concentración en la biomasa puede afectar a la tasa de crecimiento y la actividad de las distintas poblaciones.

La relación carbono/nitrógeno (C/N) óptima del material a digerir se encuentra entre 20 y 30, relación necesaria para el crecimiento de las bacterias. Si la relación es muy inferior disminuye la velocidad de reacción, y si es muy superior crea problemas de inhibición. Es importante que la cantidad de nitrógeno sea adecuada para evitar limitación de nutrientes (poco nitrógeno) o toxicidad por amoníaco (demasiado nitrógeno). Una forma de equilibrar esta relación es mediante la codigestión, mezclando residuos con diferentes relaciones C/N. [7][5]

Las bacterias para crecer necesitan más que un simple suministro de sustancias orgánicas como fuente de carbono y energía. También requieren algunos nutrientes minerales como nitrógeno, sulfuro, fósforo, potasio, calcio o magnesio, entre otros. Los residuos agrícolas o municipales normalmente contienen cantidades adecuadas de los elementos mencionados. [7]

- Inhibidores:

Los compuestos tóxicos o inhibidores son aquellos que o bien se generan durante el proceso de fermentación anaerobio o ya estaban presentes en el residuo antes de su digestión. Estas sustancias reducen el rendimiento de la digestión, llegando incluso a causar la desestabilización del proceso por completo.

En cantidades elevadas, compuestos necesarios para el desarrollo de las comunidades microbianas encargadas de la producción de biogás como el azufre o el nitrógeno pueden transformarse en tóxicos durante el proceso, formando amoníaco (NH_3), iones sulfuro (S_2^-) y amonio (NH_4^+). Los ácidos grasos volátiles también son capaces de generar serios problemas de inhibición a determinadas concentraciones, en especial si se tienen a su vez bajos valores de pH. [3]



Cuando se considera cómo se alimenta un digestor se debe recordar que añadir excesivo sustrato también puede inhibir el proceso de digestión porque cualquier constituyente de un sustrato puede tener un efecto dañino en las bacterias si su concentración es demasiada alta. Las concentraciones a las que ciertas sustancias pueden poner en riesgo el proceso de biodigestión están señaladas en la Tabla 2.

Tabla 2 Inhibidores en procesos de descomposición anaerobia y concentraciones límite perjudiciales [3][5]

| SUSTANCIA | Nitrógeno | Cobre | Calcio | Sodio | Magnesio | Oxígeno |
|-----------|-----------|--------|--------|-------|----------|---------|
| [ppm] | 3000 | 10-250 | 8000 | 8000 | 3000 | 0,1 |

| SUSTANCIA | Níquel | Zinc | Cromo | Sulfuro | Cianuro | Ac. Acético (pH=7,0) |
|-----------|----------|----------|----------|---------|---------|----------------------|
| [ppm] | 100-1000 | 350-1000 | 200-2000 | 200 | 2 | 2000 |

Sin embargo, algunos de estos compuestos tales como el níquel, cobalto, molibdeno y selenio, resultan estimulantes para los microorganismos metanógenos, aumentando significativamente la producción de éstos. En estudios realizados en Cuba con residuales de destilería se obtuvieron eficiencias mayores, entre un 25 y 50 % cuando se adicionó al reactor anaerobio un desecho industrial que contenía níquel y cobalto en cantidades trazas. [4]

En conclusión, es más correcto hablar de concentraciones tóxicas para algún compuesto o sustancia específica que de compuestos y sustancias inhibitoras o tóxicas.

- Temperatura:

Este parámetro influye de manera decisiva en el proceso anaerobio, ya que de él depende mucho las velocidades de reacción con las que se lleva a cabo cualquier proceso biológico y la composición del biogás debido a la dependencia de la solubilidad de los diferentes gases con la temperatura.



La temperatura óptima en cada uno de estos rangos es difícil de predecir, ya que depende del tipo de residual, de las condiciones ambientales, entre otros. No obstante, se reconocen en general como temperaturas óptimas las de 35 y 55 °C para los tratamientos mesófilos (entre 20 y 40 °C) y termófilos (más de 40 °C).

A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión dando lugar a una mayor producción de biogás. La temperatura de operación en el digestor está considerada uno de los principales parámetros de diseño, ya que variaciones bruscas de temperatura en el mismo, pueden provocar desestabilización en el proceso. [3][7]

- Mezclado:

Debe haber un contacto adecuado entre los microorganismos y el sustrato si se desean obtener altos niveles de producción de biogás. Esto generalmente es posible a través de un mezclado exhaustivo en el tanque de digestión.

Para obtener altos niveles de producción de biogás tiene que haber un contacto directo entre las bacterias y el sustrato, lo cual se logra generalmente a través de un mezclado exhaustivo en el tanque de digestión. Salvo que ocurra este mezclado exhaustivo en el digestor, después de un cierto tiempo se puede observar la separación de la mezcla junto con la formación de capas. Esto se atribuye a las diferencias en la densidad de los distintos constituyentes de los sustratos y también al empuje ascendente de la formación de gas.

Cuando ocurre esto, la masa bacteriana se acumula en la capa inferior como resultado de su densidad más alta, mientras que el sustrato a ser descompuesto se acumula a menudo en la capa superior. En tales casos, el área de contacto se limita al área limítrofe entre estas dos capas y ocurre poca degradación.

Además, algunos sólidos flotan hacia la parte superior formando una capa de escoria que hace más difícil el escape del gas.

Por lo tanto, es importante promover el contacto entre microorganismos y sustrato mezclando los contenidos del tanque de digestión. Sin embargo, debe evitarse el mezclado excesivo. En particular, las bacterias que forman ácido acético (activo en la acetogénesis) y las arqueas en la metano-génesis forman una comunidad



biótica estrecha que es sumamente importante si se quiere que el proceso de formación de biogás proceda sin perturbaciones. Si se destruye esta comunidad biótica por exceso de cizallamiento de fuerzas como resultado de un intenso mezclado, la descomposición anaerobia puede ser afectada negativamente. [3]

- Tiempo de retención:

Es el tiempo promedio calculado que un sustrato permanece en el digestor hasta su descarga. El cálculo implica determinar la proporción entre el volumen del reactor (V_R) respecto del volumen del sustrato añadido diariamente (V). El tiempo de retención hidráulica se expresa en días.

$$HRT = \frac{V_R}{V} [d]$$

Ecuación 1. Tiempo de retención hidráulica [3]

(V_R = volumen del reactor [m^3]; V = volumen del sustrato añadido diariamente [m^3/d])

El tiempo de retención hidráulico está relacionado con dos factores, el tipo de sustrato y la temperatura. Como se puede observar en la Figura 2, un aumento de la temperatura del sustrato conlleva un aumento de la actividad de las bacterias que digieren el residual y, por lo tanto, una disminución del tiempo de retención. [5][6]

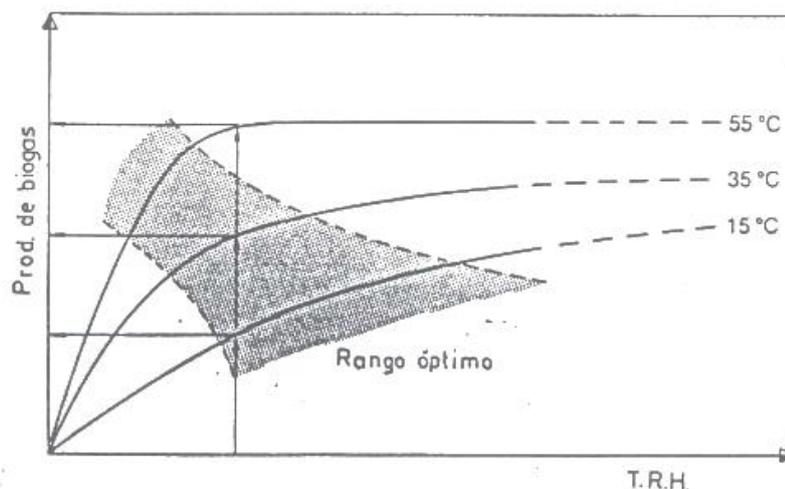


Figura 2. Relación entre el Tiempo de Retención hidráulica (T.H.R.) y la producción de biogás a diferentes temperaturas [6]



A medida que el tiempo de retención aumenta, la tasa de eliminación de materia orgánica biodegradable también tiende a aumentar. En cambio, la producción volumétrica de biogás disminuye una vez superado un tiempo de retención hidráulica óptimo. Los sustratos que contengan mayor proporción de carbono retenido en moléculas como la celulosa, requerirán mayores tiempos de retención para ser totalmente digeridos. [4]

Por lo tanto, es igualmente importante adaptar el tiempo de retención a la tasa específica de descomposición de los sustratos. Si la cantidad añadida por día es conocida, el volumen necesario del reactor puede calcularse junto con la degradabilidad del sustrato y el tiempo de retención deseado. [3]

- Tasa de Carga Orgánica:

Es un parámetro operativo crucial. Indica cuántos kilogramos de sólidos volátiles (SV) o de materia orgánica seca pueden alimentarse al digestor por m³ de volumen de trabajo por unidad de tiempo.

$$TCO = \frac{m \cdot c}{V_R \cdot 100} [kg SV \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}]$$

Ecuación 2. Tasa de carga orgánica (TCO) [3]

(m = cantidad de sustrato añadido por unidad de tiempo [kg/d]; c = concentración de materia orgánica (sólidos volátiles) [% SV]; = V_R volumen del reactor [m³])

La tasa de carga orgánica se puede especificar para cada etapa (recipiente a prueba de fugas de gas, aislado y calentado), para el sistema en conjunto (volúmenes totales de trabajo de todas las etapas) y con o sin recirculación del material. El cambio en las variables de referencia puede llevar a resultados que a veces difieren ampliamente para la tasa de carga orgánica de una planta.

Para obtener la comparación más significativa de las tasas de carga orgánicas de diversas plantas de biogás, es aconsejable determinar este parámetro para el sistema completo sin considerar la recirculación del material, en otras palabras, exclusivamente para el sustrato fresco. [3]



En la Figura 3 se puede observar que existe una correlación estrecha entre la tasa de carga orgánica y el tiempo de retención hidráulica. Si se asume que la composición no cambia, a medida que se eleva la tasa de carga orgánica se añade más sustrato al digestor, y en consecuencia se acorta el tiempo de retención. Para poder mantener el proceso de digestión, debe elegirse el tiempo de retención hidráulica de tal manera que el reemplazo constante de los contenidos del reactor no elimine más microorganismos que los que el nuevo crecimiento puede reponer durante este tiempo (la tasa de duplicación de ciertas bacterias metanogénicas, por ejemplo, es 10 días o más). También debería recordarse que con un tiempo de retención corto los microorganismos tendrán poco tiempo para degradar el sustrato y, consecuentemente, el rendimiento de gas será inadecuado. [3][10]

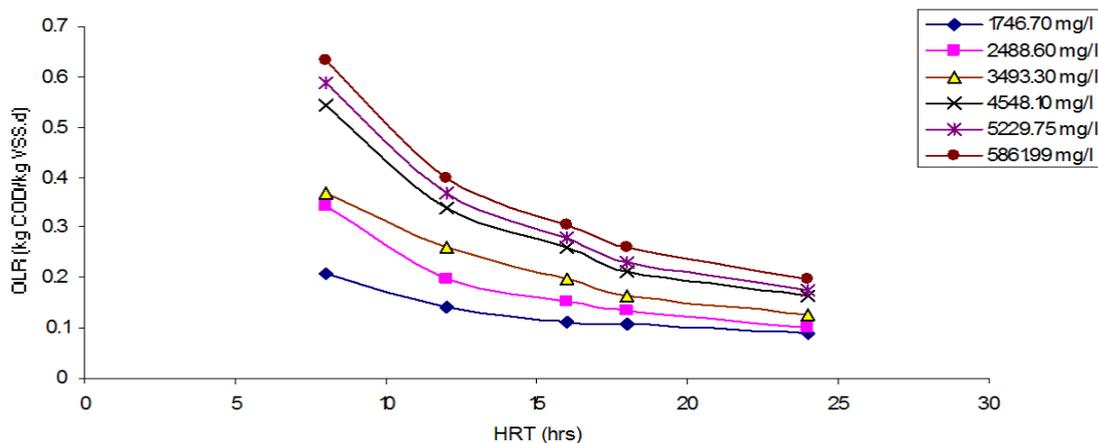


Figura 3. Relación entre la tasa de carga orgánica (Organic Load Rate, OLR) y el tiempo de retención hidráulica (Hydraulic Time Rate) para las concentraciones de sólidos volátiles de distintos sustratos. [10]



3. CARACTERIZACIÓN DEL BIOGÁS Y SUBPRODUCTOS

3.1. Propiedades del biogás

El biogás es una combinación de gases constituida principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), junto con vapor de agua y gases traza. El más importante de estos es el metano, ya que es el componente combustible del biogás y, de este modo, influye directamente en su poder calorífico. Existe una oportunidad limitada de influir en la composición del biogás por medio de un control selectivo de procesos. En primer lugar, la composición del biogás depende de la composición del sustrato.

Además, la concentración de metano en el biogás está afectada por los parámetros del proceso como la temperatura de digestión, la carga del reactor y el tiempo de retención hidráulica, así como por cualquier interrupción del proceso o por el uso de procesos biológicos ajenos a la biodigestión anaerobia, como la desulfuración biológica. El rendimiento de metano que se puede obtener está determinado esencialmente por la composición del sustrato, en otras palabras, por las proporciones de grasa, proteínas y carbohidratos, en ese orden. Cuantas más grasas, mayor será el rendimiento de metano del biogás [4]



Respecto de su masa, se puede lograr un rendimiento más alto de metano con grasas que con carbohidratos. Respecto de la calidad de la combinación de gases, la concentración de sulfuro de hidrógeno (H_2S) como gas traza desempeña un papel importante. No debe ser muy alta porque incluso concentraciones más bajas de sulfuro de hidrógeno pueden tener un efecto inhibitorio en el proceso de degradación. Al mismo tiempo, las altas concentraciones de H_2S en el biogás causan daño de corrosión cuando éstas se utilizan en una unidad que combina calor y electricidad o en un caldero de calefacción [3]. La Tabla 3 proporciona una vista de conjunto de la composición promedio del biogás.

Tabla 3. Composición Química Promedio del biogás [3]

| Compuesto | Concentración |
|-----------|-----------------|
| CH_4 | 50-75 (% vol.) |
| CO_2 | 25-45 (% vol.) |
| H_2S | 20-20.000 (ppm) |
| NH_3 | 0-500 (ppm) |
| N_2 | <2 (% vol.) |
| O_2 | <2 (% vol.) |
| H_2 | <1 (% vol.) |
| H_2O | 2-7 (% vol.) |

3.2. Propiedades del digestato

Tras el proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás, se genera un subproducto biodegradable llamado digestato o digerido. Considerando las tendencias legislativas en el ámbito de la gestión de residuos, donde los propios generadores de residuos tendrán que ser responsables de la gestión de estos, se debe considerar fundamental la revalorización de este subproducto. Teniendo en cuenta las características químicas y microbiológicas de este producto su destino podría ir dirigido al uso agrícola como fertilizante. [3]



Las características físico-químicas de los digeridos están muy condicionadas por los materiales de origen empleados en la digestión anaerobia. Generalmente muestran un contenido de materia seca inferior al 13%, por lo que pueden ser clasificados como productos líquidos.

Asimismo, suelen presentar un pH ligeramente alcalino, siendo un valor ácido de pH indicativo de una alta inestabilidad del digerido asociado a la presencia de ácidos orgánicos volátiles en el digestor. Los valores de conductividad eléctrica son relativamente altos. Un alto contenido de sales solubles en los digeridos puede incidir negativamente en el desarrollo de los cultivos [3].

Respecto al contenido de nutrientes, un importante valor fertilizante se asocia a la presencia de nitrógeno en forma amoniacal. Sin embargo, esta forma de nitrógeno puede perderse fácilmente por volatilización como amoniaco durante el almacenamiento y la aplicación agrícola, debido al pH alcalino de los digeridos. Los materiales digeridos también poseen contenidos apreciables de fósforo, potasio, calcio, magnesio y micronutrientes, lo que constituye una fuente importante de nutrientes para los sistemas de producción agrícola.

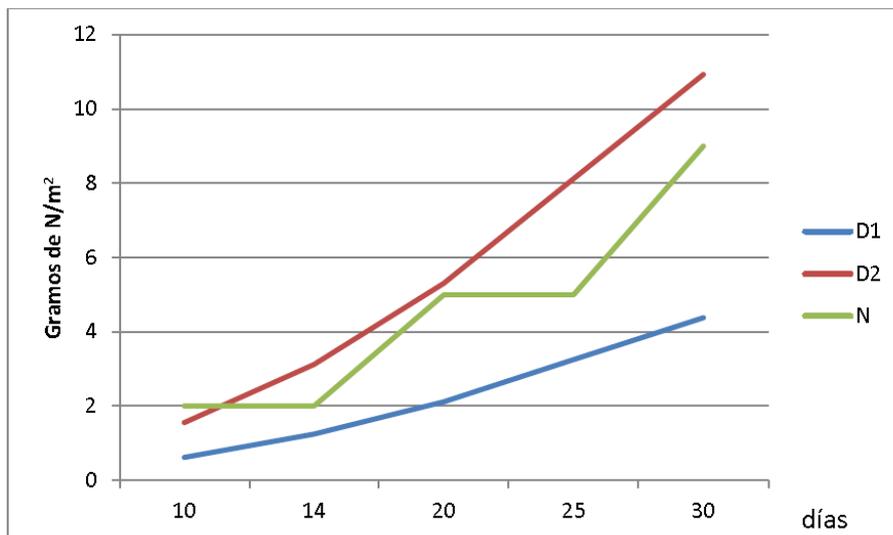
La gran cantidad de factores que influyen y determinan la composición del digerido causan una alta variabilidad en los parámetros del digerido. La digestión anaerobia no asegura la estabilidad del digerido, siendo necesario en los casos más desfavorables (mayor biodegradabilidad) un tratamiento posterior para evitar una elevada producción de CO₂, inmovilización de nitrógeno y desnitrificación en el suelo. Por ello, no se debe aplicar el digerido de forma directa sobre semillas o plántulas jóvenes, sino diluido con agua de riego para el aprovechamiento de sus nutrientes. La aplicación sin diluir requiere que se produzca la estabilización del material en el suelo. [5]

Se ha demostrado también que el digestato puede ser una alternativa para la fertilización de cultivos tan delicados y susceptibles como el de la lechuga. Se obtuvieron características morfológicas y productivas, equivalentes al cultivo con abonado convencional, no habiéndose encontrado diferencias significativas entre una de las muestras abonadas con digerido y otra con abono convencional.



Para esto se realizó un ensayo en el cual se trataron una serie de cultivos a pequeña escala con distintos tipos de fertilizantes: Algunas de estas plantaciones fueron tratadas con abono inorgánico convencional, y otras con digeridos procedentes de plantas de biodigestión anaerobias diluidas al 1 y 2% de agua. Acto seguido se estudiaron los aportes nutricionales y microbiológicos de cada uno de los fertilizantes utilizados en el ensayo.

El estudio de los parámetros morfológicos y productivos verifica que el digerido es adecuado como fuente de fertilización, obteniendo resultados equivalentes al abono inorgánico para el cultivo de lechuga. El suelo se regeneró microbiológicamente, encontrando mayores poblaciones de organismos beneficiosos en el tratamiento con digestato diluido. A su vez se obtuvieron unos niveles nutricionales adecuados para la muestra tratada con el digestato en comparación con el abono inorgánico, tal y como se muestra en la Figura 5. [9]



*Figura 4. Aporte de nitrógeno en los diferentes tratamientos [9]
(D1: Tratamiento digestato al 1% volumen de agua aportada; D2: tratamiento digestato al 2% volumen de agua aportada; N: Tratamiento abono inorgánico)*

4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIOGÁS

4.1. Funcionamiento de una planta de biogás

Generalmente, las plantas de biodigestión suelen estar constituidas por:

- Un proceso de pretratamiento y depósito para la alimentación.
- Un digestor, donde tiene lugar el proceso biológico.
- Una campana de gas o un gasómetro, para recoger el biogás producido.
- Otro depósito para el digerido (efluente).
- Proceso de Cogeneración Eléctrica/Térmica

Normalmente un sistema de biodigestión anaerobia se estructura de forma similar al diagrama de procesos reflejado en la Figura 5.

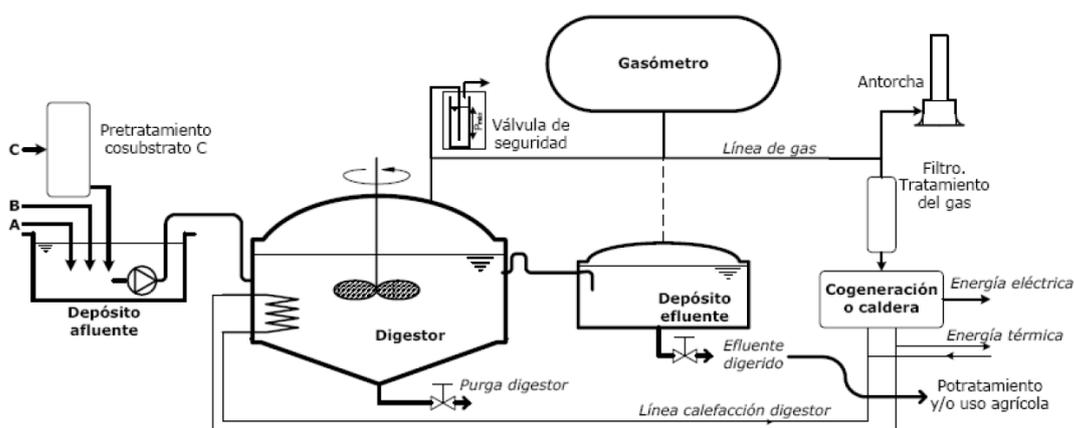


Figura 5. Diagrama de proceso general de una planta de biodigestión anaerobia [8]

Producción de biogás a partir de residuos generados en el sector hotelero para su autoabastecimiento desde el punto de vista energético



Mediante el pretratamiento de la alimentación, adecuando el tamaño de partícula, facilitando la hidrólisis o suministrando material o mezclas de materiales potencialmente productores de biogás (sustratos A, B y C) se inicia el proceso y se evitan problemas posteriores. La alimentación del proceso se lleva a cabo con las únicas premisas de que ésta contenga material fermentable, tenga características adecuadas para el correcto funcionamiento de la planta según su diseño, y tenga una composición y concentración relativamente estable. [8]

Además, al tratarse de un proceso biológico, se requiere asegurar una alimentación constante que no altere el metabolismo de los microorganismos implicados, y que por lo tanto no pueda afectar el rendimiento de la planta.

El biodigestor es el reactor biológico en el que ocurre el proceso bioquímico de degradación de la materia orgánica, que se ha explicado con más detalle en el apartado 2.1. de fundamentos teóricos sobre la producción del biogás, pero básicamente el proceso de biodegradación debe pasar por sus cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, formación de ácido acético (acetogénesis) y formación de metano o metanogénesis. Todos estos pasos del proceso se desarrollan en el interior del biodigestor, controlando su temperatura mediante calefactores de resistencia en la base del digestor, que aprovechan una pequeña fracción del biogás producido para mantener una temperatura adecuada en el interior del digestor.

Los digestores pueden tener forma cilíndrica, cúbica, ovoide o rectangular, aunque la mayor parte de los tanques que se construyen en la actualidad son cilíndricos. El suelo del reactor está inclinado, para que la arena, o cualquier material inorgánico sedimentable y la fracción pesada del afluente puedan ser extraídos del tanque. Los digestores modernos tienen cubiertas, fijas o flotantes, cuya misión es impedir que escapen olores, conservar la temperatura, evitar la entrada de oxígeno y recoger el gas producido. Pueden estar contruidos de distintos materiales desde poliuretano de alta densidad, cemento o acero inoxidable. [13]

Habitualmente, la parte superior del digestor, llamada cúpula o campana de gas se utiliza para almacenar el biogás que se genera. Esta campana de almacenamiento puede ser rígida o flotante. En algunos casos, está separada del digestor y se le llama gasómetro. En los tanques de cubierta fija, puede haber también un cierre de agua incorporado, para proteger la estructura del tanque del



exceso de presión positiva o negativa creada por la extracción del lodo o del gas si se realiza de forma apresurada.

La tubería entre el tanque de almacenaje de gas y el digestor puede también evitar las pérdidas del cierre de agua, si el paso no está cortado. Cuando se introducen líquidos en el digestor, el gas puede salir por la tubería hacia el tanque de almacenaje y cuando se extraen del digestor, el gas puede volver al tanque a través de la misma conducción. [13]

4.2. Codigestión

El término codigestión se utiliza para expresar la digestión anaerobia conjunta de dos o más sustratos de diferente origen. La ventaja principal radica en el aprovechamiento de la sinergia de las mezclas, compensando las carencias de cada uno de los sustratos por separado y , aumentando el potencial de producción de biogás por kilogramo de mezcla degradado. La codigestión de residuos orgánicos de diferente origen ha resultado una metodología exitosa tanto en régimen termofílico como mesofílico. [15]

El método consiste en el tratamiento conjunto de dos o más tipos de residuos orgánicos con el objetivo de aprovechar la complementariedad de las composiciones para permitir perfiles de proceso más eficaces. También permite compartir instalaciones de tratamiento, no siendo necesarios pretratamientos específicos para cada sustrato, unificando a su vez la metodología de gestión de los residuos aprovechados. Tiene la ventaja adicional de amortiguar las variaciones temporales en composición y producción de cada residuo por separado, y supone una reducción de costes de inversión y explotación.

La codigestión mediante el uso de sustratos es una variante tecnológica que puede solucionar problemas o carencias de un material, si son compensadas por las características de otro. Existen subproductos biodegradables, de diferentes orígenes, que tienen un bajo contenido de materia orgánica, o tienen una elevada cantidad de sólidos totales. En estos casos, la codigestión se presenta como una metodología óptima para este tipo de procesos. [8] [15]



En la Tabla 4 figuran los distintos tipos de residuos orgánicos más frecuentes tanto en cocina como en poda respectivamente. Como se puede observar, ambos sustratos se complementan mutuamente. Los residuos orgánicos de alimentos o frutas tienen pocos sólidos totales, lo que significa que no sería necesario un aporte de agua al digestor debido a la humedad de los propios residuos [11][16]. Esto se demuestra en las pieles de naranja, uno de los residuos más comunes de encontrar en cocina, ya que poseen aproximadamente un 75 % de humedad, lo cual facilita su digestión [12]. Por otra parte, residuos procedentes de poda como las hierbas son relativamente secos en comparación, suponiendo una dificultad en el proceso de biodigestión anaerobia de ser el único sustrato con el que se alimenta el proceso.

Tabla 4. Características y producción de biogás de algunos residuos orgánicos agroindustriales [16]

| Residuos | Sólidos Totales ST [%] | Sólidos Volátiles [% de ST] | C:N [-] | Sustancias NO deseables | Sustancias Inhibidoras | Problemas Frecuentes |
|---------------------|------------------------|-----------------------------|---------|----------------------------|------------------------|--|
| Residuos de fruta | 15-20 | 75 | 25 | Partes poco biodegradables | AGV, Pesticidas | Acidificación |
| Restos de alimentos | 10 | 80 | ND | Huesos, metales, plásticos | AGV, Desinfectantes | Acidificación, Sedimentos, Problemas mecánicos |
| Hierba | 20-25 | 90 | 12-25 | Piedras, arena, tierra | Pesticidas | Acidificación |

*ND: No determinado, AGV: Ácidos Grasos Volátiles

La proporción C:N de los sustratos también es crucial. Si esta proporción es demasiado elevada (mucho C pero no mucho N), el metabolismo inadecuado resultante puede hacer que el carbón presente en el sustrato no se convierta por completo, de manera que no se logrará el máximo rendimiento posible de metano. En el caso inverso, un exceso de nitrógeno puede llevar a la formación de cantidades excesivas de amoníaco (NH₃), el cual incluso en bajas concentraciones inhibirá el crecimiento de las bacterias y, en el peor de los casos, puede ocasionar el colapso completo de la población de microorganismos. Además, una gran proporción de C:N también implica una concentración baja en nitrógeno, lo que se traduciría en un digestato de baja calidad. [3][9]

5. USO DEL BIOGÁS Y DERIVADOS

Debido a su alto poder calorífico, el biogás producido en procesos de digestión anaerobia suele utilizarse como fuente de alimentación de diversos equipos, de entre los cuales cabe destacar los equipos de cogeneración y las cocinas de biogás.

- Equipos de cogeneración:

Los equipos de cogeneración sirven para aprovechar la energía mecánica de un motor de combustión interna alimentado por biogás que produce un movimiento rotacional y lo transforma en otro tipo de energías. En la generación de energía eléctrica, por ejemplo, aprovecha el movimiento del cigüeñal del motor de combustión interna para mover un generador eléctrico, y mediante inducción electromagnética genera una corriente alterna de energía.



Figura 6. Generador de biogás 3KW 220V 50Hz. Fuente: Proveedor



- Cocinas de biogás:

La adaptación de las cocinas para el consumo de biogás es muy sencilla y de bajo costo, siendo una alternativa atractiva a las cocinas de gas natural convencionales. El biogás empleado para cocción de alimentos no produce alteraciones en cuanto a olor y sabor de los alimentos terminados. [8]

Una de sus principales desventajas es la rápida corrosión de las ollas debido al ácido sulfúrico que el biogás produce, pero esta adversidad puede ser contrarrestada con filtros metálicos o con filtros orgánicos que absorban este ácido.



Figura 7. Cocina de biogás. Fuente: Proveedor

Una situación ideal sería implantar un pequeño sistema de cogeneración, que permitiría un ahorro en agua caliente y electricidad en épocas frías, junto con la conexión a la red para la venta eléctrica. En los meses de verano, venta a la red eléctrica o venta de biogás para su embotellado a presión. Generalmente, los costes asociados a instalaciones de gestión de residuos orgánicos mediante digestión anaerobia son elevados y la productividad es muy baja en términos de la energía contenida en el biogás respecto a la cantidad de residuo tratado. [8]



6. ESTUDIO DE VIABILIDAD

6.1. Datos de partida

Para este estudio de viabilidad se tuvo acceso a datos reales de un complejo hotelero de cinco estrellas situado actualmente en la zona sur de la isla de Tenerife. Se llevó a cabo un convenio de colaboración entre la Universidad de La Laguna y dicha entidad hotelera para la elaboración de este trabajo.

Esta cadena hotelera subcontrata los servicios de una empresa de gestión ambiental, que ha colaborado a su vez con el desarrollo de este trabajo. Los datos con los que se ha elaborado el estudio son aquellos proporcionados por dicha empresa encargada de la gestión ambiental de las instalaciones.

Como muestra la Figura 8, el complejo hotelero recibe una gran afluencia de huéspedes a lo largo del año, con una media de más de 7000 habitaciones ocupadas al mes y una tasa de ocupación que ronda el 65-70%. Esto implica que el establecimiento será capaz de generar grandes cantidades de materia orgánica, suficientes como para abastecer el biodigestor de forma regular, y esto se demuestra en los datos de residuos orgánicos del complejo hotelero.

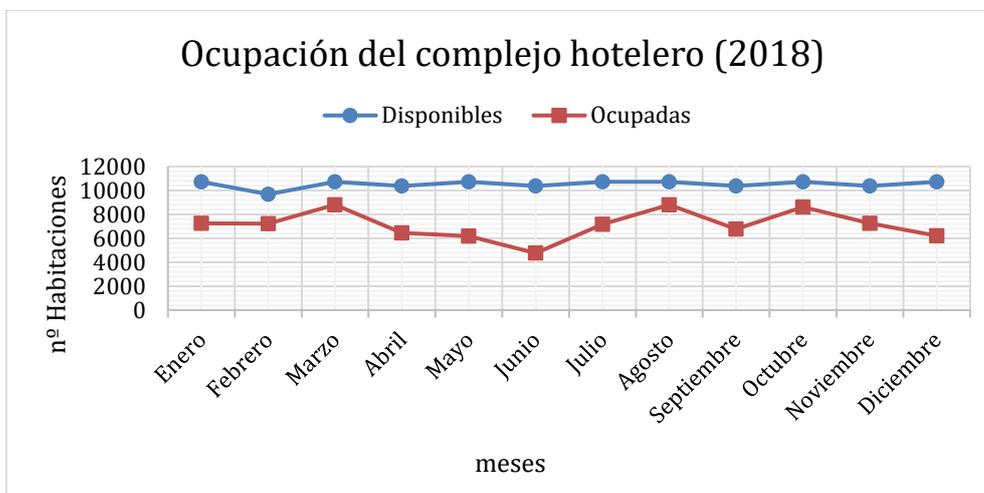


Figura 8. Datos de ocupación del complejo hotelero a lo largo del 2018, en número de habitaciones al mes. Fuente: Compañía de Gestión Ambiental

En la Tabla 5 se observa que, durante el año 2018, el complejo hotelero generó unas 49 toneladas de residuos orgánicos al mes, el equivalente a más de 1500 kg de fracción orgánica de media al día. Cabe destacar que esta cantidad engloba la totalidad de los residuos orgánicos generados en el complejo, y su aprovechamiento está fuera del alcance de este trabajo de Fin de Grado.

Tabla 5. Datos mensuales de fracción orgánica del hotel (2018).
Fuente: Compañía de Gestión Ambiental

| | Kg fracción orgánica | Kg fracción orgánica (sin impropio) |
|-------------------|----------------------|-------------------------------------|
| Enero | 59.000 | 47.200 |
| Febrero | 62.000 | 49.600 |
| Marzo | 68.900 | 55.120 |
| Abril | 60.700 | 48.560 |
| Mayo | 62.300 | 49.840 |
| Junio | 49.700 | 39.760 |
| Julio | 61.200 | 48.960 |
| Agosto | 73.100 | 58.480 |
| Septiembre | 59.900 | 47.920 |
| Octubre | 63.900 | 51.120 |
| Noviembre | 62.800 | 50.240 |
| Diciembre | 56.000 | 44.800 |



En este estudio se ha planteado como objetivo el aprovechamiento de aquella materia orgánica que sea más sencilla de separar, reduciendo significativamente la posible presencia de residuos impropios que puedan causar un problema durante el proceso de biodigestión. De entre los residuos orgánicos que genera el complejo, se decide contar principalmente con aquellos procedentes de la cocina central, donde se elabora el buffet del hotel (desayuno, almuerzo y cena) y con aquellos procedentes de la poda de jardín.

Tanto en la cocina central como en los jardines se dispone de un sistema de gestión de residuos, mediante el cual se intentan separar los distintos tipos de residuos que se pueden encontrar en estas zonas (véase plásticos, cartón, vidrio y fracción orgánica). Sin embargo, no se hace suficiente hincapié en la importancia de la separación de los residuos orgánicos, ya que van a parar a los contenedores para residuos generales.

Se estima que en cocina se genera una media de 80 kg de residuos orgánicos al día, y en cuanto a los residuos de poda, se espera contar con unos 100 kg al día. Con una correcta separación y recolecta de estos residuos, se pueden utilizar las fracciones orgánicas procedentes de estas zonas como sustratos para el tratamiento anaerobio llevando a cabo un proceso de codigestión.

Otro aspecto importante que se debe tener en consideración a la hora de realizar el estudio de la viabilidad de este proyecto es la disponibilidad de zonas en las cuales sea posible implementar una planta de tratamiento anaerobio en el interior del recinto. El complejo hotelero dispone de un espacio reducido para nuevos equipos, contando con unos 50 m² para la instalación de los biodigestores en el hotel, por lo que hay que tener en cuenta también esta condición a la hora de seleccionar los equipos adecuados para el proceso.



6.2. Estrategias para el aprovechamiento de residuos

La cantidad de residuos que genera el establecimiento puede ser aprovechado de forma óptima aplicando medidas de recogida selectiva y de gestión de residuos, como por ejemplo:

- Disponer del espacio y los instrumentos necesarios para una separación correcta de residuos. En este aspecto es importante que haya zonas en la cocina, el jardín o el sótano que dispongan de cubos destinados a la separación de la fracción orgánica, y bolsas compostables para permitir una aireación adecuada de los residuos. Esto a su vez reduce el problema de olores y la atracción por parte de moscas o otros animales.
- Llevar a cabo una correcta separación de los residuos orgánicos, con el objetivo de evitar la presencia de impropios en el sustrato. Para esto hay que tener claro qué residuos se consideran orgánicos y cuales no. Según la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, los residuos orgánicos o “biorresiduos” son todos aquellos residuos biodegradables de jardines y parques, residuos alimenticios y de cocina procedentes de hogares, restaurantes, servicios de restauración colectiva y establecimientos de venta al por menor; así como, residuos comparables procedentes de plantas de procesado de alimentos. Es de vital importancia formar e informar a los trabajadores del complejo para que tengan en cuenta qué residuos pueden separar, participando de forma activa y responsable en esta actividad.
- Evitar la mezcla con residuos procedentes de otras fracciones como el plástico o el vidrio. Esta estrategia está ligada a las anteriores, ya que para evitar la contaminación de la fracción orgánica es necesario realizar una correcta separación de residuos, y ser especialmente cuidadoso con la forma en la que se depositan los residuos orgánicos en los contenedores destinados al proceso de biodigestión. Una mala gestión y separación de estos residuos puede derivar en la presencia de impropios en el sustrato, los cuales inhiben la degradación y disminuyen la calidad del biogás y del digestato. [14]



6.3. Estudio técnico

Una vez conocidas las condiciones del establecimiento hotelero en el que se quiere implementar el sistema de biodigestión, se desea que la planta cuente con las etapas mencionadas en el apartado 3.3:

- Un proceso de pretratamiento y depósito para la alimentación.
- Un digestor, donde tiene lugar el proceso biológico.
- Una campana de gas o un gasómetro, para recoger el biogás producido.
- Otro depósito para el digerido (efluente).
- Proceso de Cogeneración Eléctrica/Térmica

De entre todas las ofertas de mercado referidas a biodigestores anaerobios, se eligió una casa proveedora especializada en el diseño, fabricación y distribución a nivel mundial de plantas de biodigestión a pequeña y gran escala, asequibles y de fácil instalación. Se barajaron tres modelos distintos de digestores para el proyecto:

- Sistema de tratamiento anaerobio compacto

Se trata de un sistema de biodigestión anaerobia en el que toda la instalación se encuentra en el interior de un contenedor. En la Figura 9 se puede observar que este sistema de biodigestión está compuesto por los siguientes equipos:

- 1) Un sistema de control para llevar un registro de las condiciones en las que está el sistema.
- 2) Una trituradora para el pretratamiento de los residuos orgánicos que alimentan el proceso.
- 3) Un sistema de control de pH.
- 4) Tres reactores anaerobios de acero inoxidable.
- 5) Equipos de desulfuración del biogás.
- 6) Un gasómetro en el que se almacena el biogás producido.
- 7) El contenedor en el que se encuentra todo el sistema.

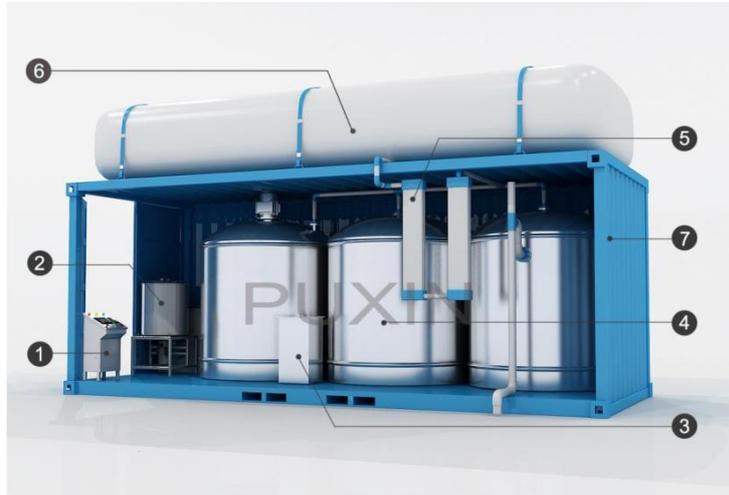


Figura 9. Esquema de tratamiento anaerobio compacto. Fuente: Proveedor

Entre las ventajas de este sistema caben destacar las siguientes:

- Instalación rápida y sencilla, gran parte del equipamiento viene ensamblado en el contenedor antes del envío.
- El biodigestor cuenta con un sistema de control de temperatura y mezclado automático.
- El gas que produce es almacenado, limpiado y quemado, y el sistema está diseñado de tal forma que no deja escapar olores. El digestato es inoloro si la fermentación es completa.
- Producción de biogás de hasta 30 m³/día.

Sin embargo, no se consideró adecuado para el proyecto debido a su coste elevado, alcanzando los 100.000€ por contenedor. Aun así las prestaciones que ofrece este sistema podrían resultar interesantes si se desea hacer una mayor inversión en el tratamiento de estos residuos orgánicos en el futuro.

Tabla 6. Datos de diseño del tratamiento anaerobio compacto. Fuente: Proveedor

| Residuos Alim. (kg/d) | Volumen Contenedor (m ³) | Volumen Digestor (m ³) | Producción Biogás (m ³ /d) | Electricidad (kWh/d) |
|--------------------------|---|---------------------------------------|--|-------------------------|
| 375,00 | 38,55 | 12,00 | 30,00 | 60,00 |



- Sistema de tratamiento anaerobio de 3,4 m³

Las plantas de tratamiento anaerobio de 3,4 m³ son biodigestores a pequeña escala, diseñados para el tratamiento de residuos orgánicos, especialmente aquellos procedentes de alimentos. En la Figura 10 se muestra el digestor de 3,4 m³, que está compuesto por:

- Un triturador de entrada de acero inoxidable, como tratamiento previo del sustrato.
- Una bomba de alimentación para el sustrato de entrada al digestor.
- Un biodigestor anaerobio, en el cual se produce la digestión de los sustratos.
- Soportes de hierro, y una cubierta semitransparente tipo invernadero, que evita el escape de calor del interior del digestor.
- Una bomba de recirculación del digestato.

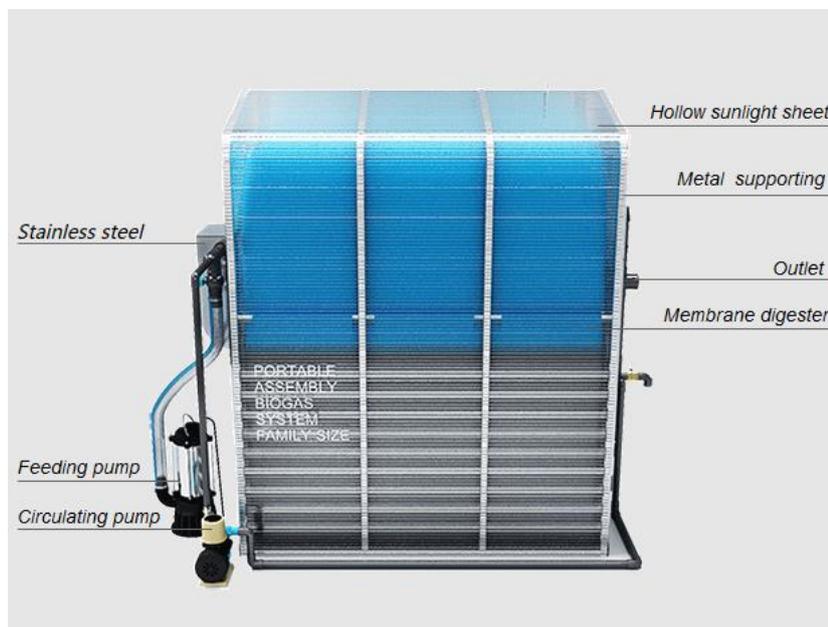


Figura 10. Esquema del sistema de tratamiento anaerobio de 3,4 m³. Fuente: Proveedor



Tiene la ventaja de ser un biodigestor superficial, lo que significa que no necesita estar bajo tierra ni son necesarias obras para su montaje. De hecho, puede ser ensamblado en solo 90 minutos, y tampoco requiere mano de obra cualificada para hacerlo, así que cualquier operario del complejo hotelero puede llevar a cabo el montaje. Además, de los tres equipos considerados para este proyecto es el más económico, suponiendo una inversión de menos de 1000 euros.

No obstante, como muestra la Tabla 7, los caudales de sustrato y biogás son demasiado bajos como para que la implementación de este tipo de sistemas reduzca de forma significativa los residuos orgánicos del complejo, por lo que esta opción también fue descartada.

Tabla 7. Datos de diseño del tratamiento anaerobio de 3,4 m³. Fuente: Proveedor)

| Residuos Alim. (kg/d) | Volumen Total (m ³) | Volumen Digestor (m ³) | Producción Biogás (m ³ /d) | Electricidad (kWh/d) |
|--------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--|-------------------------|
| 25,00 | 3,40 | 1,70 | 2,00 | 3,00 |

- Sistema de tratamiento anaerobio de 15 m³

Este sistema consiste en un biodigestor anaerobio de funcionamiento parecido al de 3,4 m³ pero de mayor volumen y mayor capacidad de obtención de biogás. La figura 11 muestra la estructura general de este modelo de biodigestor, que sigue la misma estructura que el tratamiento anaerobio de 3,4 m³:

- Un triturador de entrada de acero inoxidable, como tratamiento previo del sustrato.
- Una bomba de alimentación para el sustrato de entrada al digestor.
- Un biodigestor anaerobio, en el cual se produce la digestión de los sustratos.
- Soportes de hierro, y una cubierta semitransparente tipo invernadero, que evita el escape de calor del interior del digestor.
- Una bomba de recirculación del digestato.

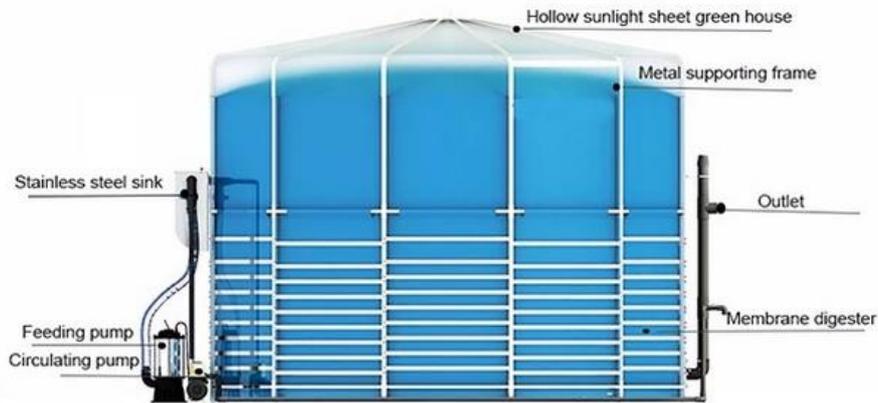


Figura 11. Esquema del sistema de tratamiento anaerobio de 15 m³. Fuente: Proveedor

Este sistema de biodigestión tiene ventajas similares que el sistema anaerobio de 3,4 m³, siendo un biodigestor superficial, fácil de ensamblar y con un precio competitivo (unos 7000 €). En este caso, el caudal de producción de biogás es más aprovechable que el de su contraparte, y es capaz de eliminar una cantidad de residuos orgánicos que se ajusta al estimado en los datos de partida, por lo que será este modelo el que se utilice para la producción de biogás en el complejo hotelero.

Tabla 8. Datos de diseño del tratamiento anaerobio de 15 m³. Fuente: Proveedor)

| Residuos Alim. (kg/d) | Volumen Total (m ³) | Volumen Digestor (m ³) | Producción Biogás (m ³ /d) | Electricidad (kWh/d) |
|-----------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| 180,00 | 15,00 | 13,28 | 15,00 | 22,50 |

Una vez conocido el sistema que se desea implementar, es necesario tener claro cuál es el diagrama del proceso que se llevará a cabo con este sistema. En la Figura 12 se pueden observar las etapas de las que está compuesta la planta de biodigestión anaerobia equipada con el sistema de tratamiento anaerobio de 15 m³.

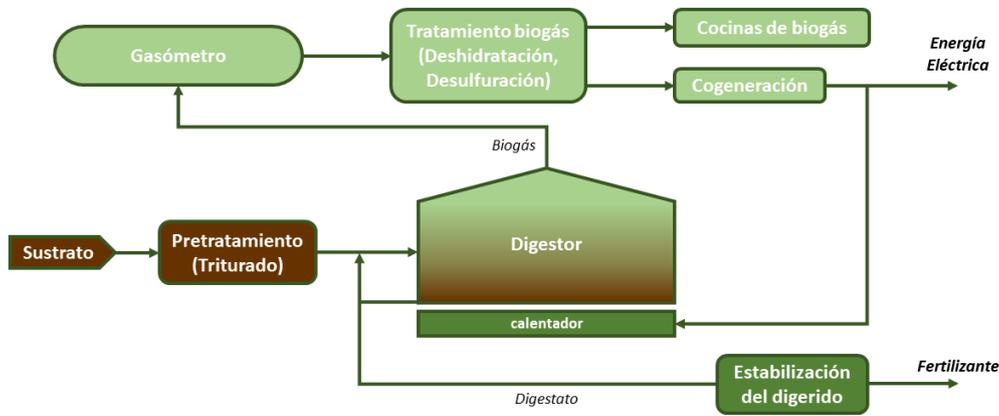


Figura 12. Diagrama de flujo del proceso de digestión anaerobio propuesto.

Para este tratamiento se decide emplear la codigestión, ya que no solo permite que se pueda alcanzar el caudal óptimo de la planta mediante el uso de las dos fracciones aprovechables del hotel (cocina y poda), sino que también permite perfiles de proceso más eficaces, tal y como se menciona en el apartado teórico de este proyecto.

El sustrato, compuesto por las fracciones orgánicas aprovechables del complejo, es sometido a un proceso de pretratamiento mediante triturado y homogeneización justo antes de su entrada al digestor. Una vez pretratado, el sustrato se degrada anaerómicamente con ayuda del cultivo de microorganismos hidrolíticos, acetogénicos, acidogénicos y metanogénicos situados en el interior del biodigestor, produciendo biogás y digestato. En el interior del digestor deben controlarse los cultivos de microorganismos y la presencia de azufre en el sustrato a digerir, por lo que es necesario añadir periódicamente compuestos fermentativos para las bacterias y gránulos de desulfuración para la reducción de sulfuros en la mezcla. Este control del proceso debe hacerse semestralmente.

El biogás obtenido es tratado antes de ser almacenado o consumido, pasando primero por un proceso de deshidratación para eliminar el hidrógeno presente en el gas de salida, y luego mediante desulfuradores se reduce la concentración en ácido sulfhídrico que pueda estar presente en el biogás.



Ese biogás puede ser aprovechado posteriormente mediante cogeneración, produciendo energía térmica o eléctrica suficiente como para alimentar los calefactores de las piscinas (siendo la potencia media necesaria para este tipo de equipos de unos 18 kWh), o para la iluminación exterior de parques o jardines del recinto. También se puede utilizar el biogás producido para alimentar las cocinas, cuyos quemadores necesitan ser adaptados para alimentarse del biogás producido.

Una pequeña parte del biogás es utilizada para alimentar el calentador eléctrico del digestor, el cual ajusta la temperatura del interior del digestor a la temperatura adecuada. Sin embargo, el uso de este calentador se reduce únicamente al arranque del proceso, pues una vez en régimen estacionario el digestor es capaz de mantener su temperatura de operación debido al calor que se genera en el interior del reactor por el proceso de biodigestión, y al efecto invernadero de la cubierta que evita la disipación de este calor. El biogás que no sea utilizado se almacena en un gasómetro.

Finalmente, la fracción líquida obtenida, llamada digestato, tiene excelentes propiedades fertilizantes, por lo que puede ser aprovechada tanto en los jardines del propio complejo, como en cultivos. Parte del digestato se recircula al sistema para reducir la concentración de posibles inhibidores en el proceso y retornar una parte de los microorganismos que se pierden en el digestato al digestor.

6.4. Estudio Normativo

En cuanto al marco legal que afecta a este tipo de plantas, el Decreto 112/2004, por el que se regula el procedimiento y requisitos para el otorgamiento de las autorizaciones de gestión de residuos, y se crea el Registro de Gestores de Residuos de Canarias, define la necesidad de obtener la Autorización Ambiental Integrada (AAI) para poder implantar este tipo de equipos de gestión de residuos, así como el concepto de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) como medida de protección del medio ambiente. No obstante, **las plantas con una capacidad inferior a 50 Tn/d**, que son las que atañen a este trabajo, **no requieren AAI** y por tanto las exigencias administrativas son mínimas.



Además, debido a normativas de ordenanza municipal sobre recogida y tratamiento de residuos, el complejo hotelero está obligado a pagar una serie de tasas para deshacerse de los residuos que producen sus instalaciones, la cual aumenta progresivamente si supera una cantidad límite de residuos y no se toman medidas para la reducción o el aprovechamiento de estos, lo que implica que la instalación de este sistema de aprovechamiento de residuos supone una ventaja fiscal que podría resultar interesante para la cadena hotelera.

6.5. Presupuesto

Los equipos utilizados para este estudio fueron solicitados al proveedor, el cual proporcionó un presupuesto acorde al proyecto presentado en el trabajo. En este caso, los equipos que componen la planta de biodigestión anaerobia adecuada para las condiciones de trabajo señaladas en este estudio son los siguientes:

- El digester de membrana del proceso, equipado con soportes de chapa de acero galvanizado y una cubierta semitransparente tipo invernadero, que evita el escape de calor del interior del digester. Modelo PX 15CBM D
- Dos sets de tuberías, uno de ellos de repuesto, para mantener conectado el sistema de biodigestión.
- Varias unidades de bacterias para la fermentación del biogás, las cuales aumentan la producción de biogás manteniendo estable el proceso microbiológico del biodigestor. Cada cierto tiempo hay que volver a añadir las para que la productividad del proceso sea la más óptima posible.
- Cocinas de biogás con dos quemadores, como opción adicional al aprovechamiento del biogás aparte del energético.
- Generador de biogás de 3KW, que funciona a 220V y a una frecuencia de 50Hz. El generador es capaz de producir hasta 22,5 kWh/día de energía eléctrica, y puede funcionar de forma continua durante 7,5 h.



- Deshidratador pequeño, modelo PX-0.6L, para disminuir la concentración de hidrógeno en el digestor, ya que un contenido de hidrógeno excesivamente alto impide la conversión de los productos intermedios de la acidogénesis.
- Dos métodos de desulfuración distintos, un filtro de desulfuración para el biogás y gránulos de desulfuración para el digestor. El control de la concentración de azufre en el proceso no solo evita los malos olores sino que evita la formación de sulfuros, los cuales a determinadas concentraciones inhiben la biodigestión.
- Un gasómetro de PVC modelo PX-CQD-HY30 para almacenar el biogás producido. Tiene una capacidad de almacenaje de hasta 30 m³.
- Una bomba de biogás de corriente alterna, que se alimenta de 20W a 220V para el transporte del biogás del digestor al gasómetro.
- Dos bombas de 100W modelo PX-100-1, para alimentar los quemadores de la cocina incluida en el presupuesto.
- Un caudalímetro modelo BF-2000, para el control del biogás producido mediante ultrasonido. Este caudalímetro permite una medición continua y la monitorización del caudal, así como de la calidad del gas.
- Una trituradora de residuos, con capacidad de hasta 226L. Este equipo se utiliza para homogeneizar la entrada de los distintos sustratos al digestor.
- Un calentador eléctrico, el cual permitirá regular la temperatura del digestor, manteniendo la temperatura de procesos óptima (entre 35 y 55 °C) en el interior del digestor.
- Una bomba de circulación que trabaja a 0,75KW, 220V y 50Hz. Tiene un medidor de flujo trifásico de hierro fundido DN50. Esta bomba es la que se utilizará para la recirculación de la fracción de digerido al biodigestor, ya que esto permite una dilución de posibles inhibidores y retorna una parte de los microorganismos que se pierden en el digestato al digestor.



Los costes de cada uno de estos equipos figuran en la Tabla 9, en la cual se detallan las cantidades de cada suministro, el precio de cada equipo por separado y el precio total del lote.

Tabla 9. Presupuesto inicial de maquinaria y equipos. Fuente: Proveedor

| Descripción Equipo | Unidades | Precio (\$/ud.) | Precio (€/ud.) | Precio Total (€) |
|---|----------|-----------------|----------------|------------------|
| Digestor de chapa de acero galvanizado PX 15CBM D | 1 | US\$3.115,00 | 2.772,35 € | 2.772,35 € |
| Set tuberías | 2 | US\$14,00 | 12,46 € | 24,92 € |
| Bacterias para la fermentación del biogás | 15 | US\$3,00 | 2,67 € | 40,05 € |
| Cocina de biogás con dos quemadores | 1 | US\$20,00 | 17,80 € | 17,80 € |
| Generador de biogás 3KW 220V 50Hz | 1 | US\$794,00 | 706,66 € | 706,66 € |
| Deshidratador pequeño PX-0.6L | 4 | US\$1,50 | 1,34 € | 5,34 € |
| Desulfurador de biogás PX-25L | 2 | US\$55,00 | 48,95 € | 97,90 € |
| Píldoras desulfuradoras Fe2O3 | 50 | US\$1,50 | 1,34 € | 66,75 € |
| Bolsa de almacenamiento de biogás de PVC 30m3 PX-CQD-HY30 | 1 | US\$610,00 | 542,90 € | 542,90 € |
| Bomba de biogás 220V AC 20W | 1 | US\$37,00 | 32,93 € | 32,93 € |



| Descripción Equipo | Unidades | Precio (\$) | Precio (€) | Precio Total (€) |
|--|----------|--------------|------------|-------------------|
| Bomba de biogás 100W PX-100-1 | 2 | US\$212,00 | 188,68 € | 377,36 € |
| Caudalímetro por ultrasonidos de biogás BF-2000 | 1 | US\$78,00 | 69,42 € | 69,42 € |
| Trituradora de residuos 226L (2.2KW, monofásica 220V 50Hz) | 1 | US\$1.524,00 | 1.356,36 € | 1.356,36 € |
| Calentador eléctrico (longitud: 100cm, ancho: 90cm, potencia máxima: 125W, ajuste de temperatura de 5 cambios) | 1 | US\$186,00 | 165,54 € | 165,54 € |
| BOMBA DE CIRCULACIÓN 0.75KW 220V 50Hz Medidor de flujo trifásico de hierro fundido DN50: 20m ³ /h velocidad: 2900rpm | 1 | US\$284,00 | 252,76 € | 252,76 € |
| Bomba de aguas residuales con cuchillo, flujo 22tox/hora (1.5KW, CA monofásica 220V/380V, 50HZ) Diámetro de salida: 50mm Altura máxima: 13m | 1 | US\$260,00 | 231,40 € | 231,40 € |
| Subtotal | 85 | US\$7.716,00 | | 6.867,24 € |

6.6. Estudio económico

Cuando se realizan este tipo de estudios de viabilidad, una de las consideraciones más cruciales es la rentabilidad económica del proyecto. Es por esto que es de gran interés llevar a cabo un estudio económico que permita establecer los posibles beneficios que es capaz de producir nuestra planta de biogás.

A la hora de realizar el estudio económico del proyecto, es necesario tener en cuenta los siguientes factores:



- Inversión:

La inversión inicial abarca todos aquellos equipos necesarios para el proceso básico de biodigestión anaerobia, los cuales fueron especificados en la Tabla 9. Para llevar a cabo el proyecto se deberá contar con una inversión inicial de menos de 7.000 euros.

- Ingresos y gastos:

El ingreso que se obtendrá a partir de la planta será directamente proporcional al biogás producido, el cual irá destinado a su vez a cubrir los gastos energéticos internos de la planta. La valoración del biogás en este caso viene dada por su conversión eléctrica mediante el uso de un generador, el cual es capaz de producir hasta 22,5 kW/día a partir del caudal de biogás que se obtenga del proceso, que se estima sean unos 15 m³/día. El precio del kWh a julio de 2019 es de unos 0,18 €/kWh (Fuente: Endesa), por lo que se estima un ingreso neto de unos **1478,25 € al año**.

Por otra parte, los únicos gastos que se tendrán en cuenta en este balance económico es el gasto eléctrico, ya que la instalación no requiere un caudal constante de agua. Los microorganismos vienen incluidos en el presupuesto inicial que figura en la Tabla 9, y si las condiciones de trabajo son óptimas y estables no será necesario ningún gasto adicional referido al cultivo bacteriano. Así pues, el consumo eléctrico total de todos los equipos para el arranque es de 3,2 kW, lo cual supone un gasto eléctrico de unos 210,24 €.

Cuando se llevan a cabo este tipo de estudios económicos, hay varios valores que indican la posible viabilidad de un proyecto y los beneficios que se pueden obtener con el mismo. Estos indicadores son:

- Rentabilidad Económica:

Podemos definir la rentabilidad como la relación entre los ingresos percibidos por la planta y el coste de adquisición de la maquinaria y el inmovilizado, siempre referido a un periodo de tiempo de un año.



$$\text{Rentabilidad Económica: } \frac{\text{Ingresos Netos}}{\text{Activo Total}}$$

Ecuación 3. Rentabilidad Económica

Los ingresos netos pueden definirse como la diferencia entre los ingresos brutos y los gastos anuales, en este caso:

$$\text{Ingreso neto} = \text{Ingreso bruto anual} - \text{gasto anual} = 1478,25 - 210,24$$

$$\text{Ingreso neto} = 1268,01 \text{ €/año}$$

$$\text{Rentabilidad Económica: } \frac{1268,01}{6867,24} = 0,18 = \mathbf{18\%}$$

La rentabilidad es positiva, pero no suficientemente buena. Esto se debe principalmente a que hacen falta varios años para que el retorno de la inversión sea completo, y también influye que, en el estudio económico, no se haya tenido en cuenta el digestato producido durante la biodigestión debido a la dificultad de estimación de su producción en este tipo de procesos. Sin embargo, el resultado no deja de ser positivo, lo cual significa que a largo plazo es posible obtener beneficios.

- Valor Actual Neto (VAN):

Es un criterio de inversión que consiste en actualizar los cobros y pagos de un proyecto o inversión para conocer cuánto se va a ganar o perder con esa inversión. Para ello se actualiza el valor de todos los flujos de caja descontándoles un tipo de interés determinado. El VAN expresa una medida de rentabilidad del proyecto en términos absolutos netos, es decir, en número de unidades monetarias (euros).

Al igual que el TIR (Tasa Interna de Retorno), actúa como indicador de rentabilidad de un proyecto.

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{(1 + T.I.)^i}$$

Ecuación 4. Valor Actual Neto (VAN)

*(I = inversión que se realiza en el momento inicial; Q_i = flujo de dinero o "cash flow" en cada periodo t;
T.I. = tipo de descuento o tipo de interés exigido a la inversión [5%])*

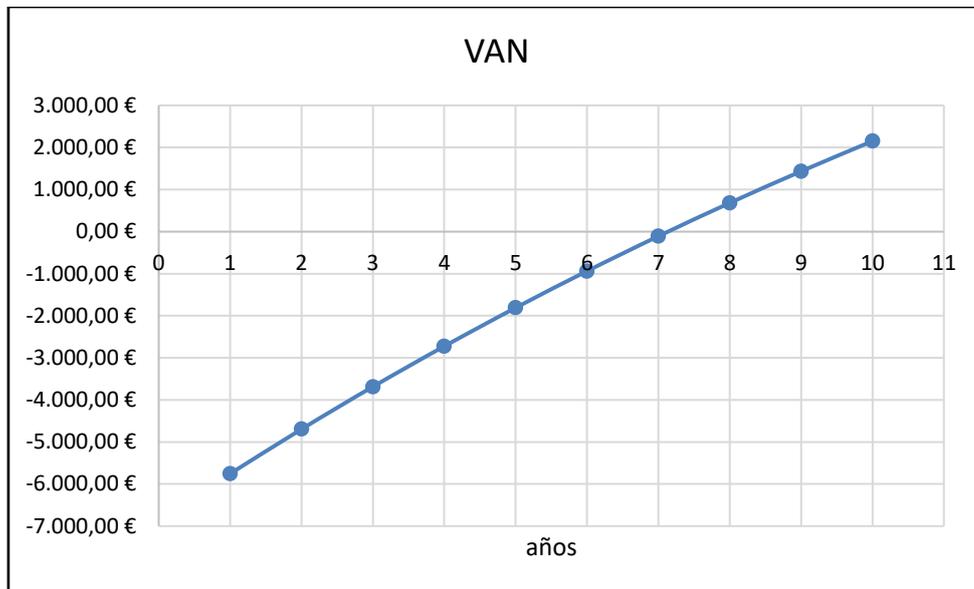


Figura 13. Evolución del VAN estimado respecto al tiempo

Como se puede observar en la Figura 13, El punto a partir del cual el VAN empieza a ser positivo se sitúa en torno al séptimo año desde que se realizó la inversión inicial. A ese punto se le conoce como retorno de la inversión o “Payback”. El retorno de la inversión no es el mejor posible, teniendo en cuenta que el tiempo de vida óptimo del biodigestor se sitúa en los 10 años, sin embargo tal y como se mencionó en el apartado anterior, no se tienen en cuenta factores importantes que se aportan en esta inversión, como el subproducto de la biodigestión o el aprovechamiento de residuos orgánicos del complejo, lo cual supondría a su vez un ahorro en los costes de tratamiento de dichos residuos.

- Tasa Interna de Retorno (TIR):

Es la tasa de interés o rentabilidad que ofrece una inversión. Es decir, es el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión para las cantidades que no se han retirado del proyecto. También se define como el valor de la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero, para un proyecto de inversión dado.



$$VAN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{(1 + TIR)^i} = 0$$

Ecuación 5. Tasa Interna de Retorno (TIR)

*(I = inversión que se realiza en el momento inicial; Q_i = flujo de dinero o "cash flow" en cada periodo t;
VAN = Valor Actual Neto, que para el cálculo del TIR debe ser igual a 0)*

La tasa interna de retorno (TIR) nos da una medida relativa de la rentabilidad, es decir, va a venir expresada en tanto por ciento. Para calcularla es necesario realizar iteraciones, hasta que el valor final del VAN sea igual a cero. En este caso se obtiene una Tasa Interna de Retorno del **11%**, superior a la tasa mínima de rentabilidad del 5%, que fue la utilizada para el cálculo del VAN. Esto quiere decir que el proyecto será aceptable, ya que la tasa de rendimiento obtenida es mayor a la exigida.

- Retorno de la Inversión (ROI):

El ROI (Return On Investment) es el valor económico generado como resultado de la realización de diferentes actividades o proyectos. Consiste en calcular el cociente entre los beneficios medios y el capital total medio invertido. Este resultado es comparado con la rentabilidad mínima, al igual que el TIR.

Con este dato, se puede estimar el rendimiento que es obtenido de una inversión. El ROI es de gran utilidad para evaluar esta rentabilidad, pues nos permite saber cuántos beneficios se han generado por cada euro invertido. Sin embargo, no considera el valor temporal del tiempo en los flujos de caja, y además solo la parte que excede de la unidad es rentabilidad en un sentido estricto.

$$ROI = \frac{\text{Beneficios}}{\text{Inversión}} = \frac{1168,01}{7867} = 0,148 \approx \mathbf{15\%}$$



7. Conclusiones

- La biodigestión es un método ampliamente empleado y recomendado para la valorización de residuos orgánicos.
- El sector hotelero puede beneficiarse de este tipo de tecnologías aprovechando la materia orgánica que se genera en sus complejos, reduciendo el impacto ambiental de sus instalaciones y obteniendo un beneficio tanto económico como social.
- Como productos de la biodigestión se obtiene biogás y un digerido, ambos perfectamente aprovechables dentro de las instalaciones del hotel.
- El biogás está compuesto en su mayoría por metano, por lo que se podría emplear para la generación de energía eléctrica y/o energía térmica, la cual podría ser aprovechada para alimentar los calefactores de las piscinas o para la iluminación exterior de parques o jardines del recinto.
- El digerido puede emplearse como fertilizante, dando resultados satisfactorios tanto en jardinería como en cultivos agrarios. Esto puede ser aprovechado tanto en los jardines del propio complejo, como en cultivos.



- El diseño y la construcción de un biodigestor son bastante simples, y bajo el asesoramiento de proveedores especializados es posible adquirir equipos destinados a la biodigestión realizando una inversión inicial razonable.
- La codigestión favorece la formación de una mayor cantidad de biogás debido a la complementariedad de las composiciones de cada uno de los sustratos. Además, se amortiguan las variaciones temporales en composición y producción de cada residuo por separado.
- La implementación de este tipo de sistemas de tratamiento de residuos a pequeña escala ofrece una serie de ventajas fiscales, como reducción de tasas por recogida y tratamiento de residuos, sin necesidad de obtener la Autorización Ambiental Integrada u otro tipo de documentación específica.
- La planta de biodigestión anaerobia elegida para este proyecto es capaz de tratar 180 kg de residuos orgánicos al día, procedentes de los residuos generados en cocina y en poda.
- La instalación es capaz de generar hasta 22,5 kW/día a partir del caudal de biogás que se obtenga del proceso, que se estima sean unos 15 m³/día. Esto supone un ingreso neto, procedente de la valorización energética del biogás, de unos 1478,25 € al año.
- El Valor Actual Neto (VAN) del proyecto empieza a ser positivo en torno al séptimo año desde que se realizó la inversión inicial, y el TIR es de aproximadamente un 11%, superior a la tasa mínima de rentabilidad del 5%, que fue la utilizada para el cálculo del VAN. Esto implica que el proyecto será aceptable, ya que la tasa de rendimiento obtenida es mayor a la exigida.
- La rentabilidad económica del proyecto es del 18%, y su retorno de inversión ronda el 15%. Valores positivos que indican que el proyecto resulta económicamente rentable.



8. Bibliografía

- [1] Gobierno de Canarias, Exceltur. *Estudio de Impacto Económico del Turismo: IMPACTUR* (2017). <https://www.exceltur.org/wp-content/uploads/2018/07/IMPACTUR-Canarias-2017.pdf> [Consulta: 11 de agosto del 2019]
- [2] Seguí, L., Medina, R. y Guerrero, H. *Gestión de residuos y economía circular* (2018). EAE Business School. http://marketing.eae.es/prensa/SRC_Residuos.pdf [Consulta: 11 de agosto 2019]
- [3] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. *Leitfaden Biogas* [Guía Sobre el biogás] (2010)
- [4] Obaya, M., Lorenzo Acosta, Y. *La Digestión Anaerobia. Aspectos Teóricos. Parte 1*. Cuba (2005).
- [5] Rodríguez, S. *Tecnologías de biodigestión aplicadas al turismo* (2015). Trabajo de Fin de Grado. Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología. Universidad de La Laguna



- [6] Hilbert, J. A. *Manual para la producción de biogás*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Castelar, Argentina (2011).
- [7] Agro Waste. *Digestión Anaerobia*. http://www.agrowaste.eu/?page_id=195 [Consulta: 2 de agosto del 2019]
- [8] Agro Waste, GF innovación y tecnología. *Estudio de viabilidad de una planta de biogás*. http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/ECONOMIC_STUDY_BIOGAS.pdf [Consulta: 2 de agosto del 2019]
- [9] Gutierrez, N. *Estudio de los efectos de un digestato, procedente de una digestión anaerobia de residuos agroalimentarios, en un cultivo de lechuga (Lactuca sativa L.)*. (2018). Trabajo de Fin de Grado. Sección de Ingeniería Agraria. Universidad de La Laguna
- [10] Dr. S. Govindaradjane, Dr. T. *Influence of Organic Loading Rate (OLR) and Hydraulic Retention Time (HRT) on the performance of HUASB and UASB reactors for treating tapioca-based starch industrial waste stream: A comparison*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). Marzo 2013, Volumen 2, Tercera Edición ISSN: 2278-0181. <https://www.ijert.org/influence-of-organic-loading-rate-olr-and-hydraulic-retention-time-hrt-on-the-performance-of-huasb-and-uasb-reactors-for-treating-tapioca-based-starch-industrial-waste-stream-a-comparison#cite> [Consulta: 31 de agosto 2019]
- [11] Foster, T. *Digestión anaerobia seca del residuo urbano: funcionamiento del reactor y variables de operación*. Dpto. de Ingeniería Química, Tecnológica de Alimentos, y Tecnología del Medio Ambiente. Universidad de Cádiz (2014)



- [12] M'hiri et al. *Proximate chemical composition of orange peel and variation of phenols and antioxidant activity during convective air drying*. Journal of new sciences, Agriculture and Biotechnology. Septiembre 2017, Volumen JS-INAT(9), pp. 881-890.
- [13] Varnero, M.T. (2011). *Manual del Biogás*. Santiago de Chile: Ministerio de Energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility.
- [14] Gandhi, P., Kumar, S., Paritosh, K. et al. *Hotel Generated Food Waste and Its Biogas Potential: A Case Study of Jaipur City, India*. Springer, Waste and Biomass Valorization, Junio 2019, Volumen 10, sexta edición, pp. 1459–1468. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0153-1> [Consulta: 15 de agosto del 2019]
- [15] García, K. *Codigestión anaerobia de estiércol y lodos de depuradora para producción de biogás*. Trabajo de Fin de Máster. Universidad de Cádiz (2009)
- [16] Centro Tecnológico Ainia, Dept. Calidad y Medio Ambiente. *Valorización energética: producción de biogás mediante codigestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales*. https://www.coitavc.org/cms/site_0001/comunicados/AINIA [Consulta: 20 de agosto del 2019]



9. MARCO LEGAL Y ADMINISTRATIVO

A pesar de no considerado las ventajas fiscales de este tipo de tratamiento de residuos en el apartado económico, como pueden ser la reducción de la tasa de tratamiento y eliminación de residuos, es importante tener en cuenta qué normas hay que considerar a la hora de realizar un proyecto como el que se presenta en este estudio de viabilidad. Entre la normativa vigente aplicable al ámbito del aprovechamiento energético y producción de biogás, caben destacar las siguientes:

9.1. Legislación de la UE

- Directiva Marco de Residuos 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008.
- Directiva 2008/1/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de enero de 2008, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación.
- Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE.
- Directiva 91/676/CEE, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos procedentes de fuentes agrarias.



9.2. Legislación nacional

- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- Real Decreto 180/2015, de 13 de marzo, por el que se regula el traslado de residuos en el interior del territorio del Estado.
- Real Decreto 900/2015, de 9 de octubre, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas de las modalidades de suministro de energía eléctrica con autoconsumo y de producción con autoconsumo.
- Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.
- Resolución del 16 de noviembre de 2015, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 6 de noviembre de 2015, por el que se aprueba el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022.
- Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental.

9.3. Legislación autonómica

- Ley 1/1999, de 29 de enero, de residuos de Canarias.
- Decreto 112/2004, de 29 de julio, por el que se regula el procedimiento y requisitos para el otorgamiento de las autorizaciones de gestión de residuos, y se crea el Registro de Gestores de Residuos de Canarias.
- Decreto 49/2000, de 10 abril, por el que se determinan las masas de agua afectadas por la contaminación de nitratos de origen agrario y se designan las zonas vulnerables por dicha contaminación