



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

**MASTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DISEÑO DE UN SISTEMA ANAEROBIO DE AUTOCONSTRUCCIÓN Y BAJO
COSTE PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS FECALES Y OTROS RESIDUOS
ORGÁNICOS EN ZONA RURAL.**

Autor: Marco Antonio Andía Quispe
Tutor: Sara Isabel Pérez Elvira

Valladolid, Setiembre, 2025



RESUMEN

El presente proyecto técnico tiene como objetivo de diseñar un sistema anaerobio de autoconstrucción y bajo coste para el tratamiento de lodos fecales y otros residuos orgánicos en zona rural. Para desarrollar este trabajo tomaremos como punto de partida los valores típicos de la caracterización de un agua residual urbana que genera una determinada población, selección de una alternativa a diseñar de bajo coste, dimensionamiento y diseño, cálculos del proceso y la estimación del biogás generado.

ABSTRACT

The objective of this technical project is to design a self-built, low-cost anaerobic system for the treatment of fecal sludge and other organic waste in rural areas. To develop this work, we will take as a starting point the typical values of the characterization of urban wastewater generated by a certain population, selection of a low-cost alternative to design, sizing and design, process calculations, and estimation of the biogas generated.



INDICE

1.INTRODUCCION.....	4
2.OBJETIVOS.....	5
3. ESTADO DEL ARTE.....	5
3.1. Legislacion.....	5
3.2. Situación de depuración en aglomeraciones urbanas.....	7
3.3. Alternativas de depuración y comparación cualitativa de tratamientos en pequeñas poblaciones.....	9
3.5. Selección de la tecnología a proponer.....	12
3.6. Oportunidades de anaerobio.....	15
4. METODOLOGIA DE ESTUDIO.....	18
4.1. Casos de estudio.....	18
4.2. Base de diseño.....	19
4.2.1. Generalidades sobre el agua residual urbana en zonas rurales	19
4.2.2. Límites de batería del proyecto.....	20
4.2.3. Datos de partida y límites de vertido.....	21
4.2.4. Diagrama de flujo.....	20
4.3. Balance de materia.....	21
4.3.1. Cálculo de balance de materia.....	23
4.3.2. Calculo de flujo de biogás	24
4.4 Línea de agua: Dimensionamiento preliminar.....	24
4.5 Línea de gas.....	24
5. CONCLUSIONES.....	27
6. REFERENCIAS.....	28



1. INTRODUCCION.

El acceso a un saneamiento adecuado es todo un reto en muchas zonas rurales del mundo, que debido a contar con áreas agrestes y poca población que justifique el uso de recursos económicos por parte de los gobiernos, para invertir y construir una infraestructura adecuada para el tratamiento de lodos fecales y otros residuos orgánicos, lo que origina la carencia de proyectos de sistemas de saneamiento en zonas rurales y la gestión ineficiente de los residuos que se generan, trae como consecuencia impactos ambientales significativos como por ejemplo la contaminación de las fuentes de agua, la propagación de enfermedades en la población y la emisión de gases efecto invernadero a la atmosfera.

Al respecto, se plantea un proyecto técnico, donde se empleará la digestión anaerobia para tratar las aguas residuales y generar biogás. La aplicabilidad del proyecto será en zonas rurales con climas cálido, carentes de sistemas de saneamiento y con escasos recursos económicos.

Asimismo, la propuesta de este proyecto técnico persigue sustituir el empleo de alternativas menos sostenibles como fuente de combustible en las cocinas (estufas de leña, carbón, o combustibles fósiles), por biogás generado en el tratamiento de aguas residuales por sistemas anaerobios, logrando de esta manera un saneamiento eficiente de los residuos orgánicos, reduciendo la carga contaminante y generando subproductos valiosos como el biogás



2. OBJETIVO.

Este Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo el diseño y dimensionamiento de un sistema anaerobio adecuado, de bajo coste y adaptable a poblaciones rurales en España, en las comunidades de Andalucía en las zonas de Guadalquivir y la costa mediterránea, Murcia, comunidad Valenciana y zonas de las islas Canarias que tienen temperaturas favorables para este tipo de alternativa de tratamiento del agua residual, promoviendo la autoconstrucción con materiales accesibles y tecnología apropiada para dichas zonas, proponiendo además un diseño de sistema anaerobio que reducirá la carga contaminante y generará un producto valioso como el biogás que puede utilizarse con fuente de energía renovable.

3. ESTADO DEL ARTE.

3.1. Legislación.

La normativa que obliga a España por ser miembro de la Unión Europea, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas, es la Directiva (UE) 2024/3019 del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de noviembre del 2024, en el que se establece la recogida, el tratamiento y vertido de las aguas residuales urbanas con el objetivo de proteger el medio ambiente, la salud humana, reducir emisiones de gases de efecto invernadero hasta lograr niveles sostenibles, mejorar el balance energético de las actividades de recogida y tratamiento de aguas residuales urbanas, contribuyendo a la transición hacia una economía circular. Asimismo, también se establecen normas sobre el acceso al saneamiento para todos, la transparencia del sector de las aguas residuales urbanas, la vigilancia de los parámetros pertinentes para la salud pública en las aguas residuales urbanas y la aplicación del principio de “quien contamina, paga”.

Al respecto en esta Directiva, se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. Cabe resaltar que lo dispuesto en esta Directiva es que las aglomeraciones urbanas que tengan un mínimo de 2.000 h-e (habitantes equivalentes), deben contar con sistemas colectores y extiende esa obligación incluso



a las aglomeraciones urbanas con un mínimo de 1.000 h-e, pero menos de 2.000 h-e otorgándole un plazo hasta el 31 de diciembre del 2035 para su cumplimiento.

Asimismo, las aguas residuales que generan estas aglomeraciones urbanas, deben ser tratadas de acuerdo a lo dispuesto en la Directiva (UE) 2024/3019 del 27/11/24, para vertidos en aguas continentales y marítimas de acuerdo a la tabla 1 donde se indican los tratamientos en base al tamaño de aglomeraciones por habitantes equivalentes [01].

Tabla 1 Tratamientos según tamaño de aglomeraciones por habitantes equivalentes Fuente: Elaboración propia a partir de la Directiva (UE) 2024/3019

Vertido (Aguas marítimas)				
Tamaño de aglomeración	Zonas menos sensibles	Zona normal	Zonas sensibles	
0 - 1000 h-e	Sistemas individuales	Sistemas individuales	Sistemas individuales	
1000 - 2000 h-e	Tratamiento primario	Tratamiento primario	Tratamiento primario	
2.000 - 10.000 h-e	Tratamiento secundario	Tratamiento secundario	Tratamiento secundario	
10.000 - 150.000 h-e	Tratamiento secundario	Tratamiento secundario	Tratamiento más riguroso	
Vertido (Aguas continentales y estuarios)				
Tamaño de aglomeración	Zona menos sensible	Zona normal alta montaña	Zona normal	Zona sensible
0 - 1.000 h-e	Sistemas individuales	Sistemas individuales	Sistemas individuales	Sistemas individuales
1000 - 2.000 h-e	Tratamiento primario	Tratamiento primario	Tratamiento primario	Tratamiento primario
2.000 – 10.000 h-e	tratamiento secundario	tratamiento secundario	tratamiento secundario	Tratamiento terciario
10.000 – 150 000 h-e	Tratamiento secundario	tratamiento secundario	Tratamiento secundario	Tratamiento más riguroso

Sistemas individuales significa una instalación de saneamiento que recoge, almacena, trata o elimina aguas residuales domésticas de edificios o partes de edificios no conectados a un sistema colector.



Tratamiento primario significa el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso físico o químico, o ambos, que implica la sedimentación de sólidos suspendidos, u otros procesos en los que la DBO5 de las aguas residuales entrantes se reduce al menos en un 20 % antes del vertido y los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales entrantes se reducen al menos en un 50 %.

Tratamiento secundario significa el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso que generalmente implica un tratamiento biológico con una decantación secundaria u otro proceso que reduce la materia orgánica biodegradable de las aguas residuales urbanas.

tratamiento terciario significa el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso que reduce el nitrógeno o el fósforo, o ambos, en las aguas residuales urbanas.

3.2. Situación actual de la depuración en aglomeraciones urbanas.

A finales del año 2023 España ostentaba el récord de ser el país de la Unión Europea con mayor número de incumplimientos, por no recoger las aguas residuales y tratarlas, no protegiendo de esta forma el medio ambiente y la salud humana de los efectos adversos de los vertidos de aguas residuales. Por este motivo tiene 21 expedientes abiertos en la Unión Europea. El 33 % de estas infracciones está relacionado por incumplir con la Directiva 91/271/CEE del Consejo, del 21 de mayo de 1991 de aguas residuales urbanas, que protege el medio ambiente y la salud humana, motivo por el cual la comisión europea decidió llevar a España ante el tribunal de justicia de la Unión Europea, exigiendo el cumplimiento de dicha Directiva [02].

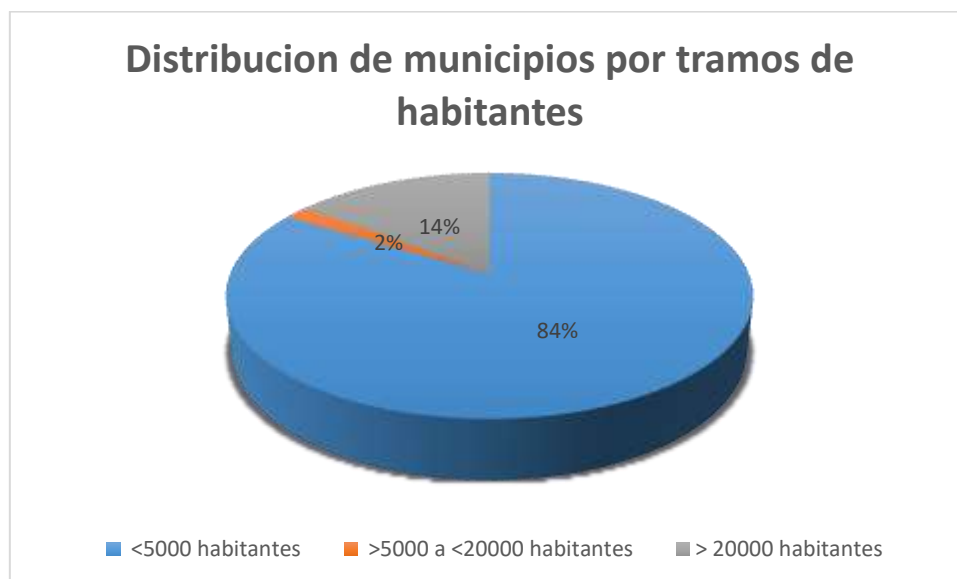
En España hay 29 aglomeraciones urbanas donde aún no se asegura la disponibilidad de sistemas colectores y en 225 aglomeraciones urbanas no cumplen con el tratamiento exigido a toda la carga contaminante para su posterior vertido. La falta de depuración se refiere a la concentración en sólidos en suspensión, la demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno, el incumplimiento del límite de



nitrógeno y fosforo en aguas depuradas vertidas a cauces declarados como zonas sensibles [02].

Asimismo, en España existen 8.132 municipios, de los cuales 6.810 municipios no superan los 5.000 habitantes. Esta despoblación se observa en zonas rurales. Los habitantes de estos municipios representan el 12 % de la población total de España y son conocidos como municipios de reto demográfico. Asimismo, a esto se suman 147 municipios que cuentan con 5.000 y 20.000 habitantes aproximadamente y al encontrarse ubicados en zonas no urbanas son denominados núcleos rurales y representan el 2.2% de la población española [3] [4].

Grafica 1 Distribución de municipios por tramos de habitantes Fuente: Elaboración propia



Al respecto, ambas tipologías suman **6.957** que representan el **86% de la cantidad de municipios de España que tienen población entre 5.000 y 20.000 habitantes**. Esta pérdida de habitantes dificulta mantener los servicios básicos de saneamiento debido a que el presupuesto que otorga el estado español es distribuido en base a la cantidad de población que habita en cada municipio [3] [4].

Para estas poblaciones, el tratamiento de las aguas residuales se realiza mediante gestión directa o indirecta, en los municipios pequeños de escasos recursos adoptan



formas de gestión mancomunada o asociada entre varios municipios para el tratamiento de sus aguas residuales que resulta más eficiente desde un punto de vista técnico como económico [5].

El diseño y dimensionamiento de los sistemas depuración de estas aglomeraciones urbanas se ha realizado copiando a pequeña escala a los sistemas depuración de grandes núcleos. No se realizan estudios previos de caudales, carga contaminantes y elección de tecnología adecuada [5]. Asimismo, resolver el problema de depuración no es cuestión de disponibilidad tecnológica, sino del acierto en la selección tecnológica en base a los estudios previos realizados [5].

3.3. Alternativas de depuración y comparación cualitativa de tratamientos en pequeñas poblaciones.

El criterio que deben adoptar los municipios al elegir una alternativa para depurar las aguas residuales son los requerimientos ambientales del cauce receptor, la naturaleza del agua residual de la población, condiciones climatológicas, superficie, tecnologías de bajo coste y aprovechamiento de los procesos naturales [5]. Las alternativas de depuración que detallaremos a continuación son las más relevantes y más comunes en base a la situación actual de depuración en aglomeraciones urbanas antes mencionado en el apartado 3.2. Asimismo, **el rango de población que tiene por objeto de estudio este proyecto técnico oscilará entre 1.000 y 20.000 h-e.**

Tanque imhoff es una tecnología que consiste en un depósito donde se distinguen dos zonas claramente separadas, la parte superior que es la zona de sedimentación donde se produce la decantación de sólidos, y una parte inferior donde se almacenan y digieren los sólidos decantados. Ambas zonas se encuentran separadas físicamente por una estructura en forma de casa invertida abierta en el fondo que impide el paso de los gases de la zona de digestión a la zona de sedimentación evitando de esta manera que afecten a la decantación de los sólidos [5].

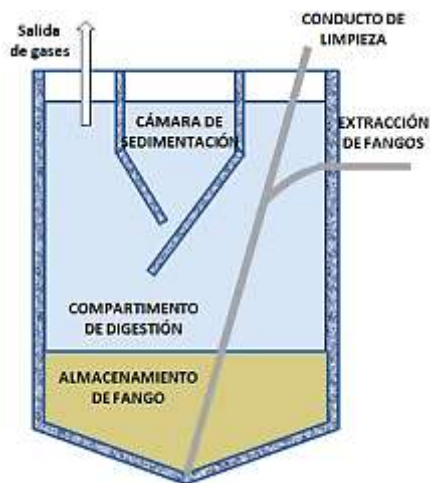


Ilustración 1 Tanque imhoff Fuente: Confederación Hidrográfica del Duero (2019)

Humedal artificial es una tecnología de bajo coste y en donde se aprovecha la capacidad física, química y biológica del suelo para depurar las aguas residuales. La capacidad física dependerá de la granulometría del suelo, la capacidad química dependerá de la asimilación de sustancias químicas como nutrientes por parte de las plantas y la capacidad biológica dependerá de la metabolización por microorganismos de la materia orgánica. Estos microorganismos pueden eliminar hasta 85% de la materia orgánica [6].

Lagunaje es una tecnología que reproduce de forma natural los procesos de autodepuración que tiene el curso del agua y consta de varias lagunas conectadas en serie en donde se producen procesos físico químicos y biológicos, depurándose las aguas gradualmente [5].

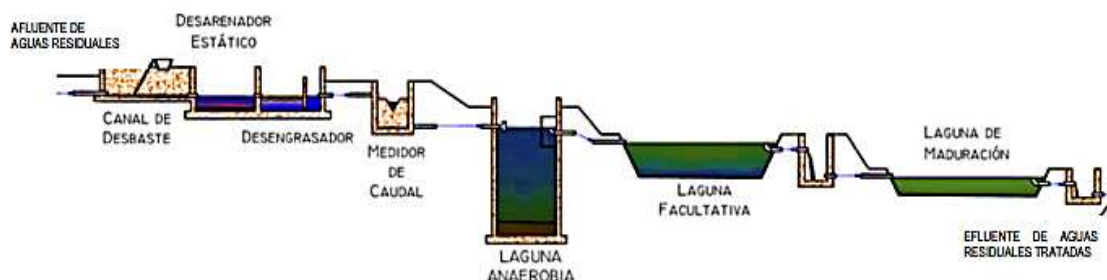


Ilustración 2 Lagunaje Fuente: Confederación Hidrográfica del Duero (2019)

Aireaciones prolongadas es un proceso de tratamiento biológico de aguas residuales y consta de cuatro partes diferenciadas como la oxidación biológica donde el agua entra el reactor biológico el cual contiene un cultivo bacteriano en suspensión compuesto por microorganismos que se encargan de degradar la materia orgánica en condiciones aerobias, posterior el efluente pasa a un decantador secundario que separa los sólidos del líquido, asimismo el fango es retornado al reactor y se extrae los fangos en exceso [5].



Ilustración 3 Aireaciones prolongadas Fuente: Confederación Hidrográfica del Duero (2019)

Asimismo, se detalla una tabla para comparar las alternativas de depuración antes mencionadas indicando sus ventajas y desventajas en su operación.

Tabla 2 Comparación de alternativas Fuente: Elaboración propia a partir de la Confederación Hidrográfica del Duero (2019)

Tamaño de población	Tipo de tratamiento	Sistema de depuración	Ventaja	Desventaja
1.000 - 20.000 h-e	Tratamiento primario	● Tanque imhoff	● Bajo coste ● Aptitud para climas diversos ● Consumo energético nulo	● Produce malos olores ● Inestabilidad ante sobrecargas ● Necesidad de extracción de lodos
	Tratamiento secundario	● Humedal artificial	● Bajo coste ● Facilita la repoblación forestal ● Mejora la calidad del agua	● Riesgo de contaminación de acuífero ● Requiere abundante superficie ● Produce malos olores
	Tratamiento secundario	● Lagunaje	● Bajo coste ● Bajo consumo energético ● Adaptabilidad	● Limitaciones climáticas ● Requiere abundante superficie ● Produce malos olores
	Tratamiento secundario	● Aireaciones prolongadas	● Alta eficiencia en eliminación de M.O. ● Baja producción de lodos ● Estabilidad operativa	● Mayor consumo energético ● Mayor volumen de reactor debido TRH



3.4. Selección de la tecnología a proponer.

Para seleccionar la alternativa de depuración tomaremos como punto de partida lo normado en la Directiva (UE) 2024/3019 del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de noviembre del 2024, que dispone que las aglomeraciones urbanas que tengan un mínimo de 2.000 h-e, deben contar con sistemas colectores y extiende esa obligación incluso a las aglomeraciones urbanas con un mínimo de 1.000 h-e, pero menos de 2.000 h-e otorgándole un plazo hasta el 31 de diciembre del 2035 para su cumplimiento. En el artículo 6 se dispone que los vertidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales de aglomeraciones urbanas de 2.000 h-e a más deberán aplicar tratamiento secundario. Asimismo, en el artículo 7 se dispone que en las zonas sensibles a la eutrofización deberán tratar las aguas residuales procedentes de aglomeraciones de 10.000 h-e a más deberán aplicar tratamiento terciario [1].

Las aglomeraciones urbanas realizan la depuración de sus aguas residuales a través de diferentes etapas que contarán con un pretratamiento, tratamiento secundario y tratamiento terciario para zonas sensibles, este tipo de tratamientos de consideraran para este proyecto técnico [5].

Tabla 3 Etapas de depuración Fuente: Elaboración propia a partir de la Confederación Hidrográfica del Duero (2019).

Etapas de depuración	Tecnología
Pretratamiento	Desbaste (rejas y tamices)
	Separador de grasas y arenas
Tratamiento primario	Tanque ecualizador
Tratamiento secundario	Reactor biológico
Tratamiento terciario en zonas sensibles a la eutrofización	Humedales

Para la selección de la tecnología aplicada al tratamiento de agua residual se considerará tres propiedades fundamentales, el atributo técnico, el económico y el ambiental:



En el atributo técnico. - son aspectos propios de la EDARs para cumplir con la normativa ambiental de vertimiento a cuerpos receptores y su rendimiento y/o eficiencia de remoción de contaminantes presentes en el agua residual.

El atributo económico. - en el coste de inversión, operación y mantenimiento que generara poner en marcha el proyecto técnico.

El atributo ambiental. - son las propiedades ambientales que pueda ocasionar el proyecto técnico en términos de impactos generados en su entorno como olores, ruidos, impacto estético, etc.

Para este proyecto técnico en las tecnologías a comparar, determinaremos la selección entre un proceso biológico anaerobio o aerobio. Para ello tomaremos las características del agua residual urbana, asimismo la eliminación de contaminantes deberá realizarse respetando las etapas de depuración necesarias para tratar este tipo de agua residual, en relación a lo normado se realizará las etapas de pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario de ser necesario, lo que permitirá a través de procesos físicos, químicos y biológicos reducir sus contaminantes y permitir su vertido a cuerpos receptores [5].

Debido a la biodegradabilidad que tiene el agua residual de zonas urbanas el mejor tratamiento es un proceso biológico, para esto debemos evaluar el empleo de un proceso aerobio o anaerobio, en el proceso aerobio necesitaremos energía para introducir oxígeno al agua y generamos mayor cantidad de fangos y en el proceso anaerobio no se necesita introducir oxígeno, se genera biogás, menor cantidad de fangos y se requiere mantener una temperatura constante de trabajo [9].

El tratamiento aerobio es un proceso biológico en el cual se utiliza oxígeno y microorganismos aerobios que se encargan de degradar los contaminantes orgánicos. Este tipo de tratamiento es utilizado en las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas, debido a su eficacia en la eliminación de contaminantes orgánicos y nutrientes.

La potencia necesaria para la depuración de las aguas residuales urbanas en España mediante un sistema aerobio es de 305 MW, lo que equivale a 5,6 W/h.e, o a un consumo de 49 kWh/(h.e. año). Asimismo, cabe resaltar que, en pequeñas plantas de tratamiento, como es el caso de estudio en el que se centra este proyecto técnico, se estima un potencial de ahorro global en un 17,5% con respecto al consumo actual de 2.672 GWh/año, este ahorro se obtendría como resultado de mejorar la gestión de aireación al implantar temporizadores para optimizar el consumo de energía y modificaciones conceptuales en el pretratamiento. Cabe resaltar que este gasto energético no será necesario si se implanta un sistema anaerobio tal como se propone en este proyecto técnico [10].

	Consumo unitario		TOTAL ESPAÑA		Potencial de ahorro (%)
	(W/h.e)	kWh/(m ³ .año)	Potencia (MW)	Consumo actual GWh/año	
Consumo actual	5,6	49	305	2.672	-
Potencial ahorro	0,98	8,6	53	468	17,5%

Ilustración 4 Consumo energético en tratamiento aerobio Fuente: IDAE (2010)

Los procesos biológicos, tanto anaerobio como aerobio son métodos para tratar las aguas residuales, en donde los microorganismos descomponen y transforman los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales sin oxígeno o con oxígeno respectivamente. Estos tratamientos se utilizan ampliamente para eliminar materia orgánica y sólidos suspendidos. En la tabla 4 realizaremos una comparación de estas alternativas de tratamiento biológico.

Tabla 4 Comparación entre proceso anaerobio y aerobio Fuente: Guía técnica fundación pública Andaluza

Conceptos	Anaerobio	Aerobio
Energía	Produce	Consume
Generación de fangos	Pocos	Muchos
Espacio	Pequeño	Grande
Temperatura	Controlar	No controlar
Comportamiento a cambio condiciones	Sensible	Robusto
Rendimiento	Alto	Alto



Para elegir la tecnología apropiada y en base a la comparación efectuada en la tabla 4, en donde se detalla mayores ventajas que presenta el sistema anaerobio para cumplir y satisfacer la necesidad de depurar las aguas residuales de estos centros poblados, permitiendo la eliminación de contaminantes a un bajo coste, **se selecciona la tecnología anaerobia como alternativa a desarrollar en el presente trabajo.**

3.5. Revisión de alternativas de tratamiento anaerobio.

Una vez seleccionada la tecnología anaerobia como corazón del tratamiento a proponer, realizaremos la comparación breve de tres tecnologías más adecuadas para el marco del proyecto. Se tratan las tres de reactores con retención interior de biomasa sin recirculación, y son: filtro anaerobio, reactor anaerobio de lecho de lodos con flujo ascendente (UASB) y reactor anaerobio de lecho fijo.

Asimismo, detallaremos las características más importantes de cada uno de ellos a fin de determinar cuál será la opción más ventajosa para tratar las aguas residuales que generan estos núcleos rurales.

Filtro anaerobio. - Las bacterias anaerobias están fijadas a la superficie de un soporte fijo formando biopelículas, los cuales se encuentran atrapados en los orificios de éste, el flujo es vertical y su soporte es de cerámica o plástico, este sistema es aplicado a la industria agroalimentaria y fracción líquida de residuos ganaderos, es apto para caudales pequeños y su coste es alto [9].

Reactor de lecho de lodos. – favorece la floculación de bacterias formando gránulos y por sedimentación se mantienen en el interior del reactor con la velocidad ascendente adecuada del fluido, consta de un separador de sólido, líquido y gas, el diseño más común es el Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), es el diseño trata aguas residuales con caudal de un valor típico de 10.000 m³/d con alta carga orgánica y su limitante es que la biomasa forme agregados de alta densidad y su coste es bajo [9].



Reactor de lecho fluidizado y expandido. – Las bacterias se encuentran fijadas, formando una biopelícula, sobre pequeñas partículas de material inerte que se mantienen fluidizadas mediante el flujo ascendente adecuado del fluido. Para mantener el caudal adecuado, que permita la expansión y fluidización del lecho, se recurre a la recirculación. Al igual que el filtro, puede ser aplicado a aguas residuales de la industria agroalimentaria, y a fracciones líquidas o sobrenadante de residuos ganaderos [9].

Reactor anaerobio de lecho fijo. – en este caso las bacterias se encuentran adheridas a un soporte fijo de plástico o cerámica con flujo ascendente o descendente formando una biopelícula, es apto para caudales pequeños, este sistema es aplicado a la industria agroalimentaria y fracción líquida de residuos ganaderos y su coste es alto [9].

3.6. Oportunidades de anaerobio.

El proceso anaerobio presenta mayores ventajas como menor producción de fangos, menor coste en el consumo energético al no necesitar oxígeno para su funcionamiento y generar biogás, en comparación al proceso aerobio que consume mucha energía al necesitar inyección de aire al reactor a través de difusores para su funcionamiento y generar mayor producción de fangos. Asimismo, teniendo en cuenta que este proyecto técnico está orientado para su implementación en la Comunidad de Andalucía en las zonas de Guadalquivir y la costa mediterránea, Murcia, Comunidad Valenciana y zonas de las islas Canarias que presentan climas cálidos, de manera que no se incrementa el coste de operación del reactor anaerobio. Por estos motivos razonables se propone realizar un **proceso anaerobio** el cual en base a lo sustentado es la mejor opción para este proyecto técnico.

Asimismo, en base a la comparación de las cuatro tecnologías de sistema anaerobio antes mencionadas, se llega a concluir que Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), cumple con los requisitos adecuados para este proyecto técnico, para tratar las aguas residuales que se generan en las aglomeraciones urbanas, depurando un caudal

típico de 10.000 m³/d con baja carga orgánica, alta eficiencia en remoción de materia orgánica y su coste es bajo para su operación y mantenimiento.

Al respecto, considerando el rango de población que tiene por objeto de estudio este proyecto técnico, el cual oscilará entre 1.000 y 20.000 h-e, el caudal promedio que generará 20 mil h-e será de 4.000 m³/d (considerando 200 L/hab. d), el cual se encuentra dentro valor típico del caudal depurado por un UASB. Cumpliendo con un requisito fundamental para su selección.

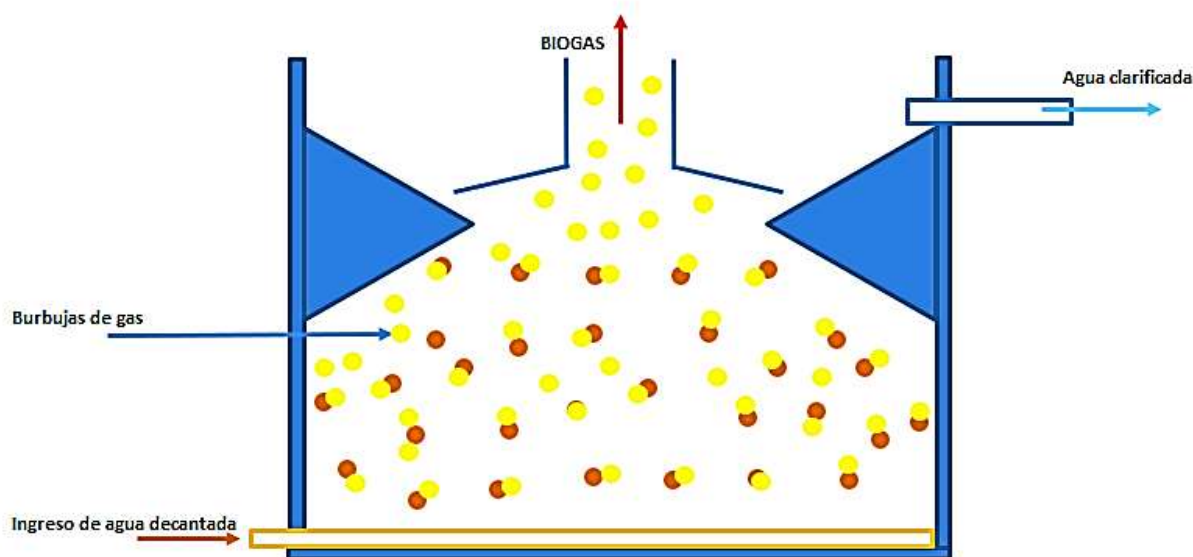


Ilustración 5 Reactor UASB. Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy (2014).

4. METODOLOGIA DE ESTUDIO.

4.1. Caso de estudio.

Para dar cumplimiento a la Directiva (UE) 2024/3019 del Parlamento Europeo y del Consejo del 27 de noviembre del 2024, se debe realizar un tratamiento adecuado a las aguas residuales generadas por aglomeraciones urbanas, evitando futuras sanciones por parte de la Comisión de la Unión Europea [2].

Para esto **presentaremos un proyecto de un sistema de depuración de bajo coste para tratar las aguas residuales que generan 6.957 municipios españoles que no**

superan los 20.000 habitantes, pero especialmente los de menos de 5.000 habitantes que representan el 84 % de los municipios según lo indicado en el apartado 3.2. Se considerará las aglomeraciones urbanas que cuenten como mínimo 1.000 h-e según lo normado en la presente Directiva y hasta 20.000 h-e. Logrando que estas aguas residuales no sean vertidas directamente a medios receptores, permitiendo proteger el estado ecológico de los medios receptores y evitando riesgos para la salud para los pobladores de estas pequeñas aglomeraciones [11].



Ilustración 6 Origen y tratamiento de las aguas residuales Fuente: Gobierno de Canarias (s.f.). Guía sobre tratamientos de ARU. para pequeños núcleos de población.

En concreto, el trabajo considera como base de cálculo una población equivalente de 20.000 habitantes, correspondiente a un flujo de agua residual 4000 m³/d, como se indica en el apartado 4.2.3. considerando que el 86% de municipios no superan los 20.000 habitantes.

4.2. Bases de diseño.

En el presente balance de materia de la línea de agua, conoceremos en caudal de cada corriente y sus concentraciones, según el diagrama de bloques propuesto para la implementación de este proyecto técnico.



4.2.1. Generalidades sobre el agua residual urbana en zonas rurales.

La falta de infraestructura y los escasos recursos complican la implementación de sistemas convencionales en zonas rurales, es por esta razón que se debe implementar sistemas de tratamiento con menor coste y que satisfagan las necesidades de depuración requerida para tratar las aguas residuales que se generan en zonas rurales a fin de disminuir el impacto generado por los desechos que producen las poblaciones denominados núcleos rurales. Para esto tomaremos como punto de partida la caracterización del agua residual, en base a la referencia de la guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones y la guía sobre tratamiento de aguas residuales urbanas para pequeños grupos de población [5] [11].

En la tabla 5 se muestran los parámetros del influente, siendo estos parámetros los que se utilizan para la selección de alternativas, la alta concentración de DQO nos indica que se trata de un agua que contiene materia orgánica. Los principales contaminantes del agua residual urbana que se genera en estas pequeñas poblaciones son [11]:

Objetos gruesos. - trozos de madera, plásticos, trapos, etc.

Arenas. - arenas, gravas y partículas de origen mineral u orgánico

Grasas y aceites. - grasas de procedencia domestica e industrial.

Sustancias con requerimientos de oxígeno. – materia orgánica e inorgánica.

Nutrientes. - nitrógeno y fosforo

Agentes patógenos. - organismos que pueden producir o transmitir enfermedades

Contaminantes emergentes. – productos de cuidado personal, de limpieza doméstica y farmacéutica.

4.2.2. Límites de batería del proyecto.

El caso de estudio para este proyecto técnico considera que la depuración de un agua residual urbana tiene como objetivo llegar a los siguientes productos finales:



El Agua depurada para vertido debe cumplir con la legislación establecida con la **Directiva 2024/3019 del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de noviembre del 2024**. Los límites de vertido son los que se indican en la tabla 6, el agua depurada que se lograría obtener al aplicar este proyecto técnico debe ser desinfectado con cloro de ser necesario, con la finalidad de eliminar microorganismos patógenos como bacterias y virus que podrían causar enfermedades en humanos y animales si se vierten estas aguas a medios receptores como ríos o mares [1].

El Biogás generado con un contenido típico de metano (CH_4) del 65% en el proceso anaerobio, **puede ser utilizado con tres finalidades:**

Calentamiento del agua residual de entrada al digestor (objetivo óptimo: temperatura mesófila a 35°C).

Calentamiento de agua para uso doméstico (agua caliente sanitaria).

Empleo en aplicaciones domesticas que cuenten con cocinas a biogás en la zona de ejecución de este proyecto técnico [7].

4.2.3. Datos de partida y límites de vertido.

Para la realización del balance de materia se han utilizado como datos de partida los valores típicos de los principales contaminantes del agua residual doméstica, los cuales se indican en la tabla 5 [11].

Tabla 5 Parámetros del influente Fuente: Guía elaborada por el Instituto Tecnológico de Canarias (2006)

Parámetro	Unidades	Valor Medio Influyente
DQO	mg/L	500
DBO5	mg/L	220
SST	mg/L	220
Nitrógeno	mg/L	40
Fosforo	mg/L	8
Grasas	mg/L	100
Coliformes Fecales	ufc/100 mL	10^6 - 10^7



Asimismo, los límites vertido según la Directiva (UE) 2024/3019 del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de noviembre del 2024 [1].

Tabla 6 Límites de vertido Fuente: Directiva 2024/3019 de la U.E.

Parámetro	Unidades	L.V. Directiva
DQO	mg/L	<125
DBO5	mg/L	<25
SST	mg/L	<35
Nitrógeno	mg/L	10
Fosforo	mg/L	0.7

Asimismo, en base a lo sustentado en el apartado 3.2, este proyecto técnico será **aplicable a las aglomeraciones urbanas entre 1.000 y 20.000 h-e**, para provisionar un crecimiento en la población y que la infraestructura satisfaga las necesidades de saneamiento en un futuro.

Teniendo en cuenta la cantidad de población determinaremos la cantidad de agua residual generada por persona en un día que en base a la referencia es de 140 L/hab.d [12], asimismo a fin de evitar la obsolescencia del sistema de saneamiento se debe considerar un caudal vertido dentro de 25-50 años [14], considerando el crecimiento de dicha población se considerara un valor típico de **200 L/hab.d** para asegurar un desarrollo sostenible [13].

$$Q = P * \frac{q}{1.000} = 20.000h * \frac{200 \frac{L}{h} \cdot d}{1000} = 4.000m^3/día \quad (Ecuacion 1)$$

4.2.4. Diagrama de flujo.

El agua residual generada pasa por un proceso de depuración que incluye un pretratamiento, tratamiento secundario y tratamiento terciario tal como se muestra en la ilustración 9. La corriente 0 pasara por la etapa del pretratamiento que incluyen el cribado, desarenador y desengrasador. La corriente 1 es conducida hacia el tanque de ecualizador en donde se ajustará el pH a 7 [13]. La corriente 2 será tratada en el reactor anaerobio que cuenta con un separador trifásico que permite retener lodos, capturar biogás y ser conducido a través la corriente 3 hacia el gasómetro, por la

corriente 4 saldrá el agua tratada del reactor hacia el tratamiento terciario (Humedales) que contará con un tiempo de retención de 3,5 días **con plantas *Typha domingensis* conocida como espadaña** [16]. Este proceso será utilizado en zonas sensibles a la eutrofización para llegar a los nuevos límites más estrictos y exigidos en la Directiva vigente [1]. Con este sistema terciario se Podrá reducir el nitrógeno y fosforo en plantas de tratamiento que depuren aguas residuales con 10.000 h-e, a más para los vertidos en una cuenca hidrográfica en una zona sensible a la eutrofización [1].

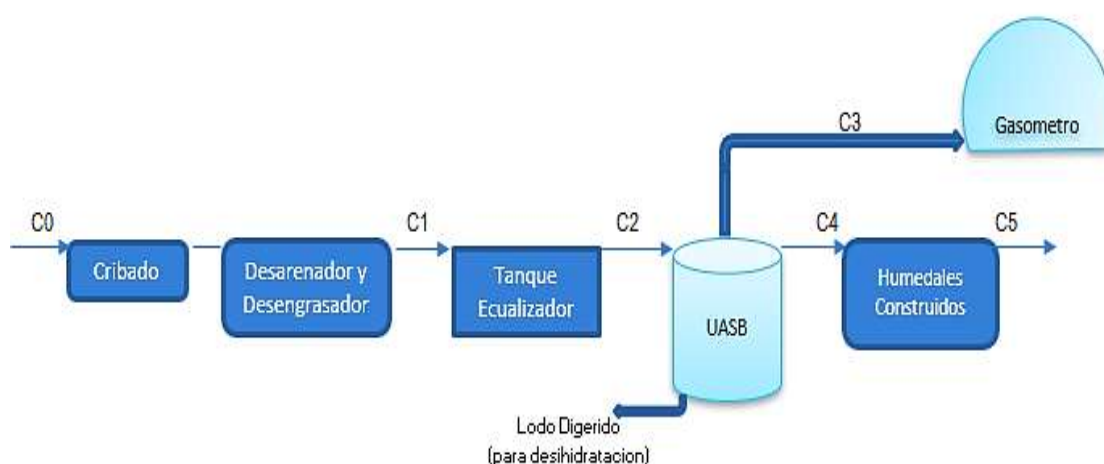


Ilustración 7 Diagrama de flujos Fuente: Elaboración propia

4.3. Balances de materia.

4.3.1. Cálculo de balance de materia.

La tabla 5 se presenta los datos de partida del influente, indicando los valores medios típicos de los principales contaminantes. Asimismo, se determinó en la ecuación 1 el caudal de referencia a tratar para este proyecto técnico. Estos datos nos permitirán determinar las diferentes concentraciones de cada corriente según como se muestra en el diagrama de flujos. La corriente 0 Pasara por un proceso preliminar que cuenta con cribado, desarenador y desengrasador que contare con una eficiencia de eliminación de DQO, DBO y SST del 10% [19] y grasas del 90% [8]. Posterior la C1 pasara a un tanque ecualizador donde se homogeneizará la carga residual y se regulara el pH a 7. La corriente 2 pasara por el reactor UASB que cuenta con una eficiencia de eliminación de valores típicos de DQO 90%, DBO del 80%, SST 75%, N 25% P 15% [19] [20] [18].



La corriente 4 pasará por un proceso terciario que contará con humedales construidos el cual tendrá una eficiencia de eliminación de DQO 98%, DBO 50%, SST 99 %, N 69 %, P 96% y coliformes fecales 96% [16] [11]. Se agregará cloro para desinfectar el agua tratada en el canal de salida después del proceso terciario, según sea necesario.

Tabla 7 Tabla de corrientes Fuente: Elaboración propia

Parametros	Tabla de Corrientes					
	C0	C1	C2	C3	C4	C5
Q (m ³ /h)	250.00	250.00	250.00	-	250.00	250.00
DQO (mg/l)	500.00	450.00	450.00	-	45.00	0.90
DBO (mg/l)	220.00	198.00	198.00	-	39.60	19.80
SST (mg/l)	220.00	198.00	198.00	-	39.60	0.40
N (mg/l)	40.00	40.00	40.00	-	30.00	9.30
P (mg/l)	8.00	8.00	8.00	-	6.80	0.27

$$DQO = 450 * (1 - 0.90) = 45 \frac{mg}{L} \quad (\text{Ecuacion 2})$$

4.3.2. Cálculo de flujo de biogás.

La corriente 2 que sale del tanque ecualizador como se muestra en el diagrama de flujos, tiene un caudal de referencia de 4.000 m³/d ó 167 m³/h y una DQO de 450 mg/L ó 0.45 Kg/m³ que se introduce al reactor anaerobio, que es capaz de degradar el 90 % de la DQO de entrada, por lo que a la salida del reactor la corriente 4 tendrá una concentración de 45 mg/L, cumpliendo de esta manera con los límites de vertido indicados en la tabla 6.

Para calcular el biogás que genera el reactor se utiliza la ecuación 3, asimismo se tomara parámetros típicos Rend.DQO=90%, Potencial bioquímico de metano (PBM)=0.35 Nm³CH₄/Kg DQO removida, contenido de CH₄=65% [13], Para calcular aproximadamente la cantidad de biogás generado.

$$Biogas = Q * C_{DQO} * Rend_{DQO} * PBM * \frac{1}{\% CH_4} = 36 \frac{Nm^3}{h} \quad (\text{Ecuacion 3})$$

4.4. Línea de agua: Dimensionamiento preliminar.

Desbaste:

En esta etapa de depuración consiste en la eliminación de los sólidos de tamaño grande, mediano y de finos. Estos sólidos podrían deteriorar o bloquear los equipos y obstruir el paso de la corriente de agua. El agua residual pasa a través de rejillas, que de acuerdo con la separación entre las rejillas pueden clasificarse en: Desbaste de gruesos de paso libre entre las rejillas de 50 a 100 mm y Desbaste de finos de paso libre entre las rejillas de 10 a 25 mm [11].



Ilustración 8 Desbaste Fuente: Guía técnica de selección de diseño fundación pública Andaluza

Desarenador:

Para EDAR de menor tamaño como es el caso de este proyecto técnico emplearemos desarenadores estáticos de flujo horizontal constante que mantiene una velocidad fija del paso del agua, en torno a 0,3 m/s con extracción manual de arenas y se recurrirá a dos canales en paralelo para labores de operación y mantenimiento [8].

Para dimensionar los canales de sedimentación calculamos la velocidad de sedimentación usando la ley de Stokes. Con los siguientes datos de valor típico $d: 0,2 \text{ mm}$ o $0,0002 \text{ m}$, la gravedad: $9,81 \text{ m/s}^2$, ρ de arena 2650 kg/m^3 , ρ de agua 1000 kg/m^3 , viscosidad a 20°C $\mu: 1 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s.}$ [13].

$$\dot{V}_s = (g \cdot (\rho_{\text{arena}} - \rho_{\text{agua}}) \cdot d^2) / 18 \cdot \mu = 0.0036 \text{ m/s} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Calculamos el área transversal del canal por donde fluye el agua en la ecuación 5 donde se divide el Q 4000 m³/s o 0.0463 m³/s entre la velocidad de flujo 0.3 m/s

$$A = Q/v = 0.154 \text{ m}^2 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Asimismo, dimensionamos el ancho (b) y la profundidad (h) para eso estableceremos una relación de diseño $b=2h$ y usaremos el área transversal en la ecuación 6 para determinar h, por defecto hallamos que $b=0.554 \text{ m}$.

$$h = A/b = 0.277 \text{ m} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Calculamos la longitud de los canales en la ecuación 8, para esto calcularemos el tiempo de sedimentación en la ecuación 7 al dividir la altura entre la velocidad de sedimentación. Para un diseño efectivo el tiempo de retención debe ser mayor o igual que el Tiempo de sedimentación.

$$t_s = h/V_s = 76.9 \text{ s} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$L = t_r \cdot V = 76.9 \text{ s} \cdot 0.3 \text{ m/s} = 23.07 \text{ m} \quad (\text{Ecuación 8})$$



Ilustración 9 Desbaste Fuente: Guía técnica de selección de diseño fundación pública Andaluza



Desengrasador:

Se dimensionará un desengrasador estático (tanque rectangular) dotado de una tubería sumergida, tabique y deflector que obliga a las aguas residuales salir por la parte inferior del mismo, lo que facilita que los componentes de menor densidad que el agua queden retenidos en la superficie [8]. Para esto usaremos valores típicos de operación como el THR 25 min o 1500 s, velocidad de flujo horizontal de 0.05 m/s, velocidad ascensional (V_f) de grasas de 0.0003 m/s, calcularemos el volumen de tanque en la ecuación 19. [13].

$$V = Q * THR = 0.0463 \text{ m}^3/\text{s} * 1500 \text{ s} = 69.45 \text{ m}^3 \quad (\text{Ecuacion 9})$$

Calcularemos el área superficial del desengrasador para asegurar que la grasa tenga suficiente espacio para flotar y no sean arrastradas por el flujo de agua.

$$A_s = Q / V_f = (0.0463 \text{ m}^3/\text{s}) / 0.0003 \text{ m/s} = 154.33 \text{ m}^2 \quad (\text{Ecuacion 10})$$

Asimismo, dimensionamos el ancho (b) y la longitud (L), para eso estableceremos una relación de diseño entre el largo y ancho $L=3b$ y usaremos el área superficial en la ecuación 17 para determinar b, por defecto hallamos que $L= 21.51 \text{ m}$. Respecto a la altura se recomienda un valor típico de 1.5 m a más.

$$b = A_s / L = 7.17 \text{ m} \quad (\text{Ecuacion 11})$$

Tanque Ecualizador:

Para garantizar un buen rendimiento en el tratamiento de aguas residuales, el dimensionamiento del tanque ecualizador es una pieza fundamental, contaremos con dos tanques de hormigón para coadyuvar el agua pluvial en épocas de lluvia, serán de forma circular con vaciado por gravedad para reducir costos, mezclador y aliviadero. Para determinar el volumen del ecualizador tomaremos el tiempo de residencia hidráulico típico de 2 horas.

$$V = Q * THR = 167 \text{ m}^3/\text{h} * 2 \text{ h} = 334 \text{ m}^3 \quad (\text{Ecuacion 12})$$



Para el cálculo del área se dividirá el volumen calculado en la ecuación 13, entre la altura de 4 m que tiene un ecualizador como valor típico.

$$Area = \frac{V}{h} = \frac{334 \text{ m}^3}{4 \text{ m}} = 84 \text{ m}^2 \quad (\text{Ecuacion 13})$$

Para el cálculo del diámetro se tomará el valor área calculado en la ecuación 13.

$$D = \sqrt{\frac{4 * Area}{\pi}} = 10,3 \text{ m} \quad (\text{Ecuacion 14})$$

Reactor Anaerobio:

Para garantizar un buen rendimiento en el tratamiento de aguas residuales, el dimensionamiento del reactor anaerobio es una pieza clave, gracias a las bases del diseño y a la tecnología seleccionada, determinaremos los parámetros como la velocidad ascensional típica de (0.7 m/h) destinado a tratamiento de aguas residuales urbanas [13], la carga volumétrica típica de (2 kg DQO/m³d), para un reactor UASB [13]. Consideraremos un rendimiento de eliminación de DQO del 90%, para calcular los diferentes parámetros del reactor.

A partir de la carga másica se obtiene el volumen del reactor en la ecuación 15, el cual se debe sobredimensionar un 10% en la ecuación 16 para asegurar un correcto funcionamiento del reactor en los picos, asimismo los resultados se han redondeado conforme a criterios de uso practico en el diseño de una EDAR.

$$V = \frac{Q * C_{DQO}}{CV} = (4000 \text{ m}^3/\text{d} * 0.45 \text{ KgDQO}/\text{m}^3)/2 \text{ kgDQO}/\text{m}^3\text{d} = 900 \quad (\text{Ecuacion 15})$$

$$V = 900 * 1.10 = 990 \text{ m}^3 \quad (\text{Ecuacion 16})$$

Una vez calculado el volumen, se puede calcular el tiempo hidráulico de residencia (THR) del agua, mediante la ecuación 17.

$$THR = V/Q = 990 \text{ m}^3/167 \text{ m}^3/\text{h} = 5,9 \text{ h} \quad (\text{Ecuacion 17})$$



Para el cálculo del área se utiliza la velocidad ascensional de valor típico de 0.7 m/h en la ecuación 18, asimismo se obtiene el diámetro del reactor en la ecuación 19.

$$Area = \frac{Q}{V_s} = 167 \text{ m}^3/\text{h} / 0,7 \text{ m/h} = 239 \text{ m}^2 \quad (\text{Ecuacion 18})$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * Area}{\pi}} = 17,4 \text{ m} \quad (\text{Ecuacion 19})$$

Para calcular la altura del reactor se realizará mediante la ecuación 20.

$$h = \frac{V}{Area} = \frac{990 \text{ m}^3}{239 \text{ m}^2} = 4,1 \text{ m} \quad (\text{Ecuacion 20})$$

Humedales construidos:

Para garantizar que el agua quede depurada según lo exigido en la Directiva vigente se aplicara un proceso terciario de humedales como afino. Los humedales construidos implican procesos biológicos, físicos y químicos, similares a los que ocurren en los humedales naturales. Este tratamiento se utiliza para eliminar materia orgánica, solidos suspendidos, nutrientes y algunos metales, este proceso es ideal para el afino o pulido final del agua residual que se presenta en este proyecto técnico. Para determinar el volumen del humedal utilizaremos la ecuación 21, con un THR de 3,5 días [16].

$$V = Q * THR = 4000 \text{ m}^3/\text{d} * 3,5 \text{ d} = 14.000 \text{ m}^3 \quad (\text{Ecuacion 21})$$

Para el cálculo del área utilizaremos el valor típico de profundidad de un humedal que será 1m [11]. En la ecuación 22 se obtuvo 14.000 m² de área necesaria para la implementación del humedal, por lo que se sugiere para un mejor manejo dividir el humedal en dos o tres de acuerdo al área total, permitiendo optimizar los procesos de tratamiento de agua residual y facilitando la disponibilidad de área necesaria [16] [17].

$$Area = \frac{V}{P. Agua} = \frac{14.000 \text{ m}^3}{1 \text{ m}} = 14000 \text{ m}^2 \quad (\text{Ecuacion 22})$$

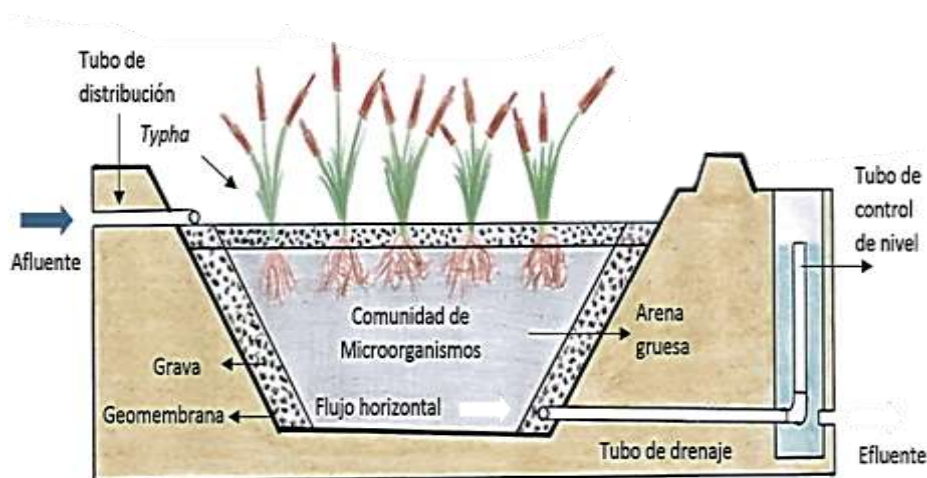


Ilustración 10 Humedales construidos Fuente: Revista ecosistemas 2022

4.5. Línea de gas: Valoración del destino del biogás y utilización.

El biogás generado será utilizado para calentar el agua residual de entrada al reactor anaerobio, para esto se tomará los parámetros típicos Poder calorífico inferior del metano (PCI_{CH_4}): 35.8 MJ/Nm^3 (Valor estándar a condiciones normales), η caldera (rendimiento térmico de la caldera 90-95%), conversión energética de $1\text{kWh}=3.6 \text{ MJ}$, contenido de $CH_4=65\%$ [13]

Determinaremos el caudal del metano en el biogás mediante la siguiente ecuación 23:

$$Q_{CH_4} [\text{Nm}^3/\text{h}] = Q_{bg} \cdot \chi_{CH_4} = 36 \times 0.65 = 23.4 \text{ Nm}^3/\text{h} \quad (\text{Ecuacion 23})$$

Determinaremos la potencia térmica bruta del flujo mediante la ecuación 24:

$$\dot{E}_{bruta} [\text{kW}] = \frac{Q_{CH_4} [\text{Nm}^3/\text{h}] \times PCI_{CH_4} [\text{MJ}/\text{Nm}^3]}{3.6} = \frac{23.4 \times 35.8}{3.6} = 232.7 \text{ kW} \quad (\text{Ecuacion 24})$$

Calor útil a la salida de la caldera Asumiendo el escenario de rendimiento mínimo de 90%, se calculará mediante la ecuación 25.

$$\dot{Q}_{\text{útil}} [\text{kW}] = \eta_{caldera} \times \dot{E}_{bruta} = 0.90 \times 232.7 = 209.4 \text{ kW} \quad (\text{Ecuacion 25})$$

Potencia necesaria para elevar ΔT por cada 1°C con un $Q=4000 \text{ m}^3/\text{d}=46,3 \text{ L/s}$ y se multiplicara por $C_p = 4,18 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ [13].



$$P = m \cdot Cp \cdot \Delta T = 46,3 \text{ kg/s} \times 4,18 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \times 1 ^\circ\text{C} = 193.5 \text{ kW} \quad (\text{Ecuacion 26})$$

Con esta potencia solo podríamos incrementar la temperatura del agua en un valor de 1 °C el agua residual, por lo tanto, no será viable la opción de calentar el agua en una caldera para posterior introducirlo en el reactor anaerobio, **el destino que se dará al biogás generado, será de uso de aplicación domestica que cuenten con cocinas o calderas a biogás** en la zona de ejecución de este proyecto técnico.



5. CONCLUSIONES.

El esquema planteado para este proyecto técnico, cuenta con un pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario como eje principal el UASB que cuenta con más ventajas frente a un proceso aerobio al generar biogás y al contar con menor consumo energético en su operación. Asimismo, se realizará un tratamiento terciario con humedales construidos como afino para las aglomeraciones urbanas que superen los 10.000 h-e, en zonas sensibles a la eutrofización, según lo exigido en la Directiva vigente que dispone límites de vertido más estrictos en comparación a la anterior Directiva. Al aplicar esta propuesta de proyecto técnico, lograremos la remoción de contaminantes para cumplir con los límites de vertido exigidos en la Directiva (UE) 2024/3019 del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de noviembre del 2024.

Cabe indicar que este proyecto técnico es económicamente viable para las aglomeraciones urbanas que cuenten con una población entre 1.000 a 20.000 h-e, en un clima templado cálido, ideal para implementar un UASB y economizar el consumo energético al calentar el reactor y generar subproductos de valor como el biogás.

Al implementar un reactor UASB permitió aprovechar la fracción biodegradable del agua residual urbana para la producción de biogás, alcanzando rendimientos típicos de $0,35 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO removida}$. **Según los cálculos realizados el biogás generado no se abastece para la producción calor, que serviría como fuente de energía para mantener las condiciones óptimas de operación del reactor anaerobio de ser necesario. Por lo que se optaría su uso en aplicación domestica que cuenten con cocinas o calderas a biogás** en la zona de ejecución de este proyecto, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles de las zonas aledañas.



6. REFERENCIAS.

- [1] Unión Europea. (2024, 27 de noviembre). *Directiva (UE) 2024/3019 del Parlamento Europeo y del Consejo sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas* (DO L 3019, pp. 1–59). Diario Oficial de la Unión Europea. <https://data.europa.eu/eli/dir/2024/3019/oj>
- [2] Romero, G. (2024). *España y el desafío de las aguas residuales: Un análisis en perspectiva europea*. Revista Técnica de Medio Ambiente (RETEMA), (252), 116–129. Recuperado de <https://www.retema.es/articulos-reportajes/espana-y-el-desafio-de-las-aguas-residuales-un-analisis-en-perspectiva-europea>
- [3] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (s.f.). *Programa PREE 5000: Rehabilitación energética en municipios de reto demográfico*. Recuperado el 16 de abril de 2025, de <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-la-rehabilitacion-de-edificios/programa-pree-5000-rehabilitacion/municipios-de-reto-demografico>.
- [4] Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. (2021). Demografía de la población rural en 2020 (Análisis y prospectiva – AgrInfo nº 31). https://www.mapa.gob.es/va/ministerio/servicios/analisis-y-prospectiva/ayp_demografiaenlapoblacionrural2020_tcm39-583987.
- [5] Confederación Hidrográfica del Duero. (2013). *Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. <https://www.diputaciondepalencia.es/system/files/generico/archivos/20190709/guia practica-depuracionaguas-chd.pdf>
- [6] López Martín, C., Germán Bes, C., Francisco Lafuente, A., & Herce Palomares, C. (1998). *Filtros verdes: Una alternativa real en el tratamiento de aguas residuales en pequeños municipios* [Ponencia]. Congreso del Agua, Zaragoza. Fundación Nueva Cultura del Agua. <https://fnca.eu/biblioteca-del-agua/documentos/documentos/110.pdf>
- [7] Ministerio de Energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), & Global Environment Facility (GEF). (2011). *Manual de biogás*. Proyecto CHI/00/G32 “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”. Santiago de Chile: FAO. ISBN 978-95-306892-0. Recuperado de <https://www.fao.org/4/as400s/as400s.pdf>
- [8] Fundación Pública Andaluza Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA). (2021). *Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales: Módulo 1. Información básica para la redacción de proyectos de PTAR*. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible, con la colaboración del CEDEX y el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda



- Urbana. Recuperado de [https://www.aguasresiduales.info/media/images/ckfinder/userfiles/files/Mod_01_Guia_PTAR\(1\).pdf](https://www.aguasresiduales.info/media/images/ckfinder/userfiles/files/Mod_01_Guia_PTAR(1).pdf)
- [9] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios. Guía técnica*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf
- [10] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2010). *Estudio de prospectiva: Consumo energético en el sector del agua*. Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Recuperado de https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Estudio_de_prospectiva_Consumo_Energetico_en_el_sector_del_agua_2010_020f8db6.pdf
- [11] Instituto Tecnológico de Canarias. (2005). *Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población*. Gobierno de Canarias. <https://www.cienciacanaria.es/files/Guia-sobre-tratamientos-de-aguas-residuales-urbanas-para-pequenos-nucleos-de-poblacion.pdf>
- [12] Salas Rodríguez, J. J. (2020, 12 de marzo). *Cuantificación y caracterización de mis aguas residuales (I)*. iAgua. <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/cuantificacion-y-caracterizacion-mis-aguas-residuales-i>
- [13] Metcalf & Eddy, Inc., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. L. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education. https://www.abpsoil.com/images/Books/Wastewater_Engineering_Treatment_Resource_Recovery_Metcalf_Eddy_5th.pdf
- [14] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *Caudales de aportación en redes de saneamiento*. Gobierno de España. <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/saneamiento-depuracion/caudalaportacion.html>
- [15] España. (1996). *Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, por el que se desarrolla el Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, sobre tratamiento de las aguas residuales urbanas*. Boletín Oficial del Estado, 77, 12044–12052. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1996-7159>
- [16] Pérez, Y. A., García Cortés, D. A., & Jauregui Haza, U. J. (2022). Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: Una revisión. *Ecosistemas*, 31(1), Article 1. <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/2279/1510>



- [17] Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2017, 27 de junio). *Reflexiones sobre las causas que limitan el uso de humedales de tratamiento en México*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/imta/articulos/reflexiones-sobre-las-causas-que-limitan-el-uso-de-humedales-de-tratamiento-en-mexico?idiom=es>
- [18] Fundación Pública Andaluza Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA). (s.f.). *Módulo 2 – Guía PTAR*. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible, con la colaboración del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana y del CEDEX. Recuperado de https://www.aguasresiduales.info/media/images/ckfinder/userfiles/files/Mod_02_Guia_PTAR.pdf
- [19] Torres, P. (2012). Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. *Revista EIA*, (18), 115-129. <https://www.redalyc.org/pdf/1492/149225098009.pdf>
- [20] Chernicharo, C. A. de L. (2007). *Anaerobic reactors* (Vol. 4). IWA Publishing. <https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/31051/640142.pdf>