



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

Aplicación de Energías Renovables para la Autosuficiencia Energética en Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales EDAR

Autor: D. Antonio Sánchez Cove

Tutor: D. María Fdz-Polanco

Valladolid, 17 de Septiembre, 2025

ÍNDICE

ÍNDICE	2
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	5
RESUMEN	6
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Contexto y justificación	1
1.2 Problemática.....	1
1.3 Relevancia e interés ecológico	2
1.4 Descripción del tema	2
1.4.1 Las Aguas Residuales	2
1.4.2 Consumo Energético de una EDAR	3
1.4.3 La eficiencia energética en las EDARs.....	9
1.4.4 Situación actual de las Energías renovables	13
2. OBJETIVOS	16
3. Análisis del consumo energético de la EDAR el prat de Llobregat.....	17
3.1 Tratamiento biológico: sistema de lodos activados y aireación	23
3.2 Pretratamiento en la línea de aguas.....	24
3.3. Etapa Final del Proceso: Depuración Terciaria.....	24
3.4 Balance energético de la EDAR estudiada, identificando los principales puntos de consumo.	25
4. Energías renovables aplicables a una EDAR	27
4.1 Energías Renovables Internas	27
4.1.1 Biogás procedente de la digestión anaerobia	27
4.2 Energías Externas terrestres	28
4.2.1 Energía Solar, fotovoltaica y térmica	29
4.2.2 Energía Fotovoltaica	30
4.2.3 Energía Térmica.....	32
4.2.4 Energía eólica	33
4.2.5 Energía Microhidráulica	36
4.2.6 Energía geotérmica.....	39
4.3 Energías Marinas	42

4.3.1 Energía undimotriz.....	43
4.3.2 Energía mareomotriz	45
4.3.3 Energía azul.....	48
4.4 Energías Renovables Viables en la EDAR del Prat Llobregat y porcentaje propuesto.....	50
5. Análisis de la viabilidad técnica de la integración de tecnologías renovables seleccionadas en la EDAR del Prat Llobregat (Barcelona).....	52
5.1 Viabilidad técnica del aumento de biogás a partir de la cogeneración.....	53
5.1.1 Supuestos técnicos para el cálculo de incremento de biogás mediante codigestión	54
5.3 Viabilidad técnica de la energía solar fotovoltaica.....	58
5.3.1 Número de paneles solares fotovoltaicos	59
5.4 Viabilidad técnica de la energía minieólica.....	61
5.4.1 Número de aerogeneradores necesarios	62
5.5 Principales resultados de este análisis.....	64
6. Estimación del potencial de ahorro energético, económico y ambiental	65
6.1 Estimación de ahorro económico	65
6.2 Estimación de ahorro ambiental	66
7. Comparación de los resultados obtenidos con otros estudios o referencias similares	70
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
9. CONCLUSIONES	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Desglose de la energía empleada en tratamiento (Walther, 2009).....	5
Figura 2. Distribución de la potencia total requerida por tamaño de municipio (%) y número de depuradoras en cada tramo (IDAE, 2010).	8
Figura 3. Potencia requerida por unidad de tratamiento según el tamaño de municipio.	8
Figura 4. Evolución de la potencia instalada renovableFuente: Red Eléctrica, (2022)	14
Figura 5. Masa y Energía a nivel de la planta El Prat de Llobregat.....	19
Figura 7. Columna Oscilante de Agua (Oscillating Water Column) Fuente: Textos Científicos (2009)	44
Figura 8. Turbinas submarinas. Fuente: Greentech (2024)	46
Figura 9. Foto del área de la planta. Fuente: The New Barcelona Post (2022).	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Potencias por habitante (W/h.e.) de una EDAR en función de su tamaño (IDAE,2010).	7
Figura 6. Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales ‘El Prat de Llobregat. Fuente: Urrea et al (2025)	21
Tabla 2. Consumo eléctrico por tratamiento en la EDAR Prat Llobregat (2022)	22
Tabla 3. Balance energético anual según los datos de 2022	23
Tabla 4. Estimación de distribución del 28% de energía cubierta por biogás	26
Tabla 5. Casos de éxito en la utilización de la Energía Eólica en una EDAR	36
Tabla 6. Superficie típica de diferentes tipos de centrales minihidráulicas.....	38
Tabla 7. Datos de la aplicación de una turbina Francis en la EDAR de “Centralna” deToruń	39
Tabla 8. Energía geotérmica aplicada a una EDAR en Ischia, Italia	42
Tabla 9. Ejemplos reales de potencia generada por la energía mareomotriz	47
Tabla 10. Proyectos destacados en España.....	48
Tabla 11. Distribución del Mix de energías renovables propuestas para superar déficit energético	51
Tabla 12. Estrategia de incremento de la cogeneración en la EDAR.....	54
Tabla 13. Comparativa de posibles escenarios	56
Tabla 14. Resumen de viabilidad técnica energía Fotovoltaica.....	60
Tabla 15 – Comparación de velocidad del viento entre zonas de mayor potencial y delta del Llobregat.....	62
Tabla 16. Cobertura del consumo total mediante cada fuente renovable	64
Tabla 17. Cobertura del déficit por energías renovables	65
Tabla 18. Inversión estimada.....	66
Tabla 19. Resumen de Ahorro energético, económico y ambiental	68
Tabla 20. Comparativa de Ahorro energético	71

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Máster pretende abordar el elevado consumo energético de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), para el estudio se toma como referencia el caso de la EDAR El Prat de Llobregat (Barcelona). El objetivo principal consiste en evaluar su balance energético con el fin de diseñar un plan de integración de energías renovables que contribuyan a avanzar hacia su autosuficiencia, así como, reducir costes operativos y minimizar emisiones de CO₂. Partiendo de un consumo anual de 47,3 GWh, se identificaron como críticos el tratamiento secundario (45 % del total), el pretratamiento (16 %) y el tratamiento terciario (15 %). La planta genera internamente 13,2 GWh/año de energía producida a partir del biogás, cubriendo el 28 % de su demanda. Para completar la cobertura del déficit de 34,1 GWh/año, se propuso el aumento de biogás por codigestión, aportando 5 GWh adicionales al año; también la instalación de un campo fotovoltaico de 1,706 MWp (aprox. 3 101 módulos de 550 Wp), con una producción estimada de 2,05 GWh/año y el montaje de cuatro aerogeneradores de eje vertical de 100 kW, que sumarían 0,68 GWh/año. El mix renovable propuesto generaría unos 20,85 GWh/año, lo que cubre el 61 % del déficit y contribuye al 44 % del consumo total. Estas incorporaciones suponen un ahorro anual de 2,54 M€ en compra de electricidad además de una reducción de emisiones de 3,93 ktCO₂. Los resultados de este estudio avalan la viabilidad técnica y económica de esta estrategia y ofrecen un modelo replicable para EDARs que requiera combinar biogás, energía solar y minieólica en su transición hacia la sostenibilidad.

ABSTRACT

This Master's Thesis aims to address the high energy consumption of Wastewater Treatment Plants (WWTPs), using the El Prat de Llobregat WWTP (Barcelona) as a reference case. The main objective is to assess its energy balance in order to design a renewable energy integration plan that supports progress toward energy self-sufficiency, while also reducing operational costs and minimizing CO₂ emissions. Starting from an annual consumption of 47.3 GWh, the most energy-intensive processes were identified as secondary treatment (45% of total), pretreatment (16%), and tertiary treatment (15%). The plant currently generates 13.2 GWh/year of energy from biogas, covering 28% of its demand. To address the remaining 34.1 GWh/year deficit, the study proposes increasing biogas production through codigestion, contributing an additional 5 GWh/year; installing a 1.706 MWp photovoltaic field (approx. 3,101 modules of 550 Wp), with an estimated output of 2.05 GWh/year; and deploying four vertical-axis wind turbines of 100 kW each, adding 0.68 GWh/year. The proposed renewable mix would generate around 20.85 GWh/year, covering 61% of the deficit and contributing to 44% of the plant's total energy consumption. These measures would result in annual savings of €2.54 million in electricity purchases and a reduction of 3.93 ktCO₂ in emissions. The findings of this study support the technical and economic feasibility of the strategy and offer a replicable model for WWTPs seeking to combine biogas, solar energy, and small-scale wind power in their transition toward sustainability.

Palabras clave: EDAR, Autosuficiencia energética, Energías renovables, Biogás, Energía fotovoltaica, Energía minieólica, Codigestión anaerobia, Cogeneración, Eficiencia energética, Emisiones de CO₂

1. INTRODUCCIÓN

En este TFM abordamos el alto consumo energético en las EDAR como una problemática que podría encontrar soluciones mediante la integración de energías renovables, pues, dicha estrategia se adapta a la constante búsqueda de la autosuficiencia energética. Por lo tanto, el documento contiene el análisis del consumo actual, así como la evaluación de la viabilidad de distintas energías limpias, y, también la cuantificación de los beneficios energéticos, económicos y ambientales que su implementación podría derivar. De esta manera, contribuimos con ideas de sostenibilidad y eficiencia dentro de estas infraestructuras vitales.

1.1 Contexto y justificación

Las instalaciones de una Estación Depuradora de Agua Residuales son de gran consumo energético, tal como lo abordaremos más adelante. Estas plantas presentan principalmente un mayor consumo eléctrico, lo cual significa elevados costos operativos, y, también gran una dependencia de fuentes de energía externas. Este alto consumo se explica por diversos factores, tales como la tecnología de depuración, el tamaño de la planta y su gestión operativa, la calidad requerida del afluente y la composición misma de las aguas residuales. Por ejemplo, Walther (2009), explica que, en la etapa del tratamiento secundario, ocurre el proceso de aireación, el cual, como veremos más adelante, ocupa el mayor consumo energético (entre 50% y 60%), del total de la energía eléctrica consumida en la planta.

Por otro lado, cabe destacar, que en esta dependencia la red eléctrica convencional, se produce un impacto ambiental y económico significativos, dado al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero que se asocian a la generación de electricidad. Por consiguiente, la huella de carbono que dejan estas instalaciones es bastante considerable. Del mismo modo, en este contexto, es relevante el aumento del costo de la energía eléctrica, razón por la cual, el tema de la autosuficiencia energética se vuelve clave en el caso de las EDAR.

1.2 Problemática

Por consiguiente, entre la problemática que abordaremos, se encuentra el déficit energético y la necesidad de optimización. Por ejemplo, como sabemos, algunas EDAR pueden generar biogás a partir de la digestión anaerobia, lo cual es útil para el autoconsumo de la propia planta. Sin embargo, pese a ello, sigue existiendo un déficit energético, es decir, existe una necesidad de cubrir dicha insuficiencia mediante fuentes externas, especialmente enfocándonos en contribuir junto con el biogás en los procesos que demanda más energía. Según la información revisada en este documento, en la EDAR El Prat Llobregat, se identificó un déficit de 34,122,097 MWh/año. Como veremos más adelante, es posible contribuir a la reducción de este déficit mediante la incorporación de energías renovables. La problemática de la optimización deficiente, plantea que se gestione de manera adecuada la demanda energética en función de los objetivos de calidad del agua y así garantizar un consumo óptimo. De igual manera, se recomienda la optimización de procesos específicos tales como la aireación, el uso de bombas y compresores y el tratamiento de lodos, lo cual es clave para conducir una reducción del consumo energético.

1.3 Relevancia e interés ecológico

En tal sentido, la implementación de energías renovables en el tratamiento de aguas residuales contribuye a la sostenibilidad y eficiencia, reduce la dependencia de los combustibles fósiles tradicionales y ayuda a la optimización y rendimiento energético de las plantas. De igual manera, la sinergia entre tecnologías limpias y procesos ambientales promueve la economía circular en comunidades rurales y urbanas, donde también es vital la resiliencia hídrica. Igualmente, factores como aprovechamiento del biogás y una futura incorporación de energías renovables asisten en una operación más autónoma y responsable.

1.4 Descripción del tema

Las aguas residuales pueden ser definidas como aquellas aguas contaminadas producto del uso de aguas limpias por el hombre, trayendo consigo cantidades importantes de productos químicos y microorganismos, que alteran las propiedades del agua, y que deben ser removidos de esta, para que pueda ser reutilizada o incorporada nuevamente a la naturaleza.

1.4.1 Las Aguas Residuales

Las aguas residuales municipales poseen una variada composición, reflejando los diferentes contaminantes provenientes de sus distintos orígenes; los cuales pueden ser:

- Aguas residuales domésticas.
- Aguas residuales industriales.
- Aguas residuales agrícolas y pecuarias.
- Aguas pluviales o aguas blancas.

Las aguas residuales de origen doméstico constituyen los residuales líquidos dimanantes de la actividad diaria del hombre, estas aguas son recogidas en los sistemas de alcantarillado o en algunos casos vertidas al ambiente (Villanueva & López, 2014). Según (Carreño, 2016) se ha verificado que las aguas residuales domésticas son fluidos que combinan las excretas de las poblaciones, como heces y orinas; además de aguas de limpieza, por lo que se puede considerar que implican contenidos de materia orgánica, gérmenes patógenos, fósforo, nitrógeno y sólidos disueltos. Por otro lado, las aguas residuales industriales constituyen aquellos residuales líquidos vertidos desde locales en los que se realiza alguna actividad industrial o comercial, estas poseen una composición variable dependiendo del tipo de industria o actividad que se realiza en ella, pero, por lo general, presentan elevada carga orgánica, sustancias con dificultad para biodegradarse y en algunos casos componentes tóxicos. (García, 2006). Las aguas residuales agropecuarias, proceden de las labores ganaderas y agrícolas; estos efluentes residuales conllevan altas concentraciones de sustancias orgánicas, fósforo, azufre y nitrógeno; en el caso de las aguas residuales pecuarias, traen consigo una importante contaminación bacteriológica mientras que las agrícolas, pueden arrastrar compuestos bioacumulables por el uso de pesticidas (Smith et al., 2001). Por último, las aguas residuales pluviales o aguas blancas como también se les conoce, son aquellas de origen atmosférica, y de la limpieza de parques y calles, estas pueden contener partículas de los productos de la combustión gaseosa, materia orgánica de residuos animales, materias en suspensión de origen mineral, etc. (García et al., 2012).

1.4.1.1 Tratamientos de Aguas Residuales.

Villanueva y López (2013) describen los tratamientos de aguas residuales como procesos químicos, físicos y biológicos que fueron diseñados para eliminar contaminantes de las aguas ya usadas. Estas aguas pueden ser domésticas, industriales o agrícolas, y el objetivo de su tratamiento es el de hacerlas aptas para su reutilización o para su retorno al medio ambiente sin que cause algún daño. Los autores explican que el proceso para tratar las aguas residuales incluye por lo menos cuatro etapas que son: pretratamiento, sedimentación, procesos biológicos y eliminación de patógenos y contaminantes específicos.

En cada etapa del tratamiento de aguas residuales ocurren procesos químicos biológicos y físicos expuestos de la siguiente manera:

- Tratamiento preliminar. En este ocurre la eliminación de residuos fácilmente separables. También, en algunos casos se ejecuta un proceso de preaireación.
- Tratamiento primario. Comprende los procesos de sedimentación y tamizado, entre otros.
- Tratamiento secundario. Aquí se aplican procesos biológicos aerobios y anaerobios y físicoquímicos (floculación), útiles en la reducción de gran parte de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).
- Tratamiento terciario o avanzado. Está dirigido a la última reducción de la DBO; así como, de metales pesados y/o contaminantes químicos específicos y la correspondiente eliminación de patógenos y parásitos. También conocido como tratamiento de lodos; según Collazos (2008), los lodos generados en el proceso pueden ser primarios, secundarios o digeridos (mixtos); estos son sometidos a espesamiento, digestión y deshidratación, con el propósito de reducir su volumen y estabilizarlos.

Los tratamientos de aguas residuales son esenciales para fomentar un mayor equilibrio en el medio ambiente y ayudan a proteger la salud pública, asegurando que los vertimientos cumplan con estándares de calidad. Los procesos de tratamiento contribuyen a minimizar el impacto ambiental porque se evita que las fuentes hídricas sean contaminadas, al tiempo que se permite la reutilización del agua. Sin embargo, las plantas requieren un gasto energético significativo, especialmente en etapas como aireación y deshidratación, que, en algunos casos pueden representar altos niveles de consumo eléctrico. En tal sentido, optimizar el diseño y operación es crucial para reducir costos y mejorar la sostenibilidad.

1.4.2 Consumo Energético de una EDAR

Como hemos visto hasta ahora, en el tratamiento de las aguas residuales se ponen en práctica diversos procesos que elevan el consumo de energía. Se puede decir que dicho consumo varía de acuerdo con el tamaño de la EDAR, también depende de la carga contaminante de influente, el tipo de tratamiento y, también de la tecnología utilizada. En tal sentido, el coste de la energía también puede variar de una planta a otra. Esta alta demanda energética depende de varios factores, según Plappally (2012) y Bodik y Kubaska (2013) se pueden destacar:

- Composición de las aguas residuales, procesos más o menos complejos energéticamente en función del estado de las aguas de entrada.

- Geolocalización de la planta.
- Tamaño de la planta, las ratios de consumo energético dependen de la capacidad de la misma.
- Tecnología empleada para los procesos de depuración.
- Calidad requerida del efluente.
- Antigüedad de la planta.
- Gestión Operaria.

Para desarrollar un estudio de consumo energético en una EDAR, se considera como variable el consumo energético unitario expresado como kWh/m³ (energía consumida por metro cúbico de agua tratada (Martínez, 2019).

En una investigación realizada por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE,2010) sobre el consumo energético de diferentes EDAR en toda España se arribó a la conclusión de que la energía consumida en la depuración de las Aguas Residuales Urbanas del país constituye el 1% del consumo energético nacional. Según esta literatura la potencia media nacional necesaria para la depuración de las aguas residuales urbanas es de 0,67 kWh/m³, reduciéndose un 17,5% si se aplican técnicas de optimización energética. En otro estudio de Hardy et al. (2012), se indica que el consumo unitario de las depuradoras en España varía entre (0,41-0,61) kWh/m³, obteniéndose un valor promedio de 0,53 kWh/m³.

1.4.2.1 Consumo Energético en los procesos de la EDAR

Un análisis energético de cada uno de los procesos de una EDAR puede contribuir a determinar cómo favorecen cada uno de estos al consumo total de la instalación. A continuación, se muestra un resumen de los datos de consumo energético por tratamiento encontrados en la literatura consultada.

- **Colección, tratamiento primario y bombeo:** de todos los tratamientos que intervienen en la depuración de aguas residuales, estos procesos son los que menos energía requieren, dependiendo fundamentalmente de la distancia de bombeo y el diseño del tratamiento. La intensidad energética está en el rango 0,045-0,14 kWh/m³ en Hungría, 0,02-0,1 kWh/m³ en Canadá y 0,04-0,19 kWh/m³ en Nueva Zelanda. (Kneppers, et al., 2009)
- Tratamiento secundario: el consumo energético para esta parte del proceso de depuración de aguas depende fundamentalmente del tipo de tecnología empleada. En el tratamiento convencional de lodos activados, por ejemplo, la intensidad energética suele encontrarse entre 0,33-0,60kWh/m³ para EEUU, 0,46 kWh/m³ para Australia y 0,269 kWh/m³ para China (Bodik & Kubaska, 2013). En el tratamiento secundario la mayor parte de la energía eléctrica (50-60) % del total es empleada en la aireación (Walther, 2009). A continuación, se puede observar una figura con el desglose energético para cada tratamiento.

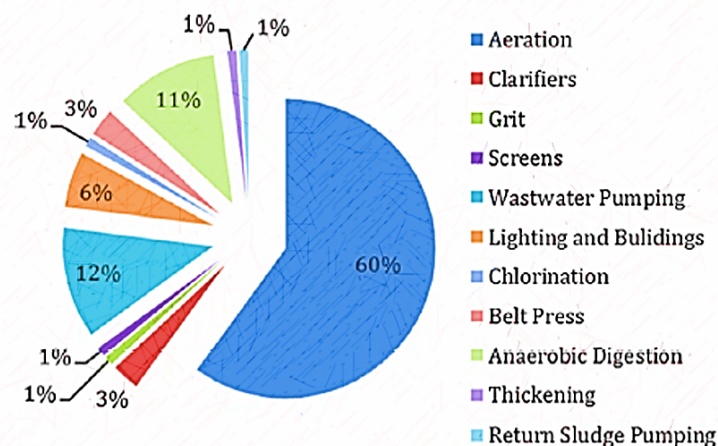


Figura 1. Desglose de la energía empleada en tratamiento (Walther, 2009).

Además del tratamiento convencional de lodos activados existen otros procesos pertenecientes al tratamiento secundario que poseen un alto consumo energético asociado a un elevado tiempo de retención hidráulica y a una alta demanda específica de oxígeno. Según una investigación de (Yang LingBo, 2010) el mayor consumo energético del tratamiento secundario de una EDAR en China está dado por el proceso de aireación extendida ($0,34 \text{ kWh/m}^3$), seguido por el tratamiento de lodos activados llevado a cabo en un reactor biológico secuencial ($0,33 \text{ kWh/m}^3$), posteriormente se encuentran los procesos de zanja de oxidación ($0,325 \text{ kWh/m}^3$), sistemas anóxicos-óxicos $0,30 \text{ kWh/m}^3$ y por último los procesos convencionales de lodos activos $0,26 \text{ kWh/m}^3$ y adsorción biológica ($0,225 \text{ kWh/m}^3$). Por otra parte, en países como Dinamarca, Francia y Alemania se opta por incinerar el 14% de sus lodos, este método es más común aún en Japón y EEUU, dónde se incinera del 25% al 50% de los lodos (Arnold & Merta, 2011).

En un estudio realizado en las EDAR de la Comunidad de Madrid, para depuradoras con caudales superiores a $700 \text{ m}^3/\text{d}$ resultan valores medios de consumo energético de $2,50 \text{ kWh/kgDQO}$ y $0,72 \text{ kWh/m}^3$, produciéndose un notable aumento para flujos inferiores a $300 \text{ m}^3/\text{d}$, para caudales de tratamiento superiores se estabiliza alrededor de los $0,60 \text{ kWh/m}^3$. Gran parte del consumo energético de las EDAR estudiadas se produce en el proceso biológico de remoción de materia orgánica con aporte de oxígeno mediante equipos electromecánicos como turbinas, soplantes, turbocompresores y rotores. Se detectan significativas diferencias en el consumo energético según la tecnología de aireación utilizada siendo superior para soplantes con $0,85 \text{ kWh/m}^3$ mientras que para los procesos que emplean rotores o turbinas se obtiene un consumo unitario $0,46 \text{ kWh/m}^3$ y $0,27 \text{ kWh/m}^3$ respectivamente (Ferrer et al., 2016).

Por su parte, el tratamiento avanzado o terciario es el conjunto de tratamientos encaminados a obtener un efluente que se adecúa a los valores establecidos por la legislación correspondiente; dentro de estos tratamientos podemos encontrar procesos como: filtros de arena, microfiltración, ósmosis inversa, procesos de nitrificación-desnitrificación, entre otros. El tratamiento terciario requiere altos

consumos energéticos debido a que se basa en la eliminación de algunos nutrientes existentes en las aguas residuales. Según la literatura estos procesos han arrojado valores de consumos energéticos de 0,39 kWh/m³ en Japón, 0,43 kWh/m³ en EEUU, 0,41 kWh/m³ en Taiwan y 0,49 kWh/m³ en Nueva Zelanda. Según la Water Environment Federation los filtros representan alrededor del 13% del consumo energético de media para este tipo de tratamiento. (Plappally, 2012) (Bodik & Kubaska, 2013) (Pitas et al., 2010).

En cuanto a los consumos de las distintas fases del proceso de depuración, según lo visto con anterioridad el mayor valor de consumo energético corresponde al tratamiento biológico, siendo superior al 50% del consumo total de energía eléctrica, seguido por el tratamiento terciario, otros tipos de tratamientos secundarios y por último el pretratamiento y tratamiento primario, es de suma importancia en la depuración de aguas residuales realizar una correcta gestión de la instalación y ajustar la demanda de energía necesaria en función de los objetivos de calidad a alcanzar. (Simón et al., 2012)

1.4.2.2 Consumo Energético con diferentes tamaños de plantas

Para realizar el estudio del consumo energético en una EDAR, se debe tener en cuenta la población de la que proceden sus aguas residuales, la carga contaminante de una depuradora de aguas se expresa en habitantes equivalentes (h-e); este parámetro hace alusión a la carga contaminante proveniente de los habitantes físicos, comercios y pequeñas industrias que vierten sobre la red de saneamiento. La proporción de estos vertidos industriales y comerciales aumenta en relación con el tamaño del municipio, asumiéndose aproximadamente un valor de un 5% para municipios pequeños y un 20% para los grandes (Martínez, 2019). La Directiva 91/271/CEE establece la h-e como la carga orgánica biodegradable con una demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 5 días (DBO₅) de 60g de oxígeno por día.

Según el estudio de (Albaladejo & Albadalejo, 2016) el consumo energético decrece exponencialmente cuando el tamaño de las EDAR aumenta, por lo cual se sugiere siempre que sea posible realizar el diseño de las EDAR intentando tratar el mayor número de h-e, para lograr, por tanto, una optimización energética por m³ tratado, por DBO₅, tratada y por h-e.

Según los datos recogidos en la investigación de la (IDAE, 2010), se estima que la potencia total requerida para la depuración de aguas residuales en España es de 305 MW, lo que supone una media de 49 kWh/(h-e año) o 0,67 kWh/m³. Según este estudio el 28% de esa potencia total se consume en municipios de menos de 5000 h-e, el 44% se consume en plantas depuradoras que prestan servicio a poblaciones de entre 5000 h-e y 50 000 h-e, mientras que el 28% de la potencia total se consume en depuradoras grandes de más de 50 000 h-e. Estas cifras muestran que la mayor parte de la potencia requerida para la depuración de aguas residuales urbanas se consume en pequeñas y medianas poblaciones.

Los tratamientos que intervienen en la depuración de aguas residuales se implantan y se adaptan en función del tamaño de la población, por ejemplo, los biodiscos se suelen instalar en depuradoras de tamaño pequeño, mientras que los procesos de lodos activos se instalan en EDARs de mayor capacidad, además en las depuradoras pertenecientes a grandes poblaciones se optimiza el diseño y, por tanto, el consumo

energético es más reducido conforme aumenta el tamaño de la instalación (IDAE, 2010).

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por IDAE (2010) de las potencias totales en función de la población servida, este estudio, aporta evidencias claras con respecto al sobredimensionamiento excesivo en instalaciones para pequeños municipios.

Tabla 1. Potencias por habitante (W/h.e.) de una EDAR en función de su tamaño (IDAE,2010).

Tamaño del municipio (h.e.)	Potencia (W/h.e.)
<100	6,4
101-500	19
501-1000	15,8
1001-2000	14
2001-3000	10,1
3001-5000	10,5
5001-10 000	10
10 001-20 000	8,1
20 001-30 000	5,6
30 001-50 000	5,1
50 001-100 000	4,4
100 000-500 000	2,5
>500 000	2,4
Media	5,6

A continuación, se muestra la figura referente al reparto de los 305 MW de la potencia global consumida en la depuración de las aguas residuales de España en función del tamaño de la población.

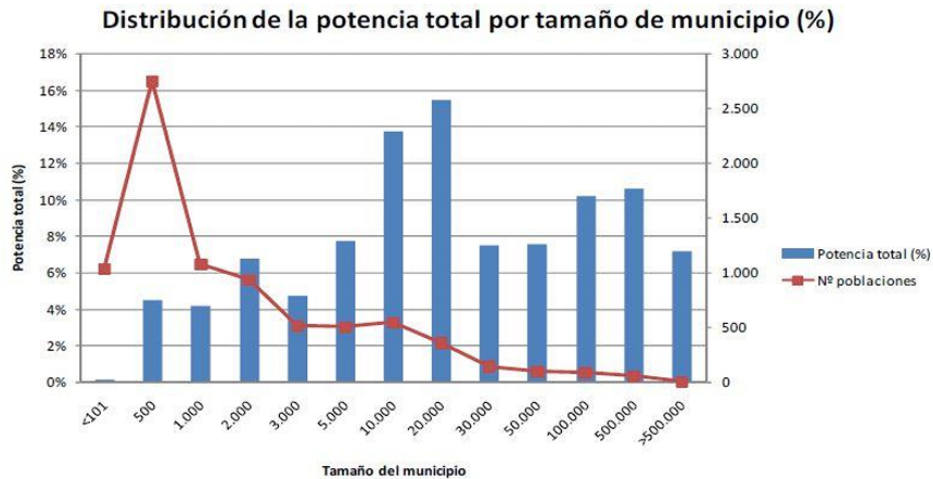


Figura 2. Distribución de la potencia total requerida por tamaño de municipio (%) y número de depuradoras en cada tramo (IDAE, 2010).

Según la (IDAE, 2010) en la anterior figura se puede observar que el 28% de la potencia global está instalada en poblaciones inferiores a los 5000 habitantes, que representa el 84% del total de municipios. En esta franja, se sitúan, además, las EDARs con sobredimensionamiento por razones de simplificación del proceso y robustez. El 44% de la potencia total se encuentra instalada en depuradoras de entre 5000 a 50 000 habitantes, representando el 14% del total de municipios. Estas depuradoras por lo general no poseen sistemas de control de aireación, lo que conlleva a elevados consumos energéticos. El 28% restante de la potencia instalada pertenece al consumo de las grandes depuradoras (>50 000 h.e) con consumos unitarios más ajustados (IDAE, 2010).

En el informe de la (IDAE, 2010) se ha estimado, además, el consumo energético en las EDARs de España vinculado a cada tipo tecnología en función del tamaño del municipio. La Figura 3 muestra la potencia necesaria por tamaño de planta y por unidad de tratamiento, expresada como W/h.e.

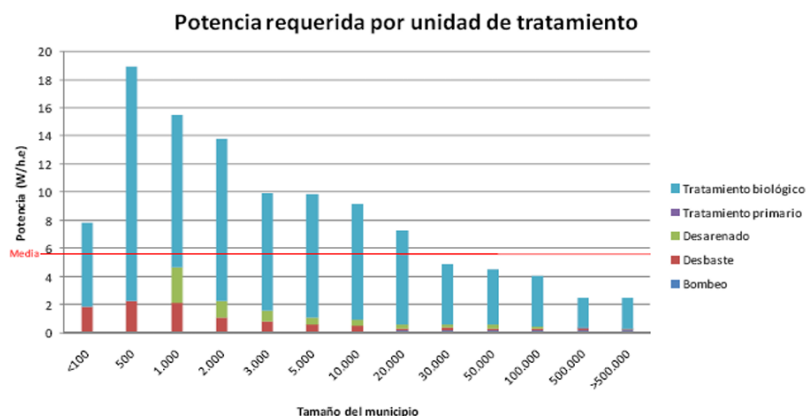


Figura 3. Potencia requerida por unidad de tratamiento según el tamaño de municipio.

1.4.3 La eficiencia energética en las EDARs

Las EDARs como ya se ha mencionado con anterioridad, presentan por lo general grandes consumos energéticos, aunque estas con un proyecto de eficiencia de energía adecuado podrían reducir dichos consumos y provocar impactos positivos, tanto en el tema ambiental como en el económico. Según Henriques y Catarino, (2017), algunas auditorías energéticas desarrolladas en plantas de tratamiento de aguas residuales muestran que cada EDAR independientemente de su tamaño presenta oportunidades de ahorros energéticos; estos ahorros pueden oscilar desde el 20% hasta el 40% del consumo. Se ha demostrado que las acciones de reducción del consumo de energía en los procesos de eliminación de contaminantes tienen bajos impactos en la eficiencia global de la EDAR; mientras que las EDARs que poseen tratamientos convencionales de lodos activados y aireación extendida muestran mejores eficiencias de energía por la centralización del tratamiento de aguas (Molinos et al., 2018).

Además de los ahorros energéticos que se pueden lograr en los equipos de los procesos de aireación, también se pueden emplear herramientas de control como la Lógica Difusa, esta puede ayudar con determinados problemas complejos a partir de reglas y algoritmos. En las EDARs para los sistemas de tratamiento de aguas residuales suelen emplearse bombas centrífugas, bombas de tornillo o bombas sumergibles, todo depende de las necesidades del sistema, tales como el caudal, la presión y el tipo de agua residual. No obstante, el diseño de la bomba no tiende a ser exacto debido a las diferencias entre los flujos operacionales y el diseño, por lo cual, su rendimiento puede verse afectado y presentar problemas que influyen negativamente en la eficiencia de esta. Estas ineficiencias que afectan el consumo energético pueden reducirse con un diseño y gestión adecuados (Torregrossa et al., 2017). Otro aspecto que favorece el aumento de la eficiencia energética es la consideración de buenas prácticas como el ajuste de equipos eléctricos al flujo, engrasado y limpieza de las maquinarias y empleo de materiales aislantes para la retención de calor en tanques.

1.4.3.1 Producción de Energía para autosuficiencia en EDAR

La autosuficiencia de las EDARs se ha convertido en un tema en el que enfocarse debido al aumento del costo de la energía eléctrica. Una EDAR autosuficiente hace referencia a aquellas que generen la totalidad de su consumo energético con el propósito de trabajar únicamente a partir de esta energía producida. Se puede trabajar en este aspecto poniendo en práctica estos dos conceptos:

1. Obtención de energía eléctrica a partir de los residuos de la planta.
2. Producción de energías renovables usando elementos del entorno.

La principal fuente de energía que se puede obtener en una EDAR es el biogás que se obtiene a partir de la digestión anaerobia. El principal objetivo de la digestión anaerobia de lodos de depuradora es la de estabilizar y reducir la cantidad de lodos generados en estas, sin embargo, a partir de este proceso se puede obtener como producto un el biogás, el cual está formado mayoritariamente por metano (CH_4). Una investigación desarrollada en cinco EDARs en Cataluña obtuvo que mediante digestión anaerobia se puede recuperar hasta un 52% de la energía contenida en los lodos transformándola en biogás. La típica composición del biogás obtenido ronda entre el 50% al 70% de metano, siendo las EDARs que aprovechan este recurso más

eficiente, obteniendo un consumo global de un 40% inferior que las que no utilizan biogás.

Este alto porcentaje de metano en el biogás hace que sea muy útil su aprovechamiento para la producción de energía; entre los diferentes usos que puede tener el biogás en una EDAR se encuentran:

1. Combustión directa en calderas.
2. Generación de electricidad y calor mediante sistemas de cogeneración con turbinas de gas o motores de combustión.
3. Conversión de biogás a bio-CNG
4. Producción de H_2 a partir de biogás

Dependiendo de cada proceso se requerirá la purificación del biogás o algún tipo de tratamiento específico como es el caso de la conversión a bio-CNG donde no solo se purifica el biogás, sino que también se eleva a la presión de 20-25 MPa.

El metano forma parte de la lista de gases de efecto invernadero (GEI), según recoge el protocolo de Kioto, su emisión a la atmósfera está prohibida, teniendo en cuenta el régimen de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero regulado en España por la Ley 1/2005 y el RD 341/2010 traspuesta de la Directiva 2003/87/CE, por lo cual, se debe eliminar mediante la combustión con el objetivo de que sus emisiones no se tengan en cuenta como perjudiciales para la capa de ozono.

En tal sentido, Martínez (2019) plantea que, ante la escasez y el alto costo de la energía actuales, el objetivo consiste en aprovechar el biogás generado en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) mediante digestión anaerobia, esto especialmente en plantas con más de 100.000 h-e. Como sabemos, este proceso permite generar energía eléctrica, así como, reducir costos operativos y estabilizar el lodo, además de contribuir significativamente a la disminución de olores. En este proceso, el lodo utilizado proviene en un 60–70% del tratamiento primario y en un 30% y 40% del biológico.

Según Martínez (2019), en el proceso de digestión anaerobia ocurren varias fases (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis). Durante la hidrólisis, las macromoléculas (proteínas, lípidos, carbohidratos) se descomponen en componentes solubles tales como azúcares simples, aminoácidos, alcoholes, ácidos grasos de cadena corta, y amonio. Más adelante, estas moléculas son convertidas en ácidos grasos volátiles y también, en otros productos durante la acetogénesis y la acidogénesis. En la fase de metanogénesis, los metanógenos convierten acetato, H_2/CO_2 y algunos pocos sustratos en metano y CO_2 . Como sabemos, los componentes del biogás son principalmente CH_4 y CO_2 , además de trazas de otros gases y contaminantes lo cual puede requerir tratamiento. (Martínez, 2019)

Por otro lado, tal como lo plantea Martínez (2019), la codigestión mejora la producción y la calidad del biogás, pues combina lodos de depuradora con sustratos orgánicos altamente biodegradables, los cuales provienen de industrias como la alimentaria, la farmacéutica o la ganadera; razón por la cual se reducen los costos energéticos de explotación. Como medida de optimización del proceso, se recomienda el uso de

sustratos líquidos, tamizados y libres de impurezas, dosificados con precisión. De igual manera, es conveniente que las instalaciones estén sobredimensionadas para manejar el aumento de biogás, ya que este puede alcanzar hasta 0,52 Nm³/kg DQO aportada. (Martínez, 2019)

Se entiende que el biogás generado en la digestión anaerobia tiene un poder calorífico inferior (PCI) de 5–6,5 kWh/Nm³ y su uso más común en EDAR es en calderas para calefacción, donde se observa un rendimiento del 90% y producción de 4,5 kWh/m³. (Aguiló, 2018) Al respecto, el autor sugiere que, para ello, se requiere eliminar condensados, ajustar la presión (>0,2 bar) y tratar el gas si contiene H₂S. De acuerdo con la tendencia actual, se emplea en motores de combustión interna para generar electricidad (300–3.000 kW), donde se maneja un rendimiento del 36% al 38%, algo menor que el del gas natural (40–42%). Como resultado de esta aplicación, se exige la reducción de humedad (<30%), H₂S (<50 ppm) y eliminar siloxanos para evitar corrosión y abrasión, lo que implica mayores costos de mantenimiento. (Aguiló, 2018)

Por su parte, señala Aguiló (2018), que las microturbinas representan una alternativa eficiente para generar electricidad con biogás, pues son más compactas que los motores de combustión interna, además, requieren menos mantenimiento; sin embargo, son sensibles a los siloxanos, por lo que se necesita filtrado con carbono activo. No obstante, las microturbinas se adaptan bien a la demanda variable de energía en EDAR; estas pueden instalarse en paralelo y también pueden operar según las necesidades. Asimismo, la generación para autoconsumo está regulada por el RD 900/2015, aplicable a instalaciones conectadas a la red eléctrica. (Aguiló, 2018)

1.4.3.2 Optimización del consumo energético en las EDAR

Los costes de explotación de una EDAR están representados principalmente por las partidas de los costes energéticos, por tanto, en la búsqueda de minimizar los costes de explotación, es importante prestar especial atención a la eficiencia energética. A continuación, vamos a describir las principales acciones de optimización del consumo energético de una EDAR.

1.4.3.2.1 Optimización del sistema de aireación

Como hemos visto, entre 15% y 25 % de los costes operativos totales corresponden al proceso de aireación y hasta el 70% del consumo energético en plantas de tratamiento biológico. Además, sus costes fijos representan entre el 15% y 25% del coste de construcción de la planta. Por ello, optimizar el sistema de aireación podría ser la clave para mejorar la eficiencia energética. (Collado et. al, 2019) Para lograr este objetivo, es fundamental controlar ciertos parámetros críticos del proceso biológico, según Collado et. al. (2019) se presentan a continuación una serie de requerimientos:

- Optimizar las necesidades de oxígeno del sistema. Por ejemplo, aplicar selectores anóxicos en la entrada del biológico, también procesos *Anammox* para los retornos de las líneas de lodos, así como el empleo de TRS elevados.
- Eficacias de transferencia de oxígeno desde la fase gaseosa a la líquida. Se recomienda la selección de sistemas con elevadas SAE y SOTE, cuyo diámetro medio de burbuja gire en torno a los 2.0 mm.

- Presiones de suministro de aire. Exigir el mantenimiento y limpieza de difusores, así como la optimización de la profundidad del difusor.

1.4.3.2.2 Optimización de la línea de lodos

La implementación de digestión anaerobia junto con cogeneración permite recuperar hasta un 25% del consumo energético de la planta. Sin embargo, para que esta solución sea viable económicamente debe aplicarse en una EDAR con capacidad superior a 100.000 h-e, debido a los altos costos de inversión. De manera que, en instalaciones medianas, la cogeneración no siempre se acompaña del proceso de digestión, por ello, mejoras como digestores termófilos, de doble etapa o codigestión pueden optimizar el balance energético. (Collado et. al, 2019)

Según Collado et. al. (2019), cuando se aplican pretratamientos al lodo se mejora su biodegradabilidad, se optimiza la digestión anaerobia y se incrementa la producción de biogás. También se conoce de efectos como la reducción del tiempo de residencia en el digestor, el mejoramiento de la deshidratación y la calidad del lodo. Sin embargo, estos tratamientos pueden aumentar la carga orgánica y de nutrientes en los caudales de retorno, lo que se traduce en la elevación del consumo energético en la aireación. Por ello, Collado et. al. (2019), plantea que es esencial realizar un balance energético global con el fin de asegurar que se genera más energía de la que se consume.

Uno de los pretratamientos que es eficaz para mejorar la digestión anaerobia es la hidrólisis térmica, que también contribuye al aumento de la producción de biogás, sin embargo, requiere una inversión elevada. Suele aplicarse en EDAR con más de 100.000 h-e o más de 3.000 ton/año de lodo. Para lograr una reducción del consumo energético del proceso, el lodo debe tener una sequedad superior al 15%, lo que exige una etapa previa de deshidratación. (Collado et. al, 2019) El autor señala que, pese al gasto adicional, se logra una mayor generación de energía y se reduce el uso de equipos, además, no es necesario calentar los digestores, ya que el lodo entra caliente.

1.4.3.2.3 Optimización del decantador primario

Se entiende que la decantación primaria es capaz de eliminar al menos un 20% de la DBO y un 50% de los sólidos en suspensión. Además, su optimización aporta tres beneficios energéticos que son:

1. Reducción de la carga orgánica del tratamiento secundario, lo que disminuye el consumo en aireación.
2. Disminución de la cantidad de lodo secundario, lo cual requiere más energía para su tratamiento.
3. Aumento del lodo primario, el cual es más rico en materia biodegradable, y, por lo tanto, es capaz de generar el doble de biogás que el lodo secundario. Se estima que el rendimiento podría mejorarse con coagulantes, no obstante, un exceso podría afectar negativamente la desnitrificación y el crecimiento microbiano. (Collado et. al, 2019)

1.4.3.2.4 Optimización de bombas y compresor

Collado et. al. (2019), propone el uso de motores de alta eficiencia, como turbocompresores de levitación magnética con el objetivo de reducir pérdidas energéticas en más del 40% frente a soplantes rotativos, esto debido a su mayor rango de presión y eliminación de rozamientos. Se tiene entendido que muchos equipos están sobredimensionados y llegan a operar fuera de su punto óptimo, pero esto se puede corregir seleccionando bombas y compresores adecuados al caudal. Por su parte, los sistemas de control de frecuencia permiten ajustar la impulsión según demanda, lo que reduce el estrés eléctrico y evita atascos. El autor también plantea que se puede aprovechar el salto de agua en el desagüe para instalar microturbinas hidráulicas con el fin de generar energía eléctrica adicional.

1.4.3.2.5 Optimización de retornos de líneas de lodos

Se puede obtener un aporte significativo de nutrientes a través de las aguas de retorno de la línea de lodos. En tal sentido, el caudal puede llevar entre el 15% y 25% de la carga de nitrógeno de la entrada de la EDAR, lo que supone un aumento considerable de nitrógeno que debe ser tratado. (Collado et. al, 2019) Para ello, se han desarrollado varios procesos que actúan de forma eficiente sobre este flujo, logrando una reducción del consumo energético global. Por ejemplo, cuando se aplica una nitrificación parcial del amonio junto con el proceso *Anammox*, se puede eliminar el nitrógeno de la corriente de retorno con mayor eficiencia, en comparación con la nitrificación/desnitrificación convencional. Collado et. al. (2019), explica que, desde el punto de vista de optimización energética, esta opción reduce el consumo de oxígeno en un 67% y, por ende, del consumo energético asociado. Al respecto, se conoce que es requerida menos materia orgánica para llevar a cabo la desnitrificación de ese nitrógeno dentro del reactor biológico, razón del incremento de los lodos en el digestor anaerobio.

1.4.3.2.6 Optimización de sistemas de control

La eficiencia operativa se garantiza cuando se cuenta con sistemas de control avanzados, los cuales sean capaces de minimizar las desviaciones entre los valores programados y los reales. En este sentido, aunque la fiabilidad de los sensores es clave, a veces su calibración en entornos complejos como las depuradoras presenta desafíos. Por este motivo, se recomienda mejorar su diseño, o, quizá, implementar sistemas automáticos de limpieza y calibración que aseguren mediciones precisas y en tiempo real. (Collado et. al, 2019)

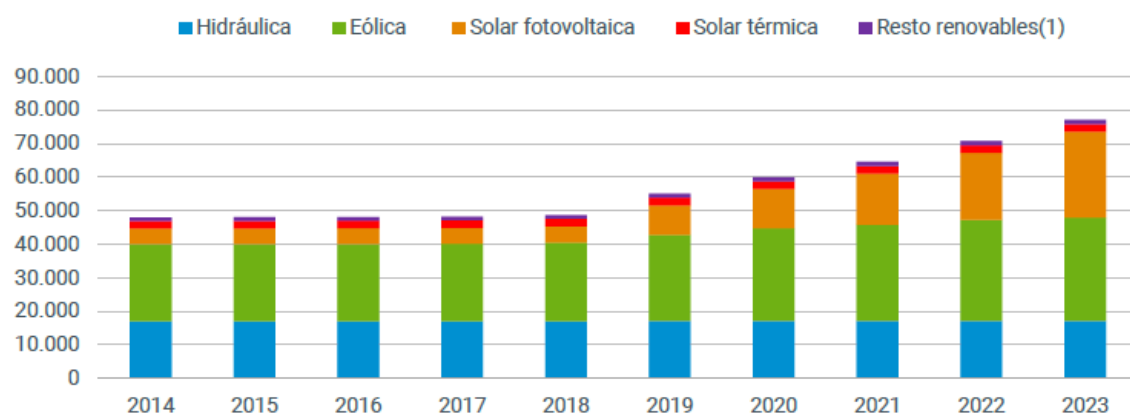
1.4.4 Situación actual de las Energías renovables

Para el año 2023 en España continuó el crecimiento y avance del entorno energético, registrando un incremento de potencia instalada renovable del 8,8 % en relación al respecto al 2022, este incremento supone de 6.261 MW adicionales por esta vía. En tal sentido, las instalaciones de energía renovable representan más del 61% del parque generador de energía eléctrica en España. De acuerdo con los datos de la Red Eléctrica (2023), El aumento de la potencia instalada renovable se debe principalmente a que la potencia solar fotovoltaica también ha aumentado, permitiendo un aporte de 5.594 MW, lo que equivale a un 89,3 % de la nueva potencia. Estos datos representan el mayor incremento histórico en esta tecnología, situándola como la tercera fuente de generación en el ranking actual con mayor potencia, definido con el 20,3 % del total de potencia instalada nacional. Por su parte, la eólica ha aportado 661

MW adicionales a la nueva potencia renovable, lo que la mantiene como la principal tecnología renovable del país, representando el 24,5 % del parque generador nacional.

Red Eléctrica (2023), también destaca la mayor participación de la generación renovable en 2023 como producto del incremento de la producción hidráulica con el 41,1 % y solar fotovoltaica con el 33,8 % respecto al año 2022. Es decir, los estudios confirman que 2022 fue un año marcado por los significativos aportes de la eólica y la solar fotovoltaica, superado ambas los máximos, tanto de producción como de participación en el mix nacional. Las investigaciones revelan que el aumento de potencia instalada renovable en el sistema eléctrico nacional surge como consecuencia de las condiciones meteorológicas. No obstante, gracias a esta situación, durante el año 2023 se ha producido una importante reducción de las emisiones de CO₂ equivalente que se asociaban a la generación eléctrica nacional alcanzando los 32,0 millones de toneladas de CO₂ equivalente, es decir, el menor valor desde que existe registros, y, por ende, se sitúa en un 27,9 % por debajo del 2022 y un 71,2 % por debajo del 2007.

Evolución de la potencia instalada renovable (MW)



(1) Incluye biogás, biomasa, geotérmica, hidráulica marina, hidroeléctrica y residuos renovables.

Fuente: Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) hasta 2014.

Figura 4. Evolución de la potencia instalada renovable
Fuente: Red Eléctrica, (2022)

Para el año 2024, el Ministerio para la Transformación Ecológica y el Reto Demográfico se comprometió con “proyectos innovadores de integración de renovables con almacenamiento en infraestructuras”, donde se buscó financiar “...instalaciones fotovoltaicas, eólicas e hidroeléctricas con potencia igual o superior a 200 kWp en aeropuertos, puertos, canales, vías ferroviarias, carreteras, desaladoras, vertederos clausurados, plantas de tratamiento de agua, así como todas sus instalaciones asociadas.” (IDAE, 2024).

Según Babiker y Ciucci (2025), para el año 2022, las energías renovables representaron el 23 % del consumo de energía de la Unión Europea. Para el 2023, el objetivo de la Unión Europea fue aumentado por los legisladores en lo que respecta a

la cuota de fuentes de energía renovables, estimando el consumo bruto de energía para 2030 en un 32 % o 42,5 %, con el objetivo de alcanzar el 45 %.

La implementación de energías renovables en las EDAR suele realizarse mediante diversas tecnologías que aprovechan recursos naturales para generar energía y así reducir el consumo eléctrico de la planta. Las principales energías que se integran en estas plantas son cogeneración con biogás para generar energía eléctrica y térmica; la energía solar fotovoltaica, mediante la instalación de paneles solares para generar electricidad a partir de la radiación solar, minieólica, a través de la instalación de turbinas eólicas de pequeña escala para generar electricidad a partir del viento y energía hidráulica, que instala turbinas para transformar la energía potencial y cinética del agua en electricidad, para ello se aprovechan saltos de agua en la entrada o salida de la planta. (Aqualitrans, 2017)

2. OBJETIVOS

Tomando en cuenta lo expuesto anteriormente consideramos abordar la situación explicada a través de un objetivo general que pretendemos alcanzar a través de los objetivos específicos que mencionaremos a continuación:

Objetivo General:

Evaluar el balance energético de una EDAR y proponer estrategias de optimización mediante la incorporación de energías renovables, con el fin de avanzar hacia la autosuficiencia energética y la reducción de impactos ambientales.

Objetivos específicos:

- 1) Analizar los consumos energéticos reales de una EDAR a partir de los registros y datos disponibles.
- 2) Realizar un balance energético detallado de la instalación, identificando los principales puntos de consumo en la línea de aguas, la línea de lodos, los sistemas de aireación y los bombeos.
- 3) Identificar y describir de forma integral todas las energías renovables aplicables a una EDAR, incluyendo:
 - **Internas:** biogás procedente de la digestión anaerobia.
 - **Externas terrestres:** solar fotovoltaica y térmica, eólica, mini-hidráulica y geotermia.
 - **Energías marinas:** undimotriz, mareomotriz y energía azul (gradiente salino).
- 4) Analizar la viabilidad técnica de integrar un conjunto de tecnologías renovables seleccionadas en la EDAR del Prat Llobregat (El Prat, Barcelona)
- 5) Estimar el potencial de ahorro energético, económico y ambiental — particularmente en términos de reducción de emisiones de CO₂— derivado de la aplicación de dichas tecnologías y medidas de optimización.
- 6) Comparar los resultados obtenidos con otros estudios o referencias similares, con el fin de contextualizar el caso de estudio dentro de un marco más amplio.

3. ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LA EDAR EL PRAT DE LLOBREGAT

El consumo energético de las EDAR depende fundamentalmente de la tecnología utilizada en cada proceso que interviene en la depuración del agua a tratar, que, a su vez, está determinada por el tamaño de la población a la que corresponde. Con el objetivo de analizar los consumos energéticos reales de una EDAR se tomaron los datos de consumo energético correspondientes a la EDAR el Prat de Llobregat del año 2022.

La elección de la EDAR el Prat Llobregat, también conocida como EDAR del Prat de Llobregat, como nuestro caso de estudio responde a diferentes criterios de origen técnico, operativo y estratégico. Por ejemplo, encontramos que es una de las plantas de tratamiento de aguas residuales más grandes de Cataluña, la cual cuenta con una capacidad de depuración superior a 420.000 m³/día, y por ello, se identifica como referente en escala y complejidad. Además, su infraestructura cuenta con digestores anaerobios, sistemas de secado térmico y cogeneración eléctrica ya aplicada, lo cual es un aspecto que permite evaluar de manera más precisa el potencial de mejora energética mediante codigestión, tan importante para nuestra propuesta. Por otro lado, cabe destacar su ubicación, pues en la zona metropolitana de Barcelona se ha documentado el acceso a residuos orgánicos de origen urbanos y, también residuos propios de la agroindustria. Asimismo, la zona cuenta con favorables condiciones climáticas, apropiado para el aprovechamiento de energías renovables, por ejemplo, la solar, lo cual refuerza su aptitud como modelo replicable en otras regiones. Por consiguiente, la selección de esta EDAR nos ayuda a explorar escenarios realistas y optimistas para la producción energética mediante técnicas de sostenibilidad en el contexto de EDARs avanzadas.

De acuerdo con Urrea et al (2025), la EDAR Prat Llobregat se encuentra situada al sur de Barcelona y presta servicio a 2. 000 000 habitantes equivalentes. La planta tiene una capacidad de tratamiento de hasta **420,000 m³/día** con un caudal de tratamiento de **198,630 m³/día**. Adicionalmente cuenta con una estación de regeneración de aguas y una estación de secado térmico de lodos asociada a una cogeneración con motores de gas natural y biogás con una potencia instalada de **2,500 kWh/día**. La EDAR vierte al mar Mediterráneo y el efluente de la EDAR alimenta también la Planta de regeneración de aguas con usos finales para el riego agrícola, usos ambientales, urbanos e industriales.

La siguiente figura representa un esquema integral de masa y energía a nivel de planta para la EDAR del Prat de Llobregat. Se trata de una visualización técnica que resume los principales flujos de agua residual, sólidos y energía dentro de la estación depuradora. El esquema presenta la siguiente información:

- **Flujos de agua:** Desde la entrada (influent) hasta la salida al emisario submarino, pasando por las etapas de pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario.
- **Procesos de lodos:** Espesamiento, digestión anaerobia, deshidratación y secado térmico.
- **Producción energética:** Se indica la generación de energía interna mediante biogás y cogeneración.
- **Consumo energético total:** Se cuantifica en 47,33 GWh/año.

- **Cobertura energética interna:** Se señala que la planta produce 13,2 GWh/año mediante biogás, lo que representa el 28 % del consumo total.

La figura sirve como fundamento para el análisis del balance energético de la planta, elementos significativos para el estudio actual. Gracias a esta información, podemos identificar los puntos críticos de consumo, así como las oportunidades de mejora mediante energías renovables. La una herramienta visual sintetiza el funcionamiento completo de la EDAR en términos de eficiencia y sostenibilidad. Los elementos clave a destacar son:

- **Volúmenes tratados:** Caudales diarios y acumulados.
- **Carga contaminante:** DBO, SST, NTK, entre otros.
- **Procesos unitarios:** Clarificadores, digestores, centrífugas, UV, ultrafiltración, cogeneración.
- **Flujos de energía:** Entrada, generación interna, déficit.

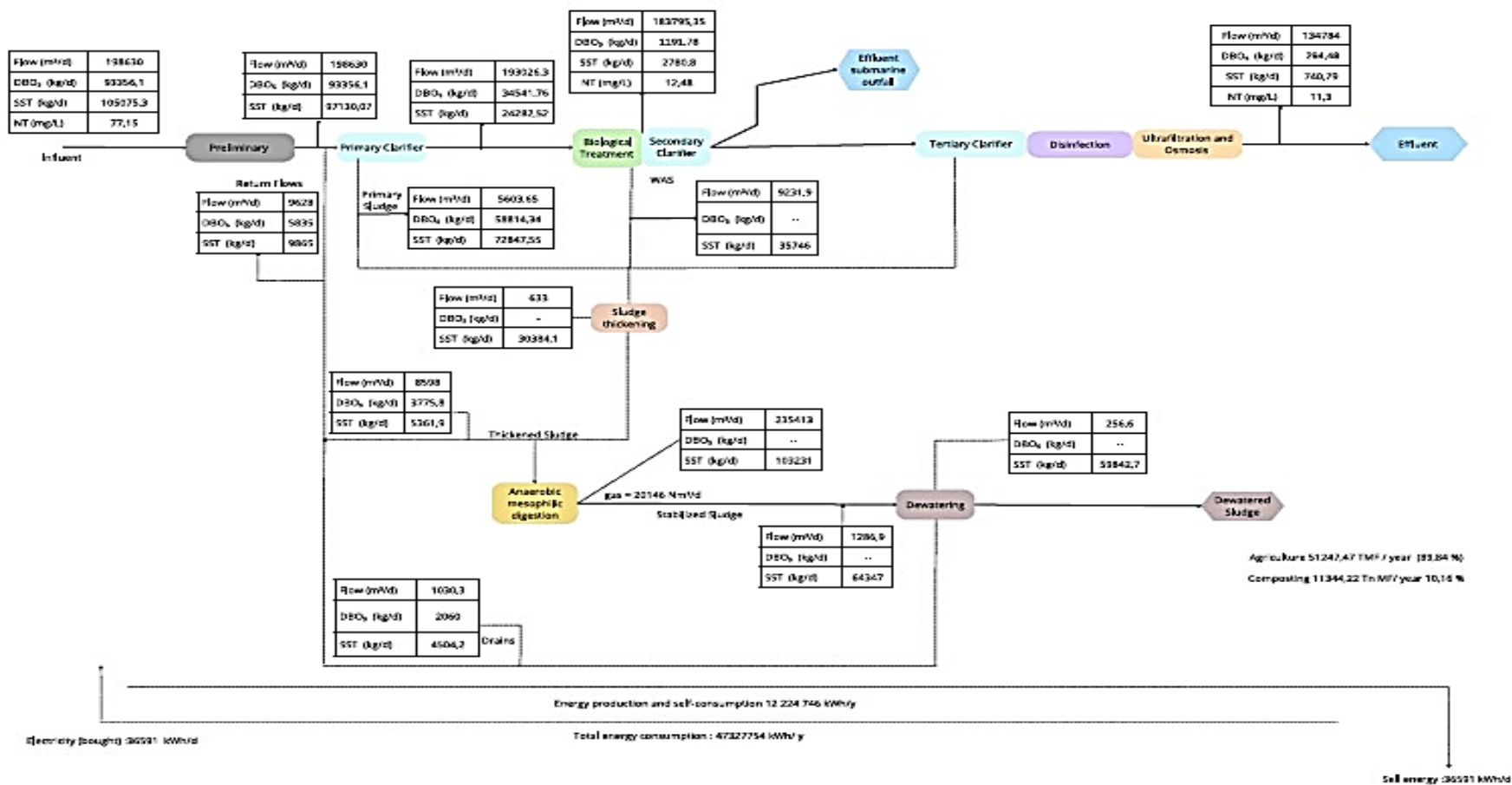


Figura 5. Masa y Energía a nivel de la planta El Prat de Llobregat

De acuerdo con González, P.; Batalla, M. (2023), la EDAR Prat Llobregat es una de las depuradoras más grandes de Europa, la cual agrupa dos grandes procesos que trabajan de forma paralela, como lo son la línea de agua y línea de lodos. Dichos procesos se explican de la siguiente manera:

Línea de agua:

- Compuesta por pozos de Gruesos, los cuales están provistos de rejas de 100 mm de separación entre barrotes, adicionalmente, 2 cucharas bivalvas de 500 litros de capacidad.
- El bombeo de agua bruta consiste en 8+1 bombas centrífugas, que cuentan con la capacidad de elevar 6.526 m³/h cada una y, además, cuentan con variadores de frecuencia.
- Unidad de desbaste de sólidos gruesos y finos, lo cual se produce en 8 canales equipados en 2 líneas, para la eliminación de arenas y grasas mediante 12 desarenadores-desengrasadores.
- Medida de caudal y by-pass para limitar a 35.000 m³/h, que se refiere al caudal que entra en el tratamiento biológico.
- Se contabilizan 12 decantadores primarios rectangulares con medias de 20x60 m.
- Tratamiento biológico en 8 líneas que ocurre mediante lodos activados que son combinados en zonas anaerobias, anóxicas y óxicas.
- 14 decantadores circulares secundarios de 45,5 m de diámetro

Línea de lodos:

- Donde ocurre el tamizado y espesamiento de lodos a través de 4 espesadores.
- Proceso de espesamiento de lodos biológicos mediante 4 centrífugas de 260 m³/h.
- Digestión anaerobia de lodos que ocurre en 8 digestores de 7.180 m³ cada uno.
- Cuatro centrífugas de 60 m³/h cada una, las cuales se ocupan en la deshidratación de lodos digeridos.
- 2 depósitos de membrana para el almacenamiento de gas en baja.
- Secado térmico de lodos deshidratados.
- Recuperación de energía a través del gas de digestión por medio de 4 motogeneradores de 2,8 MWe cada uno.
- Proceso de tratamiento de olores para desodorización del pretratamiento.

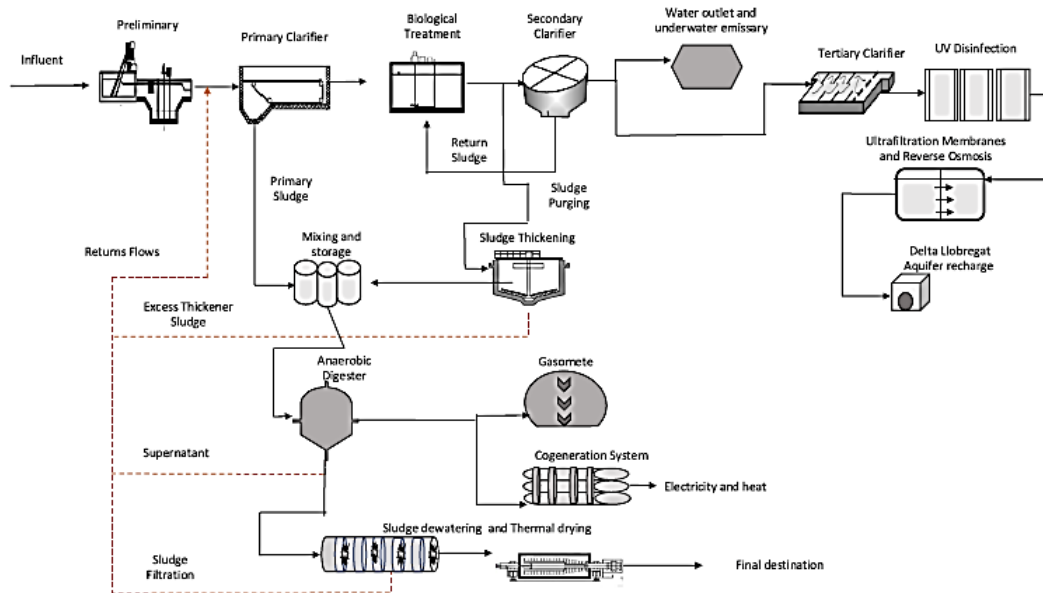


Figura 6. Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales ‘El Prat de Llobregat.
Fuente: Urrea et al (2025)

Esta figura representa un esquema completo y funcional del proceso de depuración en la EDAR del Prat de Llobregat. Podemos observar una ilustración técnica que muestra cómo ocurre la interconexión entre las distintas etapas del tratamiento de aguas residuales, lo cual inicia desde la entrada del influente hasta la salida del efluente tratado. La figura está dividida en dos grandes líneas:

A) Línea de agua

- **Influent:** Entrada del agua residual cruda.
- **Pretratamiento:** Rejas, desarenadores, desengrasadores.
- **Tratamiento primario:** Decantadores primarios.
- **Tratamiento secundario:** Reactores biológicos con lodos activados.
- **Clarificación secundaria:** Decantadores circulares.
- **Tratamiento terciario:** Ultrafiltración, ósmosis inversa y desinfección UV.
- **Salida:** Efluente tratado enviado al emisario submarino o a la planta de regeneración.

B) Línea de lodos

- **Espesamiento:** Gravitacional y mecánico.
- **Digestión anaerobia:** 8 digestores mesofílicos.
- **Deshidratación:** Centrifugas de alta capacidad.
- **Secado térmico:** Reducción de volumen y estabilización.
- **Cogeneración:** Aprovechamiento del biogás para producir electricidad y calor.
- **Almacenamiento de gas:** Gasómetros de membrana.
- **Destino final:** Lodos estabilizados para disposición o valorización.

A continuación, se muestra la tabla con los valores reales del consumo energético para la EDAR Prat Llobregat correspondiente a un estudio del año 2022 de acuerdo con los datos de Urrea et al (2025).

Tabla 2. Consumo eléctrico por tratamiento en la EDAR Prat Llobregat (2022)

Línea de tratamiento	Consumo estimado (kWh/año)	Porcentaje del total
Tratamiento secundario	21,397,638	45.23%
Pretratamiento	7,737,787	16.35%
Tratamiento terciario	7,039,464	14.88%
Cogeneración y otros	3,011,110	6.36%
Espesamiento y deshidratación	3,236,258	6.84%
Tratamiento primario	2,451,578	5.18%
Digestión anaerobia	1,188,926	2.51%
Otros	634,192	1.34%
Secado térmico	619,993	1.31%
Total	47,327,754	100%

En estos datos se puede observar que la fase de Tratamiento secundario constituye el tratamiento de mayor consumo energético (más del 45% del total), este proceso representa el corazón del tratamiento biológico incluyendo equipos de alto consumo eléctrico como son soplantes, difusores y turbinas, estos sistemas están en uso constantemente y requieren elevadas potencias para inyectar grandes volúmenes de aire al agua en tratamiento.

Por otra parte, el pretratamiento, corresponde el segundo proceso de mayor consumo energético, involucra tratamientos de desbaste, tamizado etc., que, aunque no requieren gran cantidad de energía por unidad al ubicarse en la entrada de la planta trabajan 24/7 usando múltiples equipos como tornos, sistemas de lavado y cintas transportadoras. Otro de los tratamientos de mayor consumo eléctrico, y que por tanto ocupa el tercer lugar en el gráfico es el espesamiento y centrifugado de los lodos, estos son procesos que reducen el tamaño del lodo antes de su tratamiento o evacuación.

Tabla 3. Balance energético anual según los datos de 2022

Concepto	Valor anual (kWh)	Descripción
Consumo total de energía	47,327,754	Energía eléctrica total requerida para operar la planta
Energía generada por biogás	13,205,657 (28% del consumo total)	Electricidad producida mediante cogeneración a partir de biogás
Déficit energético	34,122,097	Diferencia entre consumo total y energía eléctrica generada internamente

Fuente: (Urrea et al 2025)

De acuerdo con la tabla anterior, encontramos que el biogás está cubriendo casi el 28% del consumo total de la EDAR. Por ello, nuestro estudio se va a concentrar en explicar cuáles son los puntos críticos de consumo energético y la potencial contribución de las energías renovables. A continuación, se detallarán los tres principales puntos críticos de consumo de electricidad en la planta de tratamiento de aguas residuales Prat Llobregat.

3.1 Tratamiento biológico: sistema de lodos activados y aireación

En la EDAR Prat Llobregat, el proceso biológico es la etapa clave del tratamiento secundario, en este se hace pasar el agua por varios reactores donde se crean las condiciones para que diferentes tipos de bacterias se desarrollen y eliminen hasta el 70% del nitrógeno y el fósforo presentes en el agua residual. Sin embargo, el objetivo principal en esta fase es la remoción de materia orgánica biodegradable, medida como DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y DQO (Demanda Química de Oxígeno). En este proceso, se utiliza un sistema convencional de lodos activados, combinados con procesos de nitrificación y desnitrificación. En este momento del proceso de desarrollan los lodos secundarios. La EDAR dispone de 12 reactores biológicos de flujo pistón separados en dos líneas de tratamiento de 6 reactores cada una. Cada línea puede funcionar con el número de reactores necesarios que permita su trabajo en modo remoción de DBO o eliminación de nutrientes. La configuración del proceso puede ser anóxico-anaerobio-aerobio o anaerobio-aerobio, según se requiera la aplicación de uno u otro tratamiento. La mayor necesidad de aporte de oxígeno según la literatura empleada para este estudio (Aguiló, 2013) proviene de la reducción de nutrientes en las dos líneas. El aire requerido para los procesos aerobios se distribuye mediante parrillas de difusores de burbuja fina en todas las cubas; el aire aportado a los reactores es aire atmosférico impulsado por un grupo de 5 turbosoplantes con una potencia unitaria de 1,2 MWh.

Según los datos la aireación representa el proceso que mayor consumo energético requiriendo aproximadamente un 39% del total del consumo energético de esta etapa en 2022. Este elevado consumo de electricidad se debe fundamentalmente a la forma

continuada y a gran escala en que se desarrolla el proceso biológico para poder mantener una óptima actividad microbiana, lo que provoca que sea tan exigente a nivel energético. Dada la capacidad de la planta y los grandes volúmenes de agua que se procesan se necesitan elevadas cantidades de aire para mantener las condiciones deseadas.

3.2 Pretratamiento en la línea de aguas

El pretratamiento en la EDAR Prat Llobregat está compuesto por un pozo de gravas y predesbaste, desbaste, desarenado, desengrasado y para finalizar una decantación primaria, luego de este proceso de originan los llamados lodos primarios. En el pozo de gravas y predesbaste se eliminan los sólidos más gruesos, en el pozo se depositan los sólidos más pesados por sedimentación mientras que en el predesbaste se realiza un tamizado grueso a través de rejillas para retirar trapos, plásticos, ramas etc. Posterior a estos procesos, se realiza el desbaste, donde se hace pasar el agua por un conjunto de rejillas que eliminan sólidos más finos, este proceso es clave para evitar daños en las bombas, tuberías y procesos posteriores. El desarenado y desengrasado, por su parte, se realizan simultáneamente, separando las arenas y las grasas del agua a tratar. Las arenas caen al fondo de la instalación por decantación y se extraen mediante unas bombas. Las grasas, aceites y espumas se emulsionan para mejorar su flotabilidad y se extraen en la superficie. Estos procesos son sumamente importantes para evitar la abrasión de la maquinaria posterior y la distorsión de los tratamientos biológicos posteriores. Para finalizar se realiza una decantación primaria, en la cual se elimina aproximadamente entre el 60% al 70% de los sólidos en suspensión que no pudieron eliminarse en los tratamientos anteriores; estos sólidos conocidos como "lodos primarios", incluyen hasta el 35% de la materia orgánica que contiene el agua residual.

Aunque el pretratamiento parece una parte sencilla del proceso de tratamiento de agua residual en la EDAR Prat de Llobregat, este implica un conjunto de fases y equipos que hacen que su consumo sea elevado. La EDAR trata aguas residuales de 2 millones de habitantes equivalentes, lo que implica caudales muy elevados de forma continua, empleándose equipos mecánicos intensivos como cribas rotativas, bombas de elevación, clasificadores de arena, sistemas de lavado de arenas y grasas, compactadores de residuos, además, en el pretratamiento se generan olores que deben ser controlados, por lo cual, también se emplean sistemas de desodorización con ventiladores industriales. Todos estos equipos y sistemas, operaciones intensivas y procesos auxiliares pertenecientes a la línea de aguas, conllevan un consumo energético importante, siendo, de hecho, el segundo tratamiento más demandante de electricidad de la planta, como lo veremos más adelante.

3.3. Etapa Final del Proceso: Depuración Terciaria

El tratamiento terciario en la EDAR de El Prat de Llobregat está diseñado para producir altos niveles de calidad en el agua regenerada, la cual sea adecuada para diversos usos ambientales, también agrícolas e industriales. La primera parte de este proceso es la regulación del caudal mediante un depósito, más adelante, ocurre la coagulación-floculación lastrada, capaz de mejorar la sedimentación de partículas. (Área Metropolitana de Barcelona, 2010)

De manera que, esta etapa dentro de una planta de aguas residuales es avanzada, y su principal propósito es garantizar la calidad del efluente tratado. En el tratamiento

terciario operan procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales eliminan contaminantes residuales, tales como, nutrientes, los sólidos finos, microorganismos y compuestos disueltos. En instalaciones como la de El Prat del Llobregat, este proceso también incluye clarificación adicional, y fases como la desinfección con luz ultravioleta, la ultrafiltración mediante membranas y la ósmosis inversa. La acción de estos sistemas permite obtener un agua de alta pureza, que sea apta para su reutilización en riego, para recarga de acuíferos o para algunos procesos industriales, dado que llega a cumplir con las exigentes normativas ambientales. (Urrea et al, 2025)

Algunos de los procesos realizados en esta etapa son energéticamente costosos, por ejemplo, la ósmosis inversa, la cual requiere presiones elevadas (hasta 60 bar), necesarios para forzar el paso del agua a través de membranas semipermeables, con el fin de separar sales y contaminantes disueltos. La ultrafiltración y la microfiltración, son tecnologías que también implican bombeo constante y limpieza periódica de membranas, lo cual también es un punto de demanda de consumo energético significativo. Además, la desinfección UV requiere lámparas de alta intensidad y sistemas de control que funcionan continuamente para garantizar la eliminación de patógenos. Otros procesos de mayor demanda energética en esta etapa son los sistemas de limpieza (CIP), lo que implica ciclos automáticos de lavado con soluciones química que también consumen energía; y el bombeo adicional de recirculación, es decir requiere varias estaciones para impulsar el agua (filtración, desinfección y almacenamiento)

3.4 Balance energético de la EDAR estudiada, identificando los principales puntos de consumo.

De acuerdo con los datos presentados por Urrea et al (2025), el consumo total de energía eléctrica de la EDAR Prat de Llobregat es en promedio de 47,327,754 kWh al año, es decir, aproximadamente 155.683 kWh por día. Como es lo usual, esta demanda de energía se satisface con la electricidad comprada en la red nacional (aproximadamente el 70%) y con el autoconsumo de la propia planta mediante la cogeneración.

Es decir, el 76% de la demanda energética de la planta, unos **35,969,093 kWh/año**, está siendo consumido por los tres procesos más críticos. El balance anterior nos muestra que la planta estaba cubriendo cerca del 28% de su demanda eléctrica con energía generada internamente a partir del biogás. Por lo tanto, estamos hablando de un déficit energético restante de más de **34 millones de kWh/año**, lo cual es cubierto mediante compra de electricidad de la red nacional. En este sentido, existe un potencial de mejora, además del aprovechamiento del biogás. En resumen, la eficiencia energética actual es buena, pero no suficiente para la autosuficiencia.

De manera que, la producción de biogás generado a partir de la degradación de lodos orgánicos en digestores mesofílicos en EDAR Prat de Llobregat se halla en **13,205,657 kWh/año**. El biogás representa la principal fuente de energía renovable en la planta que consume **35,969,093 kWh/año** en los principales tratamientos. La producción de biogás se distribuye entre los principales procesos que exigen mayor demanda de energía (pretratamiento, tratamiento secundario y tratamiento terciario) lo cual se invierte de la siguiente manera:

- Cogeneración. El biogás es utilizado en motores de cogeneración para producir electricidad y calor. Lo cual representa el autoabastecimiento energético de la planta.
- Calderas. Parte de ese biogás producido se quema en calderas con el fin de generar energía térmica, es decir, en el calentamiento de digestores y procesos térmicos.
- Quemado en antorchas. El excedente del biogás producido y no utilizado se quema en antorchas, ocurre en proceso de seguridad y control de emisiones. No obstante, este excedente podría aprovecharse para cubrir la demanda energética diaria, tal como lo sugieren Urrea, Seguí y Guerrero (2025), se podría cubrir hasta un 6% adicional.

En tal sentido, el porcentaje de aprovechamiento del biogás producido en la en EDAR Prat de Llobregat para 2022, se distribuye de la siguiente manera:

Tabla 4. Estimación de distribución del 28% de energía cubierta por biogás

Proceso	Uso del biogás	Estimación de participación (%)	Justificación
Cogeneración	Producción de electricidad y calor	~85–90%	Más de 13 millones de kWh/año se invierten en este proceso.
Calderas	Generación de energía térmica directa	~5–10%	Se invierte en el calentamiento de digestores y procesos térmicos.

4. ENERGÍAS RENOVABLES APLICABLES A UNA EDAR

La implementación de energías renovables en el tratamiento de aguas residuales se considera una estrategia clave para avanzar hacia sistemas más sostenibles y eficientes. La integración de fuentes como la energía solar, eólica o el biogás generado por los propios residuos, se reduce significativamente la dependencia de combustibles fósiles, por lo tanto, se optimiza el rendimiento energético de las plantas de tratamiento. La conocida sinergia entre tecnologías limpias y procesos ambientales, además de disminuir el impacto ecológico, también promueve la economía circular y la resiliencia hídrica en comunidades urbanas y rurales. A continuación, vamos a describir algunas energías renovables sugeridas en el tratamiento de aguas residuales:

4.1 Energías Renovables Internas

Las estaciones depuradoras de aguas residuales como la EDAR Prat de Llobregat suelen mejorar el autoconsumo energético mediante el uso de fuentes de energía renovable generadas dentro de la propia planta, por ejemplo, el biogás producido durante el tratamiento de lodos. El uso del biogás en las EDAR contribuye a reducir la dependencia de fuentes externas de energía, además su uso muy significativo para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual es útil para avanzar hacia nuestro objetivo.

4.1.1 Biogás procedente de la digestión anaerobia

En las EDARs se produce biogás a partir de la digestión anaeróbica de lodos, lo cual ocurre en ausencia de oxígeno. Dicho proceso descompone la materia orgánica presente en los lodos generados durante el tratamiento de aguas residuales y lo transforma mediante diferentes etapas. Según Albaladejo y Albadalejo (2016), estas etapas son:

- **Hidrólisis:** donde las moléculas grandes y complejas de la materia orgánica, como carbohidratos, las proteínas y las grasas, se descomponen en moléculas más simples tales como azúcares, ácidos grasos y aminoácidos.
- **Acidogénesis:** en esta etapa, las moléculas simples se convierten en ácidos orgánicos, hidrógeno (H_2), alcoholes y dióxido de carbono (CO_2), lo cual ocurre mediante la acción de bacterias acidogénicas.
- **Acetogénesis:** después de la acidogénesis, en esta etapa los productos se transforman en acetato, dióxido de carbono e hidrógeno.
- **Metanogénesis:** finalmente, en esta etapa, las bacterias metanogénicas convierten el acetato, el hidrógeno y el dióxido de carbono en metano (CH_4) y más dióxido de carbono, que en definitiva son los principales componentes del biogás.

En la planta del Prat de Llobregat se generan unos 20.146 Nm³/día de biogás. Está compuesto principalmente de metano (CH_4) en un 62,76% y dióxido de carbono (CO_2) en un 35%, además de pequeñas cantidades de nitrógeno y sulfuro de hidrógeno.

La energía contenida en el biogás es un recurso valioso para la recuperación de energía, por lo tanto, se considera como una de las fuentes de energía recurrente para no depender exclusivamente de la red eléctrica nacional. Para la fecha del estudio, en la planta se estaba cubriendo aproximadamente el 28% de las necesidades de energía eléctrica de la planta mediante el autoconsumo, específicamente a partir del biogás producido. Este compuesto se utiliza en motores de cogeneración para generar energía eléctrica y también en el calentamiento de los digestores. Tal como lo señalan Urrea et al (2025), el sistema de cogeneración de la planta utilizaba para 2022 el 78% del biogás, mientras que el 14,93% se utilizaba en calderas, y un 6,99% restante se quema en llamaradas, los autores explican que **38.950,83 m³/mes** se están desaprovechando.

Por consiguiente, aunque la planta tiene un consumo total de energía significativo, es notorio que la generación y recuperación de biogás contribuyen a reducir su dependencia de fuentes de energía externas y así se reduce de igual manera las emisiones de gases de efecto invernadero. Conviene señalar que la energía generada a partir del biogás, producto de la cogeneración, desempeña un papel crucial en los esfuerzos de autosuficiencia energética de la planta. Según el estudio de Urrea et al (2025), la energía química contenida en el lodo, cuando se convierte en biogás, produce 8,71 kWh de energía por cada metro cúbico de biogás generado.

Para el año 2022, la EDAR Prat de Llobregat había encaminado esfuerzos hacia la autosuficiencia energética por medio de la utilización del biogás producto del tratamiento de lodos para compensar una parte de su importante consumo de energía. No obstante, la energía que todavía proviene de la red nacional sigue siendo una cantidad significativa.

De acuerdo con la “Guía de soluciones tecnológicas para la eficiencia de las EDAR” propuesta por Aqualitans (2017), Se propone considerar la codigestión con residuos orgánicos, por ejemplo, restos de cocina para aumentar la producción de biogás y así mejorar la eficiencia energética en una EDAR. El proceso de codigestión para aumentar la producción de biogás consiste en aprovechar la capacidad excesiva de un digestor anaerobio, cuando es el caso de sobredimensionamiento o mientras se cumplan las condiciones las condiciones necesarias para transformar otros residuos, por ejemplo, aquellos procedentes de explotaciones agrarias, junto con los lodos. El documento de Aqualitans señala que, en la EDAR de Sant Feliu, la codigestión aumentó la producción de biogás y la generación de energía en un significativo 180%, lo que trajo como resultado en la producción de unos 13.160 kWh/día, una transformación que permitió una cobertura de casi el 100% de la energía consumida por la EDAR, que es para entonces era de unos 14.350 kWh.

4.2 Energías Externas terrestres

Otras energías renovables como la solar fotovoltaica y térmica, eólica, mini-hidráulica y geotermia también son aplicables al funcionamiento de una EDAR para procurar la eficiencia energética. Como sabemos, las EDAR suelen tener superficies disponibles (cubiertas, solares, zonas de drenaje, laderas), las cuales pueden ser útiles para instalar paneles solares o turbinas eólicas de menor tamaño, sin que estas interfieran con los procesos, es decir, las energías renovables pueden complementarse para cubrir picos de demanda o excedentes de generación, porque son compatibles con la cogeneración y biogás.

4.2.1 Energía Solar, fotovoltaica y térmica

La energía solar es la energía que proviene del Sol y llega a la Tierra y llega a la tierra en forma de radiación electromagnética. Es considerada una fuente renovable, limpia e inagotable por lo cual, puede aprovecharse de distintas maneras para generar electricidad, calor o incluso impulsar procesos industriales. Martín, Pérez y Estrela (2024) Los autores, sugieren la siguiente clasificación de la energía solar:

- **Fotovoltaica:** Convierte la luz solar directamente en electricidad a través de la utilización de paneles solares. En la actualidad tiene uso industrial, doméstico y para dispositivos autónomos
- **Térmica:** Aprovecha el calor del sol para calentar agua y también para generar vapor, por lo tanto, se usa en la calefacción, agua caliente y procesos térmicos.
- **Termoeléctrica:** se produce mediante la utilización de espejos para concentrar luz solar y generar vapor que mueve turbinas. Su principal uso es en plantas solares de gran escala.

4.2.1.1 Viabilidad de la Energía Solar en una EDAR

La viabilidad de la energía solar en una EDAR es alta y estratégica, especialmente en el caso de procurar la reducción del consumo energético de los sistemas de aireación, que representan hasta el 30% del gasto energético total de una planta. Para aprovechar la energía del sol, el principal método que se utiliza es el de sistemas fotovoltaicos (PVP). (Zacchei y Colacicco, 2022) Los autores plantearon un estudio aplicable al funcionamiento de una EDAR, encontrando los siguientes beneficios:

- **Reducción de costos operativos:** La energía solar podría cubrir entre el 83% y el 100% del consumo energético de los sistemas de aireación durante los meses cálidos que van desde marzo a octubre, lo que representa un ahorro significativo.
- **Sinergia estacional:** La demanda energética de los sistemas de aireación aumenta en verano, esto por el aumento de la temperatura del agua, que reduce la solubilidad del oxígeno. Al mismo tiempo, la producción solar también alcanza su pico en esos meses, lo cual facilita una cobertura óptima.
- **Diseño simplificado:** El método propuesto en el estudio, permite dimensionar el sistema solar utilizando solo parámetros como la temperatura del aire, DBO_5 y sólidos suspendidos volátiles (VSS), esto sin necesidad de mediciones energéticas complejas.
- **Alta eficiencia en plantas pequeñas:** Las EDAR pequeñas, donde suele existir un mayor consumo energético relativo, son las principales beneficiarias, especialmente de la instalación de PVP por causa de su disponibilidad de espacio y menor acceso a otras fuentes renovables como el biogás.

En la implementación de la energía solar en plantas de tratamiento de aguas residuales destacan el Proyecto ECOEDAR, desarrollado por HIDEKO y ECOTELIA que propone un sistema de gestión inteligente en una EDAR industrial para optimizar su eficiencia energética. El proyecto se llevó a cabo gracias al Fondo Europeo de Desarrollo Regional de la Unión Europea, así como a la de la Agencia de Desarrollo Económico de La Rioja. También la Plataforma Solar de Almería (CIEMAT), un

proyecto que trabaja en la regeneración de efluentes secundarios de EDAR mediante tecnologías solares, aplicadas en plantas piloto. (Zacchei y Colacicco, 2022)

4.2.2 Energía Fotovoltaica

Incluye la implementación de la tecnología de paneles solares. Los paneles fotovoltaicos se constituyen de una agrupación de células fotovoltaicas. Se estima que número habitual de células es 36, 60, 72 o 144 dependiendo de la potencia fotovoltaica pico de cada panel. (López & Martínez, 2020). El material más utilizado en la construcción de paneles solares es el silicio, debido a su abundancia y buena relación eficiencia-coste, sin embargo, para su uso, aunque requiere purificación y cristalización. Según el tratamiento, se distinguen dos tipos:

- **Monocristalinos:** recomendados por su alta eficiencia, tienen un mayor coste y son más sensibles al calor. Son más apropiados para climas fríos y nublados.
- **Policristalinos:** Representan una menor eficiencia, porque son más económicos; pero ofrecen un mejor rendimiento en climas cálidos.

En cuanto al diseño de instalaciones, se consideran dos enfoques:

- **Sin inyección a red:** con esto se procura maximizar el autoconsumo, limitando excedentes a menos del 10%.
- **Con inyección a red:** de esta manera se puede vender el excedente a la distribuidora eléctrica.
- **Uso de baterías:** Se calcula para 36 horas de autonomía. Son conveniente en instalaciones sin generador de respaldo o donde existe una alta necesidad de independencia energética, aunque su coste suele ser elevado. (Green et. al, 2020).

4.2.2.1 Viabilidad de Energía solar fotovoltaica en una EDAR

La viabilidad de la energía solar fotovoltaica en una Estación Depuradora de Aguas Residuales depende de varios factores técnicos, económicos y operativos. Para avanzar con un proyecto de esta magnitud, es preciso tomar en cuenta los siguientes factores, según Sánchez (2017).

- **Disponibilidad de superficie:** usualmente las EDAR tienen techos, terrenos o estructuras disponibles para instalar paneles solares.
- **Perfil de consumo energético:** el consumo eléctrico de las EDAR es constante, lo cual es ideal para aprovechar la generación solar durante el día.
- **Compatibilidad con sistemas existentes:** al igual que el uso del biogás y otras energías, la energía solar puede integrarse con sistemas de respaldo (como generadores o red eléctrica) para garantizar continuidad.
- **Inversión inicial:** actualmente el coste de instalación de energía fotovoltaica ha disminuido significativamente.

- **Ahorro energético:** se estima una disminución en la factura eléctrica, especialmente en zonas con tarifas elevadas.
- **Subvenciones y ayudas:** es posible acceder a incentivos gubernamentales o fondos europeos para energías renovables.
- **Factores Ambientales:** reduce la huella de carbono de la EDAR y fortalece la Imagen institucional, porque demuestra el compromiso ambiental de la entidad gestora.
- **Mantenimiento:** Los sistemas fotovoltaicos por lo general requieren bajo mantenimiento.
- **Gestión de excedentes:** es muy factible verter energía sobrante a la red o almacenarla en baterías.

Caso de éxito: EDAR de Nerja

Zacchei y Colacicco (2022), describen el caso de éxito cofinanciado por fondos europeos FEDER y el programa de eficiencia energética del IDEA en la **EDAR de Nerja**. El proyecto tiene las siguientes características:

- **Instalación fotovoltaica:** se incorporó un sistema de autoconsumo con una potencia instalada de 100 kWp.
- **Producción anual estimada:** se genera aproximadamente 160 MWh/año.
- **Cobertura energética:** está cubriendo cerca del 20% del consumo eléctrico total de la planta.
- **Tecnología empleada:** mediante la instalación de paneles solares monocristalinos con inversores trifásicos conectados a la red interna de la EDAR.
- **Modelo de operación:** disponible para autoconsumo sin vertido a red, ha sido optimizado para coincidir con los horarios de mayor demanda energética.
- **Impacto ambiental:** se ha logrado reducir las emisiones de CO₂ estimada en 60 toneladas/año.
- Disminución de la dependencia energética externa y mejora de la huella ecológica de la instalación.

De igual manera, Aqualitrans (2017), señala la EDAR de Torremayor (Badajoz). Según la investigación, en esta planta se halla una instalación solar fotovoltaica de 11,96 kW en su tejado, cuya producción se estima en unos 18.861 kWh al año. En la planta también se ha implementado un sistema de gestión y monitorización para optimizar su rendimiento

4.2.2.2 Rango de potencia de la energía fotovoltaica en una EDAR

Según Zacchei y Colacicco (2022), la potencia de la energía fotovoltaica en una EDAR depende de factores como el tamaño de la planta, su consumo energético o el tipo de tratamiento que realiza, así como el espacio disponible para instalar paneles solares. Los estudios presentados estiman los siguientes rangos:

- **Pequeñas EDARS:** se puede dar entre 20–100 kWp. Lo cual es ideal para cubrir aireación y bombeo básico.

- **EDAR medianas:** se eleva a un rango de 100–500 kWp. Esta potencia permite cubrir procesos de aireación, recirculación y parte del tratamiento terciario.
- **EDAR grandes o industriales:** potencia mayor a >500 kWp. En este caso puede cubrirse una parte significativa del consumo total, especialmente cuando se combina con biogás o baterías.

4.2.3 Energía Térmica

La Asociación Solar de la Industria Térmica (ASIT) y el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (2020), definen la energía solar térmica como una tecnología que utiliza la radiación solar para generar calor. En este sentido, el calor puede ser aprovechado para diversas aplicaciones como, por ejemplo, la producción de agua caliente sanitaria, la climatización de espacios o piscinas, la calefacción y algunos procesos industriales. En algunos casos, también ocurre la generación de electricidad. Funciona por medio de la captación de calor a través de dispositivos llamados colectores o captadores solares, los cuales transforman la radiación solar en energía térmica y esta a su vez se transfiere a un fluido que circula por el sistema. La energía solar térmica es una fuente de energía renovable, limpia y sostenible, es decir, contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de combustibles fósiles. Un sistema solar térmico está compuesto por los siguientes componentes principales:

- **Captadores solares:** son dispositivos que transforman la radiación solar en energía térmica. Estos pueden ser planos, también de tubos de vacío o concentradores.
- **Sistema de acumulación:** son los depósitos que almacenan el calor generado para su uso posterior, como agua o fluido caloportador.
- **Intercambiador de calor:** es el dispositivo que transfiere el calor del fluido caloportador al agua o al sistema de consumo.
- **Circuitos hidráulicos:** puede contar con el circuito primario que transporta el fluido caloportador desde los captadores, un circuito secundario que transfiere el calor al sistema de consumo y por último el circuito de consumo que distribuye el agua caliente.
- **Bomba de circulación:** es el sistema que garantiza la circulación del fluido en sistemas de circulación forzada.
- **Vaso de expansión:** se encarga de absorber las variaciones de volumen y presión del fluido debido a los cambios de temperatura.
- **Tuberías y aislamiento térmico:** con las que conectan los componentes y minimizan las pérdidas de calor.
- **Válvulas y accesorios:** es un grupo de elementos que incluyen válvulas de corte, de seguridad, antirretorno, purgadores de aire, mezcladoras y otros elementos necesarios para el correcto funcionamiento.
- **Sistema de control:** es el que regula el funcionamiento del sistema, activando o desactivando bombas y válvulas de acuerdo a las temperaturas y/o necesidades.
- **Fluido caloportador:** es el medio que se encarga de transportar el calor, como agua o una mezcla con anticongelante.

- **Sistema de apoyo:** se entiende por energía auxiliar, tales como calderas o resistencias eléctricas las cuales sirven para garantizar el suministro cuando la energía solar no es suficiente.

4.2.3.1 Viabilidad en una EDAR

De acuerdo con las investigaciones, la aplicación de energía térmica solar en una EDAR es técnica y económicamente viable, puede aplicarse especialmente para procesos que requieren calor como el secado de lodos, además, de calentamiento de digestores anaerobios, o pretratamientos térmicos. Kurt, Aksoy y Dilek (2015) Estos autores explican que los colectores solares térmicos (como los de tubo evacuado) pueden alcanzar temperaturas suficientes para el secado de lodos. Además, el sistema propone un sistema que combina invernaderos solares con paneles térmicos para mantener condiciones óptimas de temperatura y humedad.

En cuanto a la viabilidad económica, el área requerida y los equipos térmicos implican una inversión puede ser elevada. No obstante, los costos operativos suelen ser bajos, ya que se reduce el consumo de energía convencional. El estudio descrito por Kurt, Aksoy y Dilek (2015) estima que el sistema solar térmico puede reducir hasta un 40% los costos energéticos del secado de lodos, pero todo depende del clima y la escala de la EDAR.

Casos de éxito

Kurt, Aksoy y Dilek (2015), exponen que el uso de energía solar se ha utilizado para secar lodos, obteniendo en el proceso hasta un 90 % de contenido de sólidos secos (DS). El estudio expuesto por los autores compara los costos asociados con el secado térmico convencional y el de cogeneración en 37 plantas de tratamiento de aguas residuales, las cuales fueron seleccionadas en función de las tasas de flujo de aguas residuales entrantes. Según la investigación de Kurt, Aksoy y Dilek (2015), una planta de secado solar de invernadero en Oldenburg, al sur de Alemania, se seca lodos a partir de esta tecnología de entre 15% y 30 % DS a 60% y 70 % DS, con una capacidad de secar hasta 40,000 toneladas métricas de lodo húmedo por año en 6,000 m². Para ello, esta planta utiliza 7,400 MWh de electricidad auxiliar. Los autores también destacan una EDAR similar en Turquía, MAR-10, donde la radiación solar es similar a la de Oldenburg.

4.2.4 Energía eólica

Se sabe de la energía eólica que es una fuente limpia e inagotable, la cual transforma la energía cinética del viento en energía mecánica mediante aerogeneradores, y luego en energía eléctrica a través de a un alternador. Este tipo de energía, requiere para su funcionamiento que el viento tenga una velocidad dentro de un rango admisible, lo cual es normalmente entre 5 m/s y 35 m/s, dependiendo del modelo y fabricante. Además, existe un término conocido como Límite de Betz que explica que solo puede transformarse hasta un 60% de la energía cinética del viento en energía eléctrica, sin embargo, los aerogeneradores actuales alcanzan rendimientos cercanos al 50%, acercándose al límite teórico. (Soriano, 2017). En cuanto a las tendencias del mercado, según Soriano (2017), se conoce el avance hacia aerogeneradores más pequeños, eficientes y con menor impacto visual y paisajístico.

- **Aerogeneradores de eje vertical:** Los aerogeneradores de eje vertical captan el viento desde cualquier dirección, es por ello que no requieren sistemas de orientación. Además, su instalación y mantenimiento son más sencillos, pues están ubicados a ras de suelo, lo que mejora la seguridad operativa. (Hau, 2013).

Limitaciones:

- Su rendimiento es inferior al de los aerogeneradores de eje horizontal, pues su coeficiente de potencia es significativamente menor.
- Para reparaciones del rotor es preciso desmontar la maquinaria, lo que representa un coste elevado. (Hau, 2013).

Los principales tipos de aerogeneradores de eje vertical según Hau (2013) son:

- Aerogenerador de eje vertical tipo Giromill
- Aerogenerador de eje vertical tipo Savonius
- Aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus.

- **Aerogeneradores de eje horizontal**

De acuerdo con Hau (2013), este tipo de tecnología ofrece numerosas alternativas respecto a la potencia. Entre sus ventajas destacan: un mayor coeficiente de potencia, el cual varía con el número de palas del aerogenerador, porque permite barrer mayores áreas. Por tal motivo, se estima una mayor energía obtenida del viento, y, por ende, se podrá aprovechar el gradiente de velocidades de manera óptima debido a que se cuenta con mayores alturas. Los aerogeneradores de eje horizontal se dividen en tres tipos según Hau (2013), los cuales son:

a. Por Orientación respecto al viento:

-**Sotavento:** este tiene un rotor más flexible y no requiere de un mecanismo de orientación debido a que la torre crea un efecto de sombra a las palas. En tal sentido, produce una oscilación de potencia y crea más cargas de fatiga y esfuerzos.

-**Barlovento:** es el más popular y usado. Este requiere un rotor más rígido y de un sistema de orientación.

2. Por Velocidad de rotación

- **Aerogeneradores lentos:** es un generador que consta de un mayor número de palas, con un diámetro pequeño (de hasta 10 metros). Las potencias presentadas son bajas, principalmente porque su velocidad de arranque también es baja (de en torno 2-3 m/s).

- **Aerogeneradores rápidos:** emplean un menor número de palas (de 1 a 4), pero de grandes diámetros. Al tratarse de generadores más ligeros, estos pueden ser contruidos de mayor tamaño. Su coeficiente de potencia es alto, ya que usan una velocidad de arranque mayor (4-5 m/s) que los

aerogeneradores lentos. Estos llegan a trabajar con velocidades de hasta 25 m/s.

3. Aerogeneradores rápidos según su número de palas

- **Monopala:** dado su diseño se reduce la cantidad de materiales y costes. Sin embargo, el ahorro en peso no es tan significativo, ya que es necesario un contrapeso para equilibrar el rotot. En cuanto a sus desventajas se puede señalar una mayor producción de ruidos y más intrusión visual.

- **Bipala:** resulta más económico que el diseño tripala. Pero, por otro lado, se producen mayores esfuerzos y vibraciones, y también más ruido.

- **Tripala:** aumenta el coste y el peso. Sin embargo, presenta una mayor estabilidad y equilibrio debido a que se minimizan los esfuerzos y su momento de inercia es mayor. Adicionalmente, dado que la velocidad de giro es menor, se reducen ruidos y vibraciones locales.

- **Multipalas:** también conocido como el modelo americano, posee un número mayor de palas. Originalmente, su aplicación fue la extracción de agua en pozos de las llanuras americanas.

4.2.4.1 Viabilidad en una EDAR

En el caso de la energía minieólica, esta depende de que las condiciones de viento sean siempre óptimas, es decir, la irregularidad y baja intensidad promedio del viento en algunas zonas podrían afectar su aplicabilidad. Por ejemplo, la EDAR debe estar en una zona con suficiente potencial eólico, donde existan velocidades de viento constantes y adecuadas para generar energía de manera eficiente. Por lo tanto, uno de los aspectos clave de su incorporación es el potencial eólico. Según Espejo (2004), el potencial eólico es la capacidad de una zona en particular para generar energía eléctrica a partir del viento. Este potencial se determina evaluando las características del viento en esa área, así como su velocidad, su continuidad, estabilidad y densidad de potencia.

Para evaluar su viabilidad, también es necesario que se cuente con espacio para instalar los aerogeneradores, ya sea dentro de las instalaciones de la EDAR o en terrenos cercanos. Al igual que otros tipos de energía, es preciso determinar que energía generada pueda integrarse en el sistema eléctrico de la EDAR, por ejemplo, para alimentar sus procesos, como el bombeo y tratamiento de aguas. De igual manera, se requiere una evaluación del impacto ambiental de los aerogeneradores en su ubicación en la planta, especialmente en términos de ruido, impacto visual y posibles efectos sobre la fauna local. De acuerdo con algunas investigaciones, se ha aplicado la energía eólica en estaciones depuradoras de aguas residuales) en Estados Unidos con gran éxito, entre estos, la Environmental Protection Agency (2013), expone los siguientes:

Tabla 5. Casos de éxito en la utilización de la Energía Eólica en una EDAR

Ubicación	Instalación	Capacidad Eólica	Impacto Energético	Ahorro Estimado
Atlantic City, New Jersey	ACUA Wastewater Treatment Facility	5 turbinas de 1.5 MW (total 7.5 MW)	Cubre más del 60% del consumo eléctrico anual	\$350,000 USD/año
Browning, Montana	Planta de tratamiento del pueblo y tribu Blackfeet	4 turbinas Bergey Excel de 10 kW	Suministra ~25% de la energía de la planta	Reducción de dependencia de la red
Fargo, North Dakota	Proyecto en evaluación	1 turbina de 1.5 MW	Se estima cubrir el 85% del consumo anual	\$203,000 USD/año

La tabla muestra como el proyecto ACUA en Atlantic City es el ejemplo más consolidado porque es capaz de generar un excedente energético que se vende a la red eléctrica local. En el caso de Browning y Fargo, estos proyectos muestran cómo incluso en comunidades pequeñas se puede obtener beneficios significativos. En general, estos casos demuestran que la energía eólica no solo es viable en una EDAR, sino que además puede ser económicamente rentable y ambientalmente beneficiosa.

4.2.5 Energía Microhidráulica

El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (2006), plantea la energía microhidráulica como la producción de electricidad mediante turbinas hidráulicas de pequeña escala, donde se utilizan caudales pequeños y desniveles modestos, los cuales van desde 1 hasta 20 metros. La IDAE, explica que en una EDAR existen puntos clave donde el agua circula con caudal suficiente para producir saltos de altura o diferencias de presión. Esta presión en los saltos puede aprovecharse para instalar turbinas hidráulicas que ayuden a transformar la energía potencial o cinética del agua en energía eléctrica. Se conoce que la energía se transforma primero en energía mecánica dentro de la turbina hidráulica, luego, ésta activa el generador, que más adelante transforma en un segundo paso la energía mecánica en energía eléctrica. (IDAE, 2006)

Actualmente no existe un consenso europeo sobre la potencia máxima para clasificar una minicentral hidroeléctrica, sin embargo, comúnmente se acepta el límite de 10 MW, según la Comisión Europea y la UNIPED. No obstante, la potencia instalada no es el único criterio diferenciador por las siguientes razones, según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (2006):

- Las minicentrales no pueden considerarse simplemente versiones reducidas de las centrales convencionales.
- Las turbinas de menor potencia tienen diseños específicos, que no son para nada iguales a los diseños de turbinas de gran escala.
- La obra civil de una minicentral responde a principios diferentes, pues estas no dependen de grandes embalses.

Por otro lado, en el caso de las centrales hidroeléctricas, y, por ende, las minicentrales hidroeléctricas, el lugar donde van a ser ubicadas es una condición ineludible, pues se guía por las peculiaridades y características del espacio físico. El proceso para la puesta en marcha de una instalación de este tipo hay que tener en cuenta factores como la topografía del terreno, lo cual va a influir, tanto en la obra civil, como en la selección de la maquinaria. (IDAE, 2006). Por consiguiente, la IDAE, propone una clasificación para emplazamiento de la central hidroeléctrica de esta manera:

- **Centrales de agua fluyente.** Estas captan una parte del caudal del río, el cual es trasladado hacia la central y una vez utilizado, se devuelve al río.
- **Central de agua fluyente.** En este aprovechamiento se desvía parte del agua del río mediante una toma y a través de canales que la llevan hasta la central donde será turbinada. Una vez obtenida la energía eléctrica el agua previamente desviada es devuelta nuevamente al cauce del río. En el caso de las centrales de agua fluyente se genera energía sin capacidad de regular el caudal turbinado, por lo tanto, el proceso depende directamente de la hidrología del río. Por lo tanto, su potencia está determinada por el caudal disponible, mientras que el salto útil permanece prácticamente constante.
- **Centrales de pie de presa.** Estas centrales se ubican bajo embalses, así se aprovecha el desnivel creado por la presa. La ventaja principal de este tipo de centrales es la capacidad de regular el caudal de salida, lo cual permite turbinar el agua en aquellos momentos de alta demanda energética, como son las horas punta.
- **Centrales en canal de riego o de abastecimiento.** Entre las centrales de este tipo podemos encontrar dos; el primero, utiliza el desnivel existente en el propio canal, donde, a través la instalación de una tubería forzada, paralela a la vía rápida del canal de riego, se hace un traslado del agua hasta la central, devolviéndola posteriormente a su curso normal dentro del canal. El segundo, aprovecha el desnivel que existe entre el canal y el curso de un río cercano. En este caso se instala la central cercana al río y se turbinan las aguas excedentes en el canal.

4.2.5.1 Viabilidad de la estructura

Según Ocaña Martín (2021), los trabajos de obra civil relacionados a la instalación de centrales de energía microhidráulica “...no son tan significativos en comparación con centrales de gran escala” puesto, que abarcan aproximadamente entre el 35% y 45% del presupuesto. Del mismo modo, se considera que el impacto medioambiental de la obra civil requerido para este tipo de instalaciones es mucho menor. Asimismo, en la actualidad se puede encontrar una amplia gama de equipos, que van desde generadores, hasta turbinas, “...que se adaptan a caudales desde los 0,1 m³/s hasta los 500 m³/s, y hasta los casi 2.000 metros de salto.” (Ocaña Martín, 2021)

De acuerdo a los datos del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (2006), por lo general, las microcentrales, cuya capacidad es inferior a 100 kW, suelen ocupar superficies relativamente pequeñas, a menudo son ubicadas en áreas rurales con acceso a cursos de agua. En tal sentido, para su diseño y el aprovechamiento correcto, “...la potencia de una central hidroeléctrica es proporcional a la altura del salto y al caudal turbinado, por lo que es muy importante determinar correctamente estas variables para el diseño de las instalaciones y el dimensionamiento de los equipos.” (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2006).

En palabras de Purificato y Batalla (2023), La EDAR Prat Llobregat se encarga de la gestión y mantenimiento del caudal del río Llobregat mediante bombeo, esto indica una infraestructura hidráulica significativa, de igual manera, se podría aprovechar zonas de bombeo o laminación existentes. Como sabemos, con un caudal de más de 300.000 m³/día, podría decirse que es suficiente para generar energía a pequeña escala. La superficie típica de una central minihidráulica según los datos del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2006, es la siguiente:

Tabla 6. Superficie típica de diferentes tipos de centrales minihidráulicas

Tipo de instalación	Superficie estimada	Características principales
A pie de presa	500–2.000 m ²	Este tipo requiere de embalse o balsa de acumulación.
Al hilo del agua	200–1.000 m ²	No necesita embalse; porque sigue el curso natural del agua.
Integrada en la EDAR	100–500 m ²	Puede aprovecharse los canales existentes y estructuras hidráulicas.

Cálculo mediante ejemplo

De acuerdo con los datos señalados y una comparativa con diferentes fuentes (Planas, 2018 & González y Batalla, 2023) la potencial instalación de una central minihidráulica integrada en una EDAR como la del Prat Llobregat podría ocupar:

- **Casa de máquinas:** 50–150 m².
- **Canal de entrada/salida:** 30–100 m².

- **Zona técnica y control:** 20–50 m².

Entonces tenemos que el total estimado es de: **100–300 m²**, siempre que se aprovechen las infraestructuras existentes. (Planas, 2018 & González y Batalla, 2023).

Casos de éxito

El éxito de la instalación en una EDAR ha sido evaluado previamente en diversos estudios, por ejemplo, Tomczyk, Mastalerek, Wiatkowski, Kuriqi y Jurasz (2023), exponen la aplicación de una turbina Francis en la EDAR de “Centralna” de Toruń, en Polonia. En este caso, se demostró la viabilidad técnica y energética del uso de microturbinas en EDARs, y, además, el estudio también sirvió como referencia para futuras implementaciones en otras regiones. Las Características principales del proyecto fueron las siguientes:

Tabla 7. Datos de la aplicación de una turbina Francis en la EDAR de “Centralna” de Toruń

Ubicación	Toruń, norte de Polonia.
Tecnología	Turbina Francis instalada en una pequeña central hidroeléctrica.
Fuente de energía	Agua tratada proveniente de los tanques de sedimentación secundaria de la planta
Potencia instalada	55 kW
Producción anual estimada	Genera hasta 150.29 MWh, según datos de caudal de 2018.
Eficiencia observada	64.76% en condiciones óptimas, dentro del rango documentado (30%–96%).

Cómo hemos dicho hasta ahora, una de las ventajas de la aplicación de este tipo de energía es que se puede aprovechar la infraestructura existente, lo que reduce costos de construcción. También se destaca de los resultados un menor impacto ambiental comparado con plantas hidroeléctricas en ríos, además, existe un flujo constante de aguas residuales, lo que mejora la estabilidad operativa.

En España, según los datos de Aqualitans (2017), la EDAR de La Cartuja (Zaragoza) en esta planta se prevé utilizar una caída de 8,50 metros entre la salida de agua tratada y el río Ebro para generar energía. En tal sentido, se conoce que la planta se construyó a una altura mayor que la del río con el propósito de protegerla de las inundaciones. Por ello, puede utilizarse esa caída para producir energía, la proyección de esta iniciativa es de aproximadamente 685 000 kWh al año.

4.2.6 Energía geotérmica

En palabras de Calise et. al (2018), la energía geotérmica es una fuente de energía renovable que consiste en el aprovechamiento del calor almacenado en la Tierra o el calor directo (ambos inclusive) para generar electricidad. Por lo general se obtiene de fluidos como agua o vapor que se hallan presentes en yacimientos geotérmicos que

se encuentran en la corteza terrestre. Este calor se genera principalmente por un proceso de desintegración espontánea, que surge de manera natural y continua de isótopos radiactivos presentes rocas naturales como el torio, potasio y uranio en pequeñas proporciones.

Los datos del Banco Mundial (2017), exponen que, para genera la energía geotérmica, El calor se transmite por conducción a través de los materiales del subsuelo. En algunos casos, el calor es acumulado dentro de zonas de baja conductividad térmica en las mismas rocas. Asimismo, en dichas áreas, el gradiente geotérmico (variación de temperatura con la profundidad) puede ser mucho mayor que el promedio, lo que facilita la extracción del calor. La energía se aprovecha por medio de la utilización de sistemas geotérmicos que pueden incluir agua o vapor en formaciones geológicas porosas o fisurales. En ese proceso, el calor es transportado hacia la superficie a través de vapor o agua que se calientan en el subsuelo y que se extraen a través de perforaciones, más adelante, este calor puede ser utilizado para generar electricidad u otras aplicaciones térmicas como calefacción.

Como se trata de calor originado de manera natural en la tierra, a través de la radiación residual del planeta y sus procesos geotérmicos naturales hablamos de temperaturas que pueden alcanzar los 350 °C cuando se trata de Alta entalpía [función termodinámica que representa la energía total de un sistema a presión constante], es decir, se puede utilizar para la generación eléctrica en plantas de turbina de vapor o en turbinas binarias. (Banco Mundial, 2017) En el caso de Media y baja entalpía, donde las temperaturas van de 90°C a 200°C, se pueden utilizar en una EDAR, para deshidratación de lodos, calefacción distrital, calentamiento de procesos y, en general como fuente de calor directo.

En otras palabras, dentro de una EDAR, la energía geotérmica puede aprovecharse en los siguientes aspectos:

- Plantas de ciclo simple o convencional donde haya turbinas.
- Plantas de ciclo binario (ORC) para aprovechar aquellos fluidos de menor temperatura.
- Calor directo en procesos como calentamiento de agua, deshidratación de lodos, calentamiento de espacios, secado, desalinización, etc.

El uso de esta fuente de energía puede ser continua, es decir, su producción no depende de factores meteorológicos, lo que permite una menor intermitencia en comparación con otras energías renovables. De igual manera, su producción y empleo

contribuye a la reducción de emisiones de CO₂ frente a combustibles fósiles, además, tiene un gran potencial de suministro local y mayor seguridad energética.

4.2.6.1 Viabilidad de esta energía en una EDAR

Para la incorporación de esta tecnología es preciso tomar en cuenta una serie de factores como el costo de la inversión, la identificación de los recursos geotérmicos locales, tales como, profundidad de las fuentes, temperatura del fluido y presión, calidad del agua. Además, es importante considerar el posible impacto ambiental la construcción y gestión de pozos en la zona.

Basándonos en la información general sobre energía geotérmica podemos estimar que la viabilidad dependerá de varios factores clave, por ejemplo:

1. **Ubicación geológica:** evaluar si la zona cuenta con yacimientos geotérmicos aprovechables, donde se identifica si son de alta o baja entalpía. Además, amerita analizar el gradiente geotérmico y una presencia adecuada de formaciones geológicas.
2. **Proximidad a los yacimientos:** es necesario que los yacimientos estén cerca de las instalaciones, especialmente cuando existe baja entalpía, porque no es viable el transporte de calor a largas distancias.
3. **Estudio técnico y económico:** es imprescindible analizar detalladamente las condiciones del acuífero, así como la calidad del fluido, la temperatura, y los costos de inversión inicial.
4. **Impacto ambiental:** en la instalación podría presentarse algún efecto sobre el suelo, el agua, el aire y los ecosistemas, por ello, es importante hacer esta evaluación con el fin de implantar medidas para minimizar estos posibles impactos.

Caso de éxito

Di Fraia, Macaluso, Massarotti y Vanoli (2019), explican que la incorporación de la energía geotérmica a una EDAR es altamente favorable tanto desde el punto de vista técnico como económico y ambiental. Los autores plantean que la energía geotérmica es una solución viable, además, es sostenible y rentable para alimentar una EDAR, especialmente en los contextos más insulares o remotos. De acuerdo con el resultado de la aplicación de este tipo de energía en una estación depuradora de aguas residuales ubicada en la isla de Ischia en Italia, los autores exponen los siguientes datos:

Tabla 8. Energía geotérmica aplicada a una EDAR en Ischia, Italia

Aspecto	Detalles del caso
Ubicación	Isla de Ischia, Campania, Italia
Tipo de instalación	EDAR con tratamiento biológico y secado térmico de lodos
Fuente geotérmica	Geo-fluido de 140 °C extraído a 180 m de profundidad
Tecnología aplicada	Ciclo Orgánico de Rankine (ORC) + secado térmico con flujo desecante reciclado
Producción eléctrica	962 MWh/año (1.68 kWh por kg de lodo tratado)
Reducción de lodos	73% menos masa de lodos a disponer
Rentabilidad	Payback de 5.04 años, VAN de 1,459 k€
Impacto ambiental	Ahorro de 2,722 MWh/año de energía primaria y 628 t CO ₂ /año evitadas
Excedente energético	Electricidad sobrante vendida a la red nacional
Innovación	Primer análisis exergético aplicado al secado de lodos en EDAR

Este ejemplo demuestra cómo una EDAR puede alcanzar la anhelada autosuficiencia energética, además de reducir significativamente sus residuos, y generar ingresos adicionales, todo mediante el aprovechamiento de una fuente geotérmica local. Del mismo modo, el sistema es útil en contextos donde el acceso a combustibles fósiles es limitado y costoso. Dicho lo anterior, cabe acotar que existe desafíos y consideraciones sobre la incorporación de esta energía a una EDAR, por ello, la viabilidad de incorporar energía geotérmica en la EDAR Prat de Llobregat dependerá de un estudio geológico, técnico, económico y ambiental específico para la región.

4.3 Energías Marinas

Las energías marinas son un tipo de energía renovable que se obtienen aprovechando el movimiento, la salinidad y la temperatura de mares y océanos. Estas formas de

energía se consideran limpias e inagotables, además, tienen un enorme potencial para contribuir a la transición energética global (Ortega, 2014). Existen diversas formas de aprovechamiento energético de la energía marina que veremos a continuación.

4.3.1 Energía undimotriz

Ortega (2014), explica que la energía undimotriz utiliza el movimiento de las olas mediante Convertidores de Energía de Olas (WEC, por sus siglas en inglés) para generar electricidad. Viola et al (2016) señalan que el agua es necesaria para producir todas las formas de energía, por ejemplo, se usa para generar combustibles primarios, y también en la extracción de recursos, además, el riego de cultivos de materia prima para biocombustibles, el refinado y el procesamiento de combustibles y el transporte. Por tal motivo, estos autores consideran las fuentes de energía están inextricablemente unidas en una relación que se denomina "nexo energía-agua".

Según Viola et al (2016), los dispositivos WEC transforman la energía cinética y potencial de las olas en electricidad. Por ejemplo, el Departamento de Energía de la Universidad de Palermo diseñó el "Point Absorber", un dispositivo que utiliza generadores lineales para convertir directamente la energía de las olas en electricidad, una de las ventajas de este dispositivo es que no requiere de otros dispositivos intermedios ni fluidos contaminantes. La potencia nominal del "Point Absorber" es de 80 kW, con una eficiencia del 50%. Su función es aprovechar el movimiento vertical de las olas para activar generadores lineales. Para maximizar la conversión de energía estos equipos incluyen imanes permanentes y bobinas de cobre. Los estudios plantean que estos WEC pueden instalarse en forma de granjas de energía marina; para ello, pueden ser alineados de manera perpendicular a la dirección dominante de las olas, de esta forma se minimizan interferencias y se optimiza la producción de energía.

4.3.1.1 Proceso de producción de energía

De acuerdo con el planteamiento de Martínez (2018), en la producción de la electricidad que utiliza la energía cinética y potencial de las olas, se observa un principio de funcionamiento explicado de la siguiente manera:

- **Captación de energía:** para ello se utilizan equipos como el "*Pelamis*" o sistemas OWC (Columna Oscilante de Agua) que está diseñado para aprovechar el movimiento de las olas. Este OWC utiliza una estructura hueca que se encuentra parcialmente sumergida donde encierra una columna de aire sobre una columna de agua, en la ejecución, las olas provocan que la columna de agua suba y baje, lo cual permite compresión y descomprimiendo el aire, lo que se traduce en genera energía mecánica.

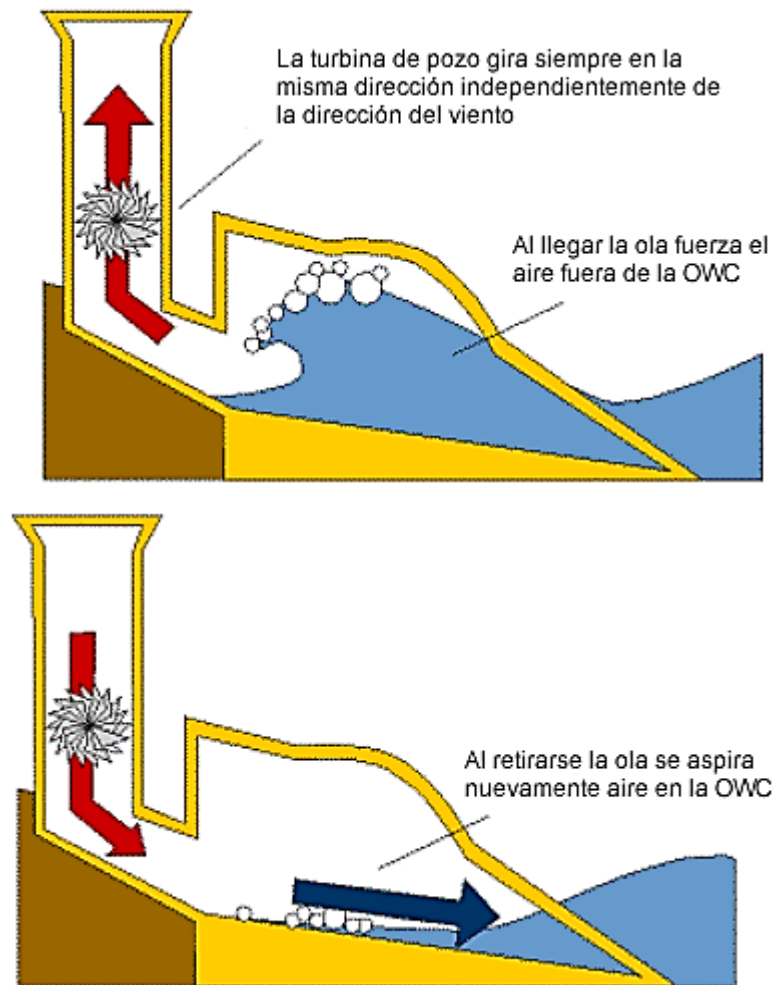


Figura 7. Columna Oscilante de Agua (Oscillating Water Column) Fuente: Textos Científicos (2009)

- **Conversión primaria:** esta energía mecánica generada por las olas se transforma en un movimiento controlado a través del desplazamiento de flotadores o columnas de aire.
- **Conversión secundaria:** finalmente, este movimiento se convierte en energía eléctrica mediante turbinas y algunos generadores o sistemas hidráulicos.

4.3.1.2 Viabilidad en una EDAR

La energía undimotriz es muy conveniente en las zonas que se encuentran cerca del mar, se trata de una fuente ilimitada que no requiere de combustible, razón por la cual contribuye a la reducción de costos y de emisiones contaminantes. Para evaluar su viabilidad de su incorporación a una EDAR, lo principal a tener en cuenta es si la instalación está ubicada cerca de la costa. Otros factores a considerar son la consistencia de las olas y evaluar un posible impacto ambiental de los dispositivos undimotrices en el entorno marino y en las actividades cercanas. En cuanto a los costos, aunque son significativos al momento de la instalación, se estima que los costos de mantenimiento son bajos. Martínez (2018)

En el caso de su aplicación en el funcionamiento de una EDAR, Garriga (2020), explica que la energía undimotriz puede ser utilizada para alimentar los procesos de tratamiento de aguas residuales, reduciendo la dependencia de fuentes de energía convencionales y disminuyendo la huella de carbono en los siguientes procesos:

- **Aireación de reactores biológicos:** como hemos visto, la aireación consume el mayor porcentaje de la energía en una EDAR. Por ello, la energía undimotriz puede utilizarse para alimentar compresores o soplantes.
- **Bombas de recirculación y elevación:** según lo estudiado, las olas pueden generar energía suficiente para poner en funcionamiento bombas en sistemas de lodos activados o digestores anaerobios.
- **Sistemas de control y monitoreo:** en las EDAR nos encontramos con Sensores sistemas SCADA y PLCs que pueden funcionar con energía limpia, mejorando la sostenibilidad del sistema.

Caso de éxito

Viola, Franzitta, Trapanese y Curto (2016), explican que en la isla de Pantelleria, Italia se reconoce un caso de éxito muy interesante, pues, se ha explorado la integración de energía undimotriz con plantas desalinizadoras, que son en realidad un tipo de EDAR, en esta planta especializada en la producción de agua potable a partir de agua salada o salobre se aplicó esta tecnología dando como resultado la reducción de más de 7 millones de litros de diésel al año; lo que representa el ahorro de hasta 10,5 millones de euros anuales y la disminución de 20.725 toneladas de CO₂. La energía generada fue destinada a alimentar dos plantas desalinizadoras: “Sataria” (agua de mar) y “Maggiuluveddi” (agua salobre). Para ejecutar este proyecto, se instalaron los mencionados dispositivos tipo *Point Absorber* para convertir directamente la energía de las olas en electricidad. De acuerdo con los datos, estos dispositivos tienen una eficiencia estimada del 50% y pueden generar hasta 120 MWh/año por unidad. El proyecto fue un éxito, puesto que Pantelleria sufre escasez de agua, por lo que depende de la desalinización para abastecer a su población, especialmente en el verano, esto trae como consecuencia que el consumo eléctrico sea elevado, por ello, es cubierto tradicionalmente por generadores diésel costosos y contaminantes.

Por consiguiente, la incorporación de la energía undimotriz a una EDAR es una opción bastante viable y sostenible, es especialmente integrable en las plantas cercanas a zonas costeras, pero requiere un análisis detallado de costos, impacto ambiental y compatibilidad tecnológica.

4.3.2 Energía mareomotriz

De acuerdo con Angulo (2020), la energía mareomotriz una forma de energía renovable obtenida del movimiento de las mareas. Es decir, se aprovechan los movimientos, de ascenso y descenso periódico que ocurre con el nivel del mar causado por la interacción gravitacional entre la Tierra, la Luna y el Sol. El autor explica que la energía mareomotriz se genera mediante instalaciones ubicadas en zonas costeras donde existen fuertes variaciones de marea. Para su funcionamiento, se aplican tres tecnologías principales:

- Presas de marea: estas se construyen mediante diques que capturan agua durante la marea alta y se liberan en la baja, lo que causa el moviendo turbinas.
- Turbinas submarinas: son parecidas a los aerogeneradores usado para producir energía eólica, pero bajo el agua. Se aprovechan las corrientes de marea para generar electricidad.
- Lagunas artificiales: se construye estructuras capaces de almacenar agua fuera del mar abierto y la liberan controladamente para generar energía.

El aprovechamiento de las mareas para generar energía depende de una maravilla de la ingeniería hidráulica tradicional como lo son los molinos de marea, históricamente fueron usados para moler grano, fundir cobre o fabricar papel o hielo. En la actualidad, el principio de la operación de los molinos se ha modernizado para generar electricidad en presas mareomotrices, como la del estuario del Rance en Francia (Ibáñez, 2016).

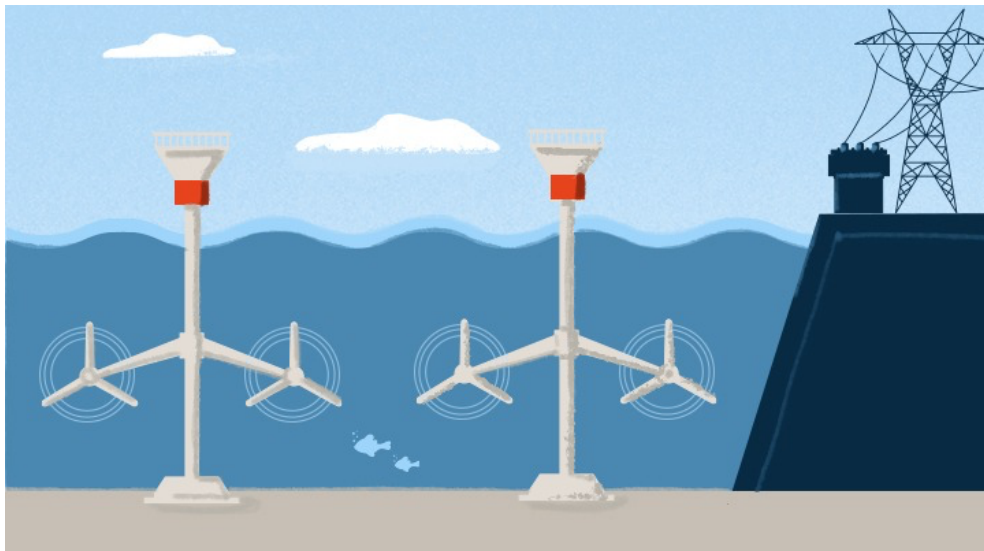


Figura 8. Turbinas submarinas. Fuente: Greentech (2024)

De acuerdo con lo planteado por Ibáñez (2016), la potencia generada por la energía mareomotriz varía significativamente según el tipo de instalación, además, también depende de la tecnología empleada y condiciones locales tales como el desnivel de marea y la velocidad de las corrientes. El autor plantea que la viabilidad de una central mareomotriz, depende de un desnivel mínimo de marea de 5 metros y condiciones marítimas estables. A continuación, presentamos ejemplos reales de su aplicación:

Tabla 9. Ejemplos reales de potencia generada por la energía mareomotriz

Instalación	País	Tipo de tecnología	Potencia instalada
La Rance	Francia	Presa de marea	240 MW
Swansea Bay (propuesta)	Reino Unido	Laguna artificial	320 MW
MeyGen Project	Escocia	Turbinas submarinas	398 MW (proyectado)
Sihwa Lake	Corea del Sur	Presa de marea	254 MW

Fuente: (Angulo, 2020)

Este tipo de energía renovable tiene una ventaja significativa: es predecible. A diferencia del viento o el sol, las mareas siguen ciclos astronómicos muy precisos. Además, este tipo de energía no produce gases contaminantes y posee una alta densidad energética, ya que el agua es mucho más densa que el aire, lo cual permite generar más energía por unidad de volumen.

4.3.2.1 Viabilidad en una EDAR

En cuanto a la viabilidad de la incorporación de esta energía a una EDAR, Angulo (2020) expone que por lo general no es viable, esto debido a que su ubicación depende de la fuerte actividad de la marea en la zona costera donde debe estar ubicada. Además, señala el autor, que, aun dadas las condiciones, es preciso integrar un sistema híbrido de generación renovable, porque, incluso en el escenario de que la energía mareomotriz sea útil, sería para alimentar la red general más que para cubrir directamente las necesidades de la planta.

Por su parte, Ibáñez (2016), explica que la viabilidad de la energía mareomotriz en una Estación Depuradora de Aguas Residuales depende de varios factores técnicos, geográficos y económicos. Señala que no es común, sino en ciertos contextos donde puede ser una solución innovadora para alimentar procesos energéticos de la planta. Según este autor, en España su desarrollo se encuentra en una fase emergente pero prometedora, donde se reconocen algunos hitos importantes y proyectos piloto que posicionan al país como un actor potencial en el desarrollo de energías marinas, entre los cuales destacan:

Tabla 10. Proyectos destacados en España

Proyecto	Ubicación	Tecnología	Producción anual	Estado
Mutriku	País Vasco	Columna de Agua Oscilante (OWC)	~300.000 kWh	Operativo desde 2011
BiMEP (Biscay Marine Energy Platform)	Armintza, Euskadi	Ensayos de dispositivos flotantes	Experimental	Plataforma de investigación activa
Magallanes Renovables	Zona de Gibraltar	Mareomotriz flotante con buques y palas acuáticas	En desarrollo	Previsto para antes de 2030

Ibáñez plantea que algunas aplicaciones potenciales a una EDAR podrían ser:

- Complementar otras fuentes como solar o biogás.
- Integrar la energía mareomotriz con digestión anaerobia para cubrir picos de demanda.
- Mejorar la imagen institucional por su enfoque en sostenibilidad

En palabras de Ibáñez (2016), existen algunos factores que son relevantes para la incorporación de la energía mareomotriz en una EDAR, tales como:

- Es una parte esencial para generar suficiente energía mareomotriz que la ubicación de la planta sea costera con alta amplitud de marea. Por ejemplo, zonas como el Golfo de Fonseca o la costa atlántica de Canadá.
- Es útil para bombeo, aireación, digestión anaerobia, etc., porque genera energía de manera predecible y estable.
- Se reducen los costos de conexión siempre que la EDAR esté cerca de un estuario o canal donde pueda instalarse una turbina mareomotriz.
- La inversión inicial es alta, pero los costos operativos son bajos. Es posibles aplicar a subvenciones o políticas verdes pueden mejorar la rentabilidad.

4.3.3 Energía azul

En palabras de Terrero et al (2023), La energía azul es un tipo de energía renovable, que se genera a partir del gradiente salino que ocurre entre dos soluciones de diferente salinidad. Esta energía se produce mediante la tecnología de Electrodialisis Inversa (RED), la cual aprovecha la salmuera de ósmosis inversa de agua de mar como corriente de alta salinidad y agua residual tratada como corriente de baja salinidad. De acuerdo con Busti, Monteiro y Honnicke (2014), el concepto de energía azul se aplica a todas las fuentes de energía provenientes del agua en el planeta Tierra. Sin embargo, se aplica más recientemente a este proceso específico que aprovecha la diferencia de salinidad entre el agua dulce de los ríos y el agua salada presente en los océanos en regiones estuarinas.

Tal como lo explican Busti, Monteiro y Honnicke (2014), este gradiente de salinidad genera un potencial energético de aproximadamente 2,2 KJ/L, el cual puede ser explotado mediante técnicas como la electro diálisis reversa (RED) y la ósmosis por presión retardada (PRO). Del mismo modo, el método capacitivo, basado en un capacitor electrostático de doble capa, también viene siendo estudiado como una forma prometedora de aprovechar esta energía. Las técnicas principales para explotar este gradiente pueden explicarse de la siguiente manera:

1. **Electro diálisis reversa (RED):** funciona por medio de la utilización de membranas que permiten el paso selectivo de iones. Ante el contacto del agua dulce y el agua salada, los iones se mueven a través de las membranas debido a la diferencia de salinidad, generando una corriente eléctrica.
2. **Ósmosis por presión retardada (PRO):** ocurre cuando el agua dulce se mueve hacia el agua salada a través de una membrana semipermeable, generando una presión que puede ser convertida en energía.
3. **Método Capacitivo:** este método innovador implica que el capacitor se cargue y que, al entrar en contacto con agua dulce, la energía electrostática aumente debido a la difusión de sal, lo que permite una acumulación de energía que puede ser aprovechada.

4.3.3.1 Viabilidad en una EDAR

Este tipo de energía se produce por el proceso ocurrido en las desembocaduras de los ríos, donde ambos tipos de agua se encuentran. En palabras de Abad (2017), pese a que esta tecnología tiene un gran potencial, su desarrollo aún está en etapas iniciales y requiere más investigación para optimizar su eficiencia y reducir costos. En España, su desarrollo es limitado y aún se encuentra en etapas experimentales, sin que aun ocurran despliegues comerciales significativos. (Quero, 2021)

Mendoza (2022), explica que el potencial energético estimado que puede producir la energía azul se estima a nivel global cerca de 1,4 a 2,6 teravatios (TW), lo cual equivale aproximadamente al 20% del consumo eléctrico mundial actual. Es una fuente limpia, continua y no produce emisiones de CO₂, por ello es ideal para complementar otras renovables como la solar y la eólica. A diferencia de la solar o eólica, no depende del clima; pero, es imprescindible que se disponga de estuarios y desembocaduras de ríos. Por otro lado, plantea el autor que algunos desafíos de su incorporación ameritan el uso de membranas y materiales especializados costosos, además, en el proceso surge una acumulación de sedimentos en membranas que reduce la eficiencia. Esta tecnología aun requiere de pruebas para implementaciones a gran escala.

Caso de éxito

Este tipo de energía podría aplicarse en una Estación Depuradora de Aguas Residuales, especialmente cuando se hallan en zonas costeras donde el efluente tratado puede mezclarse con agua de mar. Esta integración es viable, y, según Mendoza (2022), está siendo explorada activamente en proyectos europeos como Life-3E. El autor expone que un estudio en Cantabria demostró que usando agua de mar (0.66 M) y efluente tratado (0.036 M), pudo generarse una potencia bruta de **0.66**

W en condiciones de laboratorio. Entre los beneficios reportados de su incorporación se encuentran:

- **Reducción de consumo energético:** ocurre porque se evita la absoluta dependencia de la red eléctrica
- **Producción in situ de energía:** es una fuente renovable y continua
- **Economía circular:** se produce la reutilización del efluente como recurso energético
- **Integración con regeneración:** mejora la eficiencia de procesos de reutilización

Pese a los retos técnicos y costes iniciales de su implementación, este enfoque se alinea perfectamente con los objetivos de sostenibilidad y autoconsumo planteado en este trabajo.

4.4 Energías Renovables Viables en la EDAR del Prat Llobregat y porcentaje propuesto

AQUALITRANS (2017), afirma que España, por ejemplo, tiene una ubicación privilegiada con altos niveles de irradiación solar, lo que permite una producción eficiente de energía solar. Los datos del estudio de AQUALITRANS exponen que una posible implantación de una instalación solar fotovoltaica para autoconsumo de una EDAR podría suponer ahorros energéticos de hasta el 15%. En cuanto a la energía eólica, en zonas con condiciones de viento favorables, ubicar este tipo de energía puede ser una fuente constante y complementaria a la energía solar, ya que puede generar electricidad incluso durante la noche. En este sentido, la investigación señala que la instalación de una minigeneración eólica para cubrir la demanda de la EDAR, lo cual puede promover ahorros de hasta un 10%.”

Del mismo modo, la Instalación de paneles fotovoltaicos utilizando energía solar para producir electricidad y cubrir parte de las necesidades energéticas de la EDAR es una de las medidas administradas para reducir la huella de carbono y los costes operativos, dos factores fundamentales para garantizar una adecuada gestión de las plantas de tratamiento de aguas residuales de acuerdo con los datos del informe Water Technology Trends 2024 de Idrica (2024).

Podemos decir que la elección de energía fotovoltaica y minieólica responde a criterios de compatibilidad estructural y otros como la disponibilidad de recursos naturales locales, la modularidad de instalación y la posible sinergia con los procesos energéticos existentes. Como hemos visto, ambas tecnologías permiten una implementación escalonada, con bajo impacto ambiental y alta adaptabilidad para las condiciones operativas de la planta. De acuerdo a las condiciones de la EDAR Prat Llobregat, vamos a revelar el potencial del recurso solar y las condiciones de viento en la zona, que puedan favorecer la instalación de sistemas eólicos a pequeña escala, todo con la intención de proponer una estrategia que plantee el aprovechamiento de estos recursos y a su vez, lograr un equilibrio y una producción estable. De igual manera, se pretende aprovechar la producción energética de estas energías renovables para contribuir a mejorar los procesos que exigen una mayor demanda de energía, razón por la cual el consumo disminuiría considerablemente.

Según los datos de la tabla 3 el biogás representa actualmente la fuente principal de autoconsumo energético, con cogeneración eficiente y aprovechamiento del metano generado en la digestión anaerobia. Al respecto, proponemos aumentar la producción de biogás a través de la cogeneración. De manera que, para cubrir un **61% del déficit energético** de la EDAR Prat Llobregat mediante un mix renovable optimizado es preciso asignar un porcentaje estimado de:

Tabla 11. Distribución del Mix de energías renovables propuestas para superar déficit energético

Fuente	Producción estimada (kWh/año)	% del consumo total
Biogás + cogeneración	18.231.707	53%
Fotovoltaica	2,047,325,82	6 %
Minieólica	682,441,94	2%
Total renovable	20.961.475	61%

5. ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD TÉCNICA DE LA INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS RENOVABLES SELECCIONADAS EN LA EDAR DEL PRAT LLOBREGAT (BARCELONA)

La transición energética en infraestructuras críticas como las estaciones depuradoras de aguas residuales en realidad representa una oportunidad estratégica para avanzar en la reducción de emisiones, optimizar costes operativos e incursionar en modelos de economía circular. En este apartado vamos a analizar la viabilidad técnica de integrar dos tecnologías renovables específica como lo son la energía solar fotovoltaica y la energía minieólica en la EDAR El Prat Llobregat, una de las más grandes y complejas de Cataluña.

La incorporación de energías renovables es viable para cubrir el déficit energético de la planta de tratamiento de aguas residuales El Prat de Llobregat por diversas razones. Por ejemplo, actualmente, la planta ya utiliza biogás generado en el proceso de digestión anaeróbica de lodos donde se logra satisfacer aproximadamente el 29.45% de sus necesidades energéticas. Sin embargo, como podemos ver, aún depende en gran medida de la red eléctrica nacional para cubrir el resto de su demanda energética.

Por consiguiente, nuestro análisis nos indica una posible optimización de la generación de biogás a través de estrategias como la codigestión de lodos con residuos orgánicos adicionales, tales como los desechos de cocina, lo cual aumentaría la producción de biogás y, por ende, la recuperación de energía. No obstante, el objetivo que nos ocupa es la implementación de otras fuentes de energía renovable, como paneles solares o turbinas eólicas. Esta estrategia también podría complementar la generación de energía interna, lo cual contribuiría de manera más eficiente a la reducción de la dependencia de la red eléctrica y alcanzar la autosuficiencia energética.

Teniendo en cuenta que el consumo total de la EDAR es de 47,327,754 MWh/año y la producción de biogás en planta es de 13,205,657 MWh/año, existen 34,122,097 MWh/año déficit (ver tabla 3) que implica el diseño de una estrategia para cubrir mediante energías renovables para que la planta trabaje con autonomía energética, lo que pretendemos alcanzar mediante la inyección de más energía en los procesos de mayor demanda. Al respecto, hemos decidido proponer una estrategia conocido como mix de energías, como medida para asignar un valor estimado a la producción de energía a través de las energías renovables seleccionadas y en un escenario promedio, mejorar el autoconsumo a través de la energía fotovoltaica, la energía minieólica y el biogás, en un porcentaje aproximado del 64% incorporando las 3 energías.

De acuerdo con Treviño (2025), Un mix energético no es más que la combinación de diferentes fuentes de energía que un país, región o sistema pueden utilizar para satisfacer sus necesidades de generación eléctrica, por ejemplo, la calefacción, el transporte y otras demandas energéticas. Este concepto ampliado podría incluir tanto las fuentes de energía renovables como las no renovables y refleja la proporción en que cada una contribuye al suministro total. Treviño (2025), explica que la implementación de un mix energético tiene las siguientes garantías:

- **Diversificación:** cuando un mix energético está equilibrado reduce la dependencia de una sola fuente de energía, además, mejora la seguridad del suministro.
- **Sostenibilidad:** una vez que se incluyen más energías renovables es posible avanzar hacia un sistema más limpio y con menores emisiones de gases de efecto invernadero.
- **Adaptación a recursos locales:** cada país, región o industria diseña su mix energético en función de sus recursos naturales, sus capacidades tecnológicas y necesidades económicas particulares.
- **Resiliencia:** Un mix diversificado ayuda a enfrentar fluctuaciones en los precios de los combustibles, tensiones geopolíticas o interrupciones en el suministro.

En el caso de España, las energías renovables, como la eólica y la solar, en la actualidad ya representan una parte significativa del mix energético. Según el PNIEC (citado en Treviño, 2025), se estima que estas fuentes alcancen un 81% de la generación eléctrica para 2030, contribuyendo a la descarbonización del sistema energético. De acuerdo con lo estudiado, se estima que es posible aplicar una propuesta de mix energético a una planta de tratamiento de aguas, y, de hecho, Treviño (2025), expone que es una práctica cada vez más común para mejorar la sostenibilidad, reducir costes operativos y minimizar el impacto ambiental.

En palabras de Arroyo y Rodríguez (2011), las propuestas de mix energético se justifican en función de los objetivos nacionales y globales, por ejemplo, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la competitividad económica, la diversificación de fuentes de energía y la seguridad del suministro. Por consiguiente, para calcular el mix energético potencial para la EDAR Prat Llobregat, considerando tres fuentes: biogás (ya implementado), energía fotovoltaica (con alta viabilidad técnica) y energía minieólica (como complemento estratégico) vamos a ejecutar los siguientes cálculos.

.1. Biogás (ya implementado)

- Producción anual: **13.205.657 kWh/año**
- Consumo total de la EDAR: **47.327.754 kWh/año**
- Déficit actual: **34,122,097 kWh/año**
- Cobertura actual:

$$\text{Porcentaje anual} = \frac{13.205.657}{47.327.754} = 100 \approx 27,9 \%$$

5.1 Viabilidad técnica del aumento de biogás a partir de la cogeneración

La Guía de soluciones tecnológicas para la eficiencia de las EDAR de Aqualitans (2017), define codigestión anaerobia como el proceso de añadir residuos orgánicos externos al digestor al mismo tiempo que los lodos de depuradora. Este proceso se ejecuta como medida para mejorar la carga orgánica y la producción de metano. En este mismo orden de ideas, expone que la cogeneración es el proceso que permite producir simultáneamente energía eléctrica y térmica a partir de una fuente única de combustible. En el contexto de las EDAR, esto normalmente implica utilizar el biogás

producido por la digestión anaeróbica como combustible La estrategia para lograr este incremento de describe de la siguiente manera:

Tabla 12. Estrategia de incremento de la cogeneración en la EDAR

Estrategia	Detalles técnicos	Impacto estimado
Incorporar residuos agroindustriales	Por ejemplo, pulpas de frutas, cáscaras, residuos de café, otros.	Se espera un incremento de más de 20% en producción de biogás
Añadir residuos alimentarios urbanos	Ejemplo, residuos de los mercados, comedores y supermercados	Son elementos de alta biodegradabilidad, por ende, de rápida generación de CH ₄
Utilizar glicerina cruda de biodiésel	Es un subproducto energético con alto poder calorífico	Puede conseguirse hasta el 200% de aumento en CH ₄ por kg de VS
Optimizar relación C/N	La proporción ideal es de 20–30. Se logra mezclando lodos con residuos ricos en carbono	Mejora estabilidad del proceso y rendimiento
Pretratamientos térmicos o mecánicos	Aumentan la solubilidad de la materia orgánica	Mejora la tasa de digestión y producción de gas
Control de pH, temperatura y carga orgánica	Ideal para mantener condiciones mesofílicas (~35°C) y pH neutro	Ayuda a disminuir inhibiciones y maximiza rendimiento

Fuente: (Aqualitrans, 2017)

5.1.1 Supuestos técnicos para el cálculo de incremento de biogás mediante codigestión

El cálculo posterior se explica mediante la adopción de los siguientes supuestos técnicos, basados en los estudios de Ministerio de Energía de Chile, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y Global Environment Facility (GEF) (2011) y benchmarking internacional:

- **Tipo de residuo añadido:** consideramos la adición de 5.000 kg/día de residuos de frutas, lo cual es entendido como materia orgánica pretratada o concentrada, que representa un alto contenido biodegradable. Cabe acotar que este valor no representa fruta fresca en estado crudo, sino una fracción de esta, ya estabilizada con alto contenido de sólidos volátiles (SV), tal como es común en residuos agroindustriales tamizados o pulpas de descarte.
- **Contenido de sólidos volátiles (SV):** Estamos asumiendo un contenido de SV del 85%, lo cual según las fuentes consultadas es coherente con residuos orgánicos de origen vegetal que han sido previamente deshidratados o pretratados. Por el contrario, en el caso de fruta fresca, este valor sería significativamente menor debido a su alto contenido de agua (hasta 85–90%).
- **Producción específica de biogás:** hemos adoptado una producción de 0,6 m³ de biogás por kg de SV, valor documentado en la literatura estudiada sobre residuos orgánicos fácilmente biodegradables (Aqualitrans, 2017; Aguiló, 2018). Como es sabido, este rendimiento puede variar según la composición del residuo, u otros aspectos como la temperatura del digestor y la relación Carbono/Nitrógeno.
- **Rendimiento del digestor anaerobio.** consideramos un rendimiento de 85%, que es un valor correspondiente a digestores mesofílicos operados eficientemente, donde existe un control de pH, temperatura (35 °C), tiempos de retención adecuados y carga orgánica. De acuerdo con Ministerio de Energía de Chile (2011), el rendimiento del digestor se refiere a la eficiencia con la que se convierte la materia orgánica (sólidos volátiles) en biogás, es decir, digestores con residuos de alta biodegradabilidad puede tener un rendimiento de entre 88% y 85%. Según el estudio de Aqualitrans (2017), en la mayor parte de los casos estudiados, los digestores mesofílicos pueden operar con rendimientos entre 60% y 80%, y en casos como la EDAR de Santa Feliu, ha superado el 85%. Podemos decir que este valor representa un escenario optimizado, por ello, podría ser inferior en digestores que suelen operar con mezclas más diluidas o sin pretratamiento.
Es decir, este rendimiento, podemos encontrarlo en casos específicos como el de digestores con hidrólisis térmica + codigestión, que pueden alcanzar entre 85 y 90%.
- **Poder calorífico del biogás:** para el cálculo utilizamos un valor de 6 kWh/m³, correspondiente al poder calorífico inferior (PCI) del biogás que tiene una concentración de metano entre 60% y 65%. Se estima, según la literatura estudiada que este valor es estándar en EDARs que utilizan biogás para cogeneración eléctrica.

5.1.1.1 Análisis de sensibilidad

Dados los supuestos técnicos descritos, la interpretación de los 5.000 kg como SV directamente implica desde luego una simplificación bastante optimista. Por lo tanto, cabe acotar que, en escenarios reales, cuando se trata de fruta cruda, la producción de biogás sería considerablemente menor. De manera que, este modelo debe interpretarse como un ejemplo de alto rendimiento, lo cual consideramos útil para evaluar el potencial técnico de la codigestión en condiciones favorables.

En tal sentido, planteamos posibles escenarios adaptados a diferentes condiciones que podrían ser parte de estudios posteriores y representan una contribución y límites pertinentes al escenario planteado en la presente TFM. Los posibles escenarios encontrados, según estudios relacionados, son los siguientes:

Tabla 13. Comparativa de posibles escenarios

Escenario	Tipo de residuo	SV estimado	Rendimiento digestor	Producción biogás
Optimista (nuestro ejemplo)	SV puro	5.000 kg	90%	2.700 m ³ /día
Realista	Fruta cruda	637 kg SV	70%	382 m ³ /día
Pretratado	Pulpa concentrada	1.500 kg SV	85%	765 m ³ /día

Fuente: Ministerio de Energía de Chile (2011)

Ejemplo práctico

Según los datos señalados en el apartado 3 de este TFM, la EDAR El Prat de Llobregat cuenta con 8 unidades de digestores de **7.180 m³** cada uno, lo que equivale a **57.440 m³** totales. Por otro lado, de acuerdo con Ministerio de Energía de Chile et al (2011), el rendimiento máximo de un digestor de biogás depende de algunos factores, tales como el tipo de sustrato, la temperatura de funcionamiento y la gestión cuidadosa de las condiciones físicas y químicas.

Supongamos que añadimos **5 toneladas/día de residuos de frutas**, lo cual incluye un contenido de sólidos volátiles de 85% y una producción aproximada de **0.5 Nm³ CH₄/kg VS**. De acuerdo con los datos supuestos, la incorporación de 5 toneladas/día de residuos de frutas no lograría superar la capacidad de carga de los digestores de la EDAR Prat Llobregat. Por el contrario, representa una fracción bastante manejable, y, por lo tanto, podría ser absorbida sin comprometer el rendimiento del sistema. No obstante, para lograrlo, es imprescindible que se mantenga el equilibrio de nutrientes (C/N), pH y TRH. Tomando en cuenta esta información, procedemos a calcular:

- **Materia adicional:** 5.000 kg/día (residuos de frutas estabilizadas)
- **Producción de biogás por kg:** 0,6 m³/kg SV
- **Rendimiento del digestor:** 90%
- **Coste de la materia orgánica:** 0,03 €/kg
- **Coste de operación adicional:** 0,01 €/kg
- **Valor energético del biogás:** 6 kWh/m³
- **Contenido de sólidos volátiles (SV):** 85%
- **Digestores existentes:** 8 unidades de **7.180 m³** cada uno → **57.440 m³** totales

- **Tiempo de retención hidráulico (TRH)** típico: 20–25 días (mesofílico)
- **Carga orgánica típica:** 2–4 kg SV/m³/día

Obtenemos los siguientes resultados:

$$5.000 \text{ kg} \times 0,85 = 4.250 \text{ kg SV/día}$$

Si asumimos la carga típica una orgánica de 3 kg SV/m³/día, entonces:

$$\text{Carga máxima admisible} = 57.440 \text{ m}^3 \times 3 \text{ kg SV/m}^3/\text{día} = 172.320 \text{ kg SV/día}$$

Este valor representa, que la carga adicional de 4.250 kg SV/día expone apenas el **2,47%** de la capacidad total de carga orgánica de los digestores de la EDAR estudiada.

- Producción de biogás adicional:

$$5000 \frac{\text{Kg residuo}}{d} \times 0,85 \frac{\text{kgSV}}{\text{kg residuo}} \times 0,9 \frac{\text{KgSVelim}}{\text{KgSV}} \times 0,6 \frac{\text{m}^3 \text{ Biogás}}{\text{KgSVelim}} = 2295 \text{ m}^3/\text{día}$$

- Producción anual:

$$2295 \text{ m}^3/\text{día} \times 365 \text{ días} = 837,675 \text{ m}^3/\text{año}$$

- Producción energética diaria:

$$2295 \text{ m}^3/\text{día} \times 6 \text{ kWh/m}^3 = 13.770 \text{ kWh/día}$$

- Producción energética anual

$$13.770 \text{ kWh/día} \times 365 = 5.026.050 \text{ kWh/año}$$

- Coste anual de materia orgánica

$$5.000 \text{ kg/día} \times 0,03 \text{ €/kg} \times 365 = 54.750 \text{ €/año}$$

- Coste anual de operación adicional

$$5.000 \text{ kg/día} \times 0,01 \text{ €/kg} \times 365 = 18.250 \text{ €/año}$$

Dado el mencionado ejemplo, es preciso resaltar que, en condiciones optimista, podemos concluir en que una incorporación de 5.000 kg de materia orgánica variada adicional cada día ayuda al incremento de la producción de biogás en la EDAR en unos **837,675 m³/año** (añadidos a los 7.300.000 m³/año que se producen actualmente), esta producción se traduce en unos **5.026.050 kWh/año** de energía útil. Sin embargo, para que este escenario se cumpla, debe existir una serie de supuestos que haría más realista esta potencial aplicación, tal como lo vimos anteriormente.

En tal sentido, a partir de este cálculo se nos presenta el siguiente escenario:

- Producción de energía eléctrica del biogás (actual): **13,205,657 kWh/año**, generados mediante cogeneración. (según los datos de la tabla 3)
- Producción de energía eléctrica del biogás (adicional): **5.026.050 kWh/año** resultado del cálculo anterior.
- Incremento porcentual:

$$\frac{5.026.050 \text{ kWh/año}}{13,205,657 \text{ kWh/año}} = 0.3805$$

$$\text{Porcentaje} = 0.3805 \times 100\% \approx 38.05\%$$

Como podemos ver, este escenario nos aportaría un **38.05%%** de incremento porcentual respecto a la generación actual de biogás sin cogeneración, que se halla en 13.205.657 kWh/año. Del mismo modo, el coste específico que se le atribuye es de apenas **0,012 €/kWh**, razón por la cual esta estrategia resulta altamente competitiva frente a la energía comprada de red y otras energías.

5.3 Viabilidad técnica de la energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica constituye una de las soluciones más viables para cubrir parte del déficit energético de la EDAR Prat Llobregat, debido a sus bajos costes de operación y la elevada disponibilidad solar en la provincia catalana de Barcelona. En esta planta, la implantación de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red interna posibilita el autoconsumo instantáneo de la energía generada y por ende la modularidad de la tecnología permite adaptar la potencia instalada a las superficies disponibles en las cubiertas y terrenos, optimizando, por tanto, la inversión y maximizando el aprovechamiento del recurso solar.

Selección de materiales y componentes recomendados para este tipo de tecnología:

-Módulos monocristalinos PERC con 450Wp - 550Wp, estos módulos poseen alta eficiencia, si se instalan en terreno con buena reflectancia y se usan trackers se pueden considerar bifaciales; emplear encapsulado glass-glass para mayor durabilidad con soportes de aluminio anodizado o acero galvanizado según costes para instalaciones fijas. Emplear, además, inversor central en función de la escala, preferiblemente inversores con Sistema de Gestión de Energía (EMS) integrado, con seguimiento Múltiple del Punto de Máxima Potencia (MPPT) y comunicación de Control de Supervisión y Adquisición de datos (SCADA).

Barcelona tiene una buena radiación solar, con un rendimiento medio de unos **1.650 kWh/m²/año** por kWp instalado al año para instalaciones bien orientadas; y, al asignarle un 50% del déficit energético a la energía solar, podemos determinar que la potencia necesaria en este tipo de energía es:

- Eficiencia del sistema: **18%**
- Factor de rendimiento global: **75%**
- Horas equivalentes de sol útil: **1.200 h/año**

Entonces, cada **kWp instalado** produce aproximadamente:

$$1 \text{ kWp} \times 1200 \text{ h/año} = 1.200 \text{ kWh/año}$$

Potencia fotovoltaica requerida

- Para calcular cuál es la potencia necesaria para cubrir el 6% del déficit calculamos

$$kWp \text{ requerida} = \frac{\text{Demanda energética anual (kWh)}}{\text{Producción anual por kWp (kWh/kWp/año)}}$$

$$Wp = \frac{2.047.326 \text{ kWh/año}}{1.200 \text{ kWh/kWp/año}} = 1,706.10 \text{ kWp}$$

5.3.1 Número de paneles solares fotovoltaicos

Según fabricantes líderes en paneles solares fotovoltaicos como LONGi Solar, modelos como el LONGi LR5-72HPH 450-550Wp que se asemejan bastante a nuestra descripción de paneles solares seleccionados poseen kilovatios picos entre (0,45-0,55) kWp, por tanto, seleccionando un valor intermedio aproximadamente y conociendo la potencia necesaria podemos determinar la cantidad de paneles solares para nuestro campo de instalación de energía solar.

- Paneles solares necesarios:

$$N. \text{ de paneles} = \frac{\text{Potencia Necesaria kWp}}{\text{Potencia típica de panel kWp}}$$

$$N. \text{ de Paneles} = \frac{1,706.10 \text{ kWp}}{0,55 \text{ kWp/pane}} = 3,101 \text{ paneles}$$

Se requieren aproximadamente **3,101** paneles solares de 550 Wp cada uno para cubrir una demanda de **1,706.10 kWp**.

Si se usan trackers, esta huella cambia, teniendo un área por kWp entre (7–8) m²/kWp). Para rendimientos exactos conviene usar datos de irradiación del emplazamiento y orientar los módulos hacia el sur, ya que en la zona dónde se sitúa la EDAR (Barcelona) los paneles solares producen más energía si están en esta orientación con una inclinación óptima. Por cada kWp instalado se requiere aproximadamente **6 m²** en montaje a ras de suelo. Cada panel de 550 Wp tiene dimensiones aproximadas de:

- **Largo:** 2,278 m
- **Ancho:** 1,134 m
- **Área física:**

$$2,278 \text{ m} \times 1,134 \text{ m} \approx 2,58 \text{ m}^2$$

$$1.705,55 \text{ kWp} \times 6 \text{ m}^2/\text{kWp} = 10.233,3 \text{ m}^2 \rightarrow \approx 1,02 \text{ hectáreas}$$

Para producir **1.705,55 kWp /año** en la EDAR Prat Llobregat se necesitarían, por tanto, aproximadamente 3,101 paneles solares de 550 kWp cada uno. Según anteriores datos, se asume una ocupación de aproximadamente 6 m² por cada kWp instalado en montaje a ras (sin trackers). Por lo tanto, como se señala la superficie requerida es de 10.233,3 m², es decir, 1,02 hectáreas. Según, DepurPrat, S.A. (2002), la planta ocupa una superficie de 41 ha, esto nos da una idea de que es probable que exista espacio suficiente en cubierta o en terrenos periféricos, los cuales sirvan para alojar esta cantidad de paneles.



Figura 9. Foto del área de la planta. Fuente: The New Barcelona Post (2022).

Para explorar sobre este escenario debemos acotar que se requiere un aprovechamiento apropiado de la disponible, esto puede lograrse posiblemente mediante la colocación de estructuras flotantes, cubiertas técnicas, pérgolas o en terrenos adyacentes. Del mismo modo, se recomienda una combinación con el almacenamiento energético y de esta forma maximizar el autoconsumo y evitar vertidos a red. También es necesaria una integración con el sistema de cogeneración de biogás, lo que permitiría alcanzar niveles cercanos a la autosuficiencia energética total.

Tabla 14. Resumen de viabilidad técnica energía Fotovoltaica

Parámetro	Valor estimado
Déficit energético (6%)	2.047.326\ kWh/año
Potencia FV requerida	1,706.10\ kWp
Paneles necesarios (550 Wp)	≈ 3,101 unidades
Superficie requerida	≈ 10.233,3 m ² (≈ 1,02 hectáreas)

Producción por panel/año	≈ 660 kWh
---------------------------------	------------------

De acuerdo con los cálculos anteriores, para cubrir un déficit energético anual del 6%, unos 2.047.326 kWh/año en la EDAR Prat Llobregat a través de la implementación de la energía solar fotovoltaica, se requiere la instalación de más de 3 mil paneles solares que garantizarían unos 660 kWh al año. Este incremento mediante la instalación de una energía externa contribuye a reducir el déficit una vez que se invierta en los principales procesos del funcionamiento de la planta. Además, este nuevo dimensionamiento permite una planificación eficiente de la instalación de la energía fotovoltaica, la cual esté adaptada al recurso solar local y a los distintos criterios técnicos de separación y mantenimiento.

5.4 Viabilidad técnica de la energía minieólica

La incorporación de la energía minieólica en una estrategia de gran relevancia para cubrir el déficit energético de la EDAR Prat Llobregat. Además de relevante, también es una opción aplicable, especialmente para complementar otras fuentes de energía renovable y así avanzar hacia la autosuficiencia energética. Para realizar estos cálculos estamos considerando que la energía minieólica pueda cubrir aproximadamente un **2 % del consumo total** de la EDAR de acuerdo a los datos planteados, contribuyendo en la reducción de la dependencia de la red eléctrica convencional y complementando la generación de biogás.

En el caso de la energía minieólica, esta depende de que las condiciones de viento sean siempre óptimas, es decir, la irregularidad y baja intensidad promedio del viento en algunas zonas podrían afectar su aplicabilidad. No obstante, en la planta en cuestión, el recurso eólico es un hecho y puede ser aprovechado mediante sistemas minieólicos. El delta del Llobregat, donde se hallan las instalaciones de la planta, al sur de Cataluña, es una zona costera y llana donde se ha confirmado una fuerte influencia urbana y marítima, y, como lo demuestran estudios pertinentes, se reconoce un potencial eólico moderado, lo cual es útil a pequeña escala.

a) Potencial eólico local

En años anteriores, el potencial eólico de Cataluña ha sido evaluado mediante un mapa de recurso eólico. Dicho mapa proporciona datos exactos sobre la dirección y velocidad media del viento en la región. El mencionado estudio se realizó con una resolución horizontal de 500 metros y abarca un periodo de veinte años, desde 1996 hasta 2015. (Puig & Ferrer, 2016). De igual manera, obtuvimos datos generales del *Atlas eólico de España* del IDAE (2011), fuentes que nos transmiten velocidades medias en la zona específicas del delta del Llobregat, donde se ubica la EDAR Prat Llobregat.

De acuerdo con el estudio, en existen tres emplazamientos de interés eólico, con observaciones a 80 m y velocidades medias cercanas a 6 m/s. (Puig & Ferrer, 2016). Estos emplazamientos se hallan a una distancia de entre 48 Km y 60 Km de la planta y poseen altitudes moderadas, además, están más expuestas a corrientes del interior. El delta del Llobregat, por su parte, es una zona costera y llana, con fuerte influencia urbana y marítima. (Aymamí, *et al.*, 2011) Aunque estas zonas están

alejadas de la planta, nos permiten hacer una evaluación de cuál sería la media en el delta de Llobregat.

Tabla 15 – Comparación de velocidad del viento entre zonas de mayor potencial y delta del Llobregat

Región	Distancia al Llobregat	Altitud aproximada	Velocidad media estimada	Observaciones
Pujalt / Alta Anoia	48–53 km	650–750 m	~6 m/s	Zona interior, más expuesta
Turó del Magre	~60 km	~800 m	~6 m/s	Elevación favorable
Delta del Llobregat	0–10 km	~0–50 m	~4.5–5.5 m/s (estimado)	Influencia marítima y urbana

De acuerdo a los datos, y basándonos en la distancia, altitud y características del terreno, el potencial eólico en la zona sur del río Llobregat podría estar en el rango de: 4.5 a 5.5 m/s de velocidad media anual a 10 m de altura, situándolo en un rango moderado, que es útil para aplicaciones como:

- Aerogeneradores de pequeña escala
- Estudios de microgeneración urbana
- Evaluaciones para parques eólicos costeros si se usan torres más altas.

b) Cálculo de producción estimada

Para realizar este cálculo vamos a tomar como referencia los aerogeneradores de eje vertical de 100 kW, cuya capacidad (CF) es del 25%, con una velocidad media de 5 m/s y de funcionamiento continuo puede generar:

$$\text{Producción anual (kWh)} = \text{Potencia nominal (kW)} \times \text{Horas/año} \times \text{CF}$$

$$100 \text{ kW} \times 8.760 \text{ h/año} \times 0,25 = 219.000 \text{ kWh/año}$$

En resumen, cada aerogenerador de eje vertical de 100 kW podría producir aproximadamente **219.000 kWh/año**

5.4.1 Número de aerogeneradores necesarios

De acuerdo con los datos de la tabla 9, la demanda anual que se desea cubrir por energía eólica es de 682.442 kWh/año, que basada en los datos del balance y distribuciones del mix energético, entonces podemos cuantificar la potencia instalada.

Si suponemos que se estima instalar varias turbinas de 100 kW cada una en promedio, y considerando las velocidades y eficiencia, para cubrir parte del consumo, procedemos al siguiente:

$$N. de aerogeneradores = \frac{Demanda energética a cubrir (kWh/año)}{Producción anual por aerogenerador (kWh/año)}$$

$$N. de aerogeneradores = \frac{682.442 kWh/año}{219.000 kWh/año/unidad} \approx 3,12$$

Del cálculo obtenemos el siguiente resultado: en velocidades de viento de 5 m/s, cada turbina de aproximadamente **100 kW** puede generar 21.900 kWh/año en esa velocidad. Es decir, para cubrir aproximadamente **876.000 kWh/año** al año en las condiciones supuestas, serían necesarias unas **4 turbinas de 100 kW cada una**, siempre tomando en cuenta un factor de disponibilidad del 25%.

Para avanzar hacia la viabilidad de esta implementación se recomienda una de medición eólica de al menos 6 meses, lo cual permita validar el potencial real. Del mismo modo, se evalúa que los aerogeneradores deben ubicarse en zonas libres de turbulencias, de preferencia en estructuras elevadas o torres independientes.

Esta tecnología es eficiente y se encuentra probada en distintos escenarios, además se halla en constante evolución. Para incorporar esta energía es posible instalar aerogeneradores de eje vertical, que son los más apropiados porque estos no requieren sistemas de orientación, además, su propia instalación y posterior mantenimiento son más sencillos que otros, puesto que se hallan a ras del suelo. También se pueden encontrar aerogeneradores, además de eficientes, pequeños y de mejor atractivo visual y paisajístico. (Soriano, 2017)

En cuanto a la magnitud del proyecto debemos estimar cuál es la superficie que ocuparía la instalación de equipos para generar energía eólica. Suponiendo que se necesitan instalar 4 aerogeneradores de 100 kW, y que cada uno tiene un diámetro de rotor de mínimo de 5 m, tenemos lo siguiente:

- Área de seguridad por unidad

$$\approx (5 + 10)^2 = 2.500 m^2$$

- Superficie total estimada

$$4 \times 2.500 = 10.000 m^2 = 1 \text{ hectárea}$$

Para reducir la superficie estimada es la Instalación en techos o estructuras elevadas, que representa un modelo apropiado para la EDARs Prat de Llobregat que cuenta con diferentes superficies de edificios industriales. También es recomendable colocar aerogeneradores de eje vertical (VAWT), los cuales tienen una menor área de barrido, por lo tanto, son aptos para entornos urbanos o compactos. Por último, una alternativa

también implica la agrupación modular, un modelo que permite compartir torres o bases, lo que reduciendo además la típica huella horizontal.

5.5 Principales resultados de este análisis

Hasta el momento hemos calculado la viabilidad de la optimización del biogás para aumentar su producción a través de la cogeneración, también la incorporación de energías renovables como la solar fotovoltaica y minieólica, lo cual nos ha llevado a la obtención de los resultados propuestos en el mix de energía. En total, el incremento conseguido a partir del biogás estaría representado por **5.026.050 kWh/año** y nos redondea una producción de biogás total de **18.231.707 kWh/año** (luego de sumar la producción actual de **13.205.657 kWh/año**). Por su parte, las dos energías adicionales apenas lograron alcanzar la siguiente producción: **FV= 2,047,326 kWh/año, ME= 682,442 kWh/año**. Por lo tanto, la suma total de la producción energética renovable sería de **20.961.475 kWh/año**. Es decir, dados estos resultados, el déficit se reduciría en un 61%.

Por otra parte, los cálculos anteriores nos permiten identificar que se agregan unos 2,550 m³/día a los 20.146 Nm³/día de biogás ya producidos, por lo tanto, tras el supuesto estaríamos obteniendo 22.696 m³/día como producto de la producción actual más codigestión. Este resultado es coherente con la producción en EDARs con caudal superior a 300.000 m³/día.

Por otro lado, dados los cálculos anteriores podemos concluir en que en relación a la cobertura total del consumo energético de la EDAR Prat del Llobregat, tras potencial incorporación de energías renovables calculadas anteriormente, sería de aproximadamente **44,4%**, es decir, la cobertura energética alcanzada como producto de implementar todas las tecnologías propuestas (biogás+cogeneración, solar fotovoltaica y minieólica). Al respecto señalamos los siguientes datos:

$$Cobertura\ total = \frac{20.961.475\ kWh/año}{47.327.754 kWh/año} \times 100 \approx 44,4\%$$

Tabla 16. Cobertura del consumo total mediante cada fuente renovable

Fuente renovable	Producción (kWh/año)	% del consumo total
Biogás + cogeneración	18.231.707	38%
Solar fotovoltaica	2,047,326	4,3%
Minieólica	682,442	1,4%
Total renovable	20.961.475	44,2%

Como podemos ver, estos resultados demuestran que un avance aceptable hacia la meta de autoconsumo y sostenibilidad que nos hemos propuesto. En definitiva, este porcentaje de reducción del déficit y, por ende, de aporte al consumo total de energía de la planta, es una validación estratégica de que la EDAR del Prat Llobregat está en condiciones de avanzar hacia un modelo de autosuficiencia energética sostenible, que además es escalable y replicable.

6. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE AHORRO ENERGÉTICO, ECONÓMICO Y AMBIENTAL

Una vez determinado el potencial de generación de energías renovables, y su relevancia para avanzar hacia la autosuficiencia, en adelante nos centraremos en la estimación del ahorro ambiental y económico derivado de dicho ahorro energético. Los beneficios económicos y ambientales asociados a la incorporación de energías limpias se calcularán a partir de los datos encontrados en apartados anteriores, especialmente orientados a la EDAR Prat Llobregat. Estos cálculos buscan evaluar la viabilidad de estas incorporaciones descritas anteriormente.

Como hemos mencionado en apartados anteriores, una potencial implantación de energías renovables en las instalaciones de la EDAR Prat Llobregat podría representar un gran avance en el ahorro y consumo optimizado de energía eléctrica. Por lo tanto, el análisis del ahorro económico y ambiental resulta esencial para evaluar su viabilidad y beneficios. Por medio de este cálculo vamos a determinar cuánto dinero se puede ahorrar en costos energéticos a través de la sustitución de parte del consumo convencional por energía renovable. De igual manera, cuantificaremos la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

El déficit energético para 2022 según el balance energético de la EDAR, es de **34.122.097 kWh/año**. En este sentido, la cobertura propuesta por energías renovables después de los cálculos es de:

Tabla 17. Cobertura del déficit por energías renovables

Fuente	Producción estimada (kWh/año)	% del déficit cubierto
Biogás + cogeneración	18.231.707	53,42%
Fotovoltaica	2.047.326	6%
Minieólica	682.442	2%
Total energías renovables	20.961.475	61,45%

6.1 Estimación de ahorro económico

Los datos anteriores representarían la reducción del consumo externo en más de 2/3. Por otro lado, para calcular el ahorro económico necesitamos saber el costo de la

electricidad, que es la energía convencional utilizada. Como este dato puede variar, vamos a utilizar el valor habitual de tarifa eléctrica, de acuerdo con los datos de IDAE y Eurostat (2025), el precio medio de la electricidad industrial en España es de aproximadamente 0,12 €/kWh. Por lo tanto, el ahorro anual se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ahorro} = \text{Energía generada} \times \text{costo de la electricidad convencional}$$

$$\text{Ahorro} = 24,567,909 \text{ kWh} \times 0,12 \text{ €/kWh} = \mathbf{2,539,918 \text{ € / año}}$$

Como podemos ver, un ahorro económico anual de aproximadamente **2,539,918 €** en electricidad resulta de gran importancia para los objetivos de este trabajo. En tal sentido, reducir los costos de electricidad en una cantidad tan significativa mejora sin dudas de manera directa la viabilidad financiera de la planta. Al respecto, un ahorro tan considerable contribuye a la liberación de recursos financieros que podrían volver a invertirse en la optimización de los procesos de la planta, así como en el mantenimiento de los equipos o quizá en la expansión de las propias instalaciones de energía renovable, lo cual representaría una generación total de su consumo energético interno.

Tabla 18. Inversión estimada

Tecnología	Potencia Instalada	Coste por potencia instalada	Coste estimado
Fotovoltaica	1,706.10 kWp	850 -1.100€	1.450.000 – 1.875.000 €
Minieólica	219.000 WP	40.000 – 60.000 € (valor aprox. de 4 turbinas)	160.000 – 240.000 €

Los resultados de la tabla 12 se basan en precios promedio en España y Europa, según Benchmarking Internacional. En este particular, se estima un ahorro anual cercano a los 3 millones de euros, calculando un retorno de inversión estimado para menos de una década, y garantiza la obtención de beneficios netos durante más de 15 años. Al respecto se estima una inversión en tecnología Fotovoltaica de entre 800 y 1.200 €/kWp (IDAE, citado en AQUALITRANS, 2017), en el caso de la tecnología Minieólica el coste por **por kW instalado** podría estar entre 2.000 y 3.000 €/kW (IRENA, WindEurope).

6.2 Estimación de ahorro ambiental

Se conoce que la generación de electricidad en centrales convencionales produce emisiones de gases de efecto invernadero, donde predomina el CO₂. De acuerdo con los datos de la Generalitat de Catalunya las emisiones de GEI en la región catalana para el año 2023 fueron de 38,36 millones de toneladas de CO₂ equivalente. Según las investigaciones de Urrea, Seguí y Guerrero (2025), se analizó las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la planta de tratamiento de aguas residuales El

Prat Llobregat donde se encontró que las emisiones totales de GEI para 2022 fueron de 8,933.25 tCO₂ eq. En cuanto a las emisiones directas de CH₄, N₂O y CO₂ a partir de la línea de agua y lodos fueron de unas 3,432 tCO₂ eq. Por lo tanto, la mayor contribución a las emisiones indirectas en realidad provino del consumo de energía, lo cual llegó a generar 3,459.11 tCO₂/eq y, por su parte, la quema de biogás produjo 578.39 tCO₂eq.

La incorporación de energías renovable en la EDAR Prat Llobregat representa una estrategia eficaz en el objetivo de alcanzar una correcta disminución de la huella ambiental de la planta. Para realizar este cálculo, en lugar de usar el promedio nacional (≈0,231 kg CO₂/kWh), vamos utilizar el dato específico de la EDAR que señalan las investigaciones de Urrea, Seguí y Guerrero (2025):

- **Emisiones totales EDAR 2022:** 8.933,25 tCO₂ eq
- **Consumo energético total estimado:** 47,327,754 kWh/año (*según balance energético tabla 3*)
- **Factor de emisión específico de la EDAR:**

$$\text{Factor de emisión} = \frac{8.933,25 \text{ tCO}_2}{47,327,754 \text{ kWh}} = 0,0001887 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$$

Este cálculo nos indica que se genera 0,1887 gramos de CO₂ por kWh generado. Por consiguiente, estimaremos la reducción de emisiones por generación renovable de la siguiente manera:

$$\text{Reducción de emisiones} = \text{total generado por energías renovables (kWh)} \times \text{factor de emisión EDAR (kWh)}$$

$$20.961.475 \text{ kWh} \times 0,0001887 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} = 3.951,58 \text{ kg CO}_2/\text{año}$$

$$\text{Toneladas} \approx 4 \text{ tCO}_2/\text{año evitadas}$$

Tomando en cuenta estos resultados, podemos acotar que se demuestra un ahorro ambiental significativo y proporcional al ahorro energético modelado. Este dato se presenta como una validación cruzada entre energía y emisiones, que refuerza y confirma el propósito de este trabajo y la coherencia del modelo.

Los cálculos anteriores nos ponen en evidencia el potencial ahorro energético, económico y ambiental que se puede lograr mediante la implementación de tres fuentes de energía renovables en la EDAR Prat Llobregat descritas hasta el momento. Estos resultados, basados en cálculos y estimaciones específicas para cada tipo de energía, así como las condiciones de la planta, tienen como propósito ilustrar la viabilidad y los beneficios tangibles de una integración de estas tecnologías limpias para cumplir con los objetivos de este trabajo, y que conducen hacia la autosuficiencia energética y la reducción del impacto ambiental de la EDAR. En el siguiente cuadro se exponen datos clave para la comprensión de este apartado.

Tabla 19. Resumen de Ahorro energético, económico y ambiental

Indicador	Valor	Unidad / Observación
Emisiones GEI totales EDAR (2022)	8.933,25	tCO ₂ eq
Consumo energético total EDAR	47,327,754	kWh/año
Producción renovable estimada	20.961.475	kWh/año (Biogás +FV + minieólica)
Factor de emisión específico EDAR	0,0001887	kg CO ₂ /kWh
Emisiones evitadas por renovables	3.951,58	tCO ₂ eq/año
Reducción relativa de emisiones	55.26%	Porcentaje respecto a emisiones totales
Costo energético promedio (estimado)	0,12	€/kWh (valor de referencia para España)
Ahorro económico anual estimado	2,539,918 €	€ (21,165,983 kWh × 0,12 €/kWh)

6.3 Contribución de la Energía Renovable a los Procesos Críticos de la EDAR

De acuerdo con los resultados obtenidos acerca de nuestra propuesta para optimizar los procesos de la EDAR del Prat Llobregat mediante la integración de fuentes renovables como el biogás, la energía solar fotovoltaica y la energía minieólica, demuestran que, además de mejorar la perspectiva de sostenibilidad ambiental de la planta, también hace posible que una parte significativa de la demanda energética de los procesos más intensivos de la planta sea cubierta de manera eficiente y acertada. En tal sentido, presentamos un resumen de los aportes que podrían reflejar en diferentes procesos típicos del funcionamiento de la planta:

- **Biogás generado por digestión anaerobia** y elevado por medio del proceso de cogeneración sugerido, contribuye directamente al suministro energético de dispositivos tales como:
 - **Soplantes de aireación** en el tratamiento biológico, equipos que consumen hasta el 50% del consumo total. Se recomienda asignar entre 35 % y 40% de las energías renovables biogás + fotovoltaica

- **Calentamiento de digestores**, se logra mediante la recuperación térmica. Para ellos se puede contribuir entre el 8% y 10% producida por Biogás como producto de la recuperación térmica.
- **Motores de cogeneración**, estos producen electricidad y calor útil en los procesos internos regulares.
- La **Energía solar fotovoltaica** sirve para apoyar el funcionamiento de:
 - **Sistemas de bombeo** en líneas de agua y fangos. Para este sistema se le puede asignar entre el 15% y 20% de la producción Fotovoltaica + Biogás
 - **Equipos de deshidratación de lodos** (centrífugas y filtros prensa). Podría asignarse de 10% a 12% de la energía fotovoltaica.
 - **Sistemas de automatización y control**, especialmente útil en horas pico de radiación. Se asignaría un 5% de la Fotovoltaica + Minieólica.
- **Minieólica**, pese a que representa un menor aporte, esta energía puede ser útil para:
 - **Iluminación perimetral y de seguridad**. Podría operar con un 3% a 5% de la energía Minieólica + fotovoltaica
 - **Sistemas auxiliares** en las zonas más alejadas de la planta.

Como podemos ver, esta combinación energética contribuye de manera significativa a reducir la dependencia de la red eléctrica convencional, al tiempo que fortalece la resiliencia operativa y se encamina hacia la autosuficiencia energética, especialmente porque la integración de estas fuentes de energía alternativa viene a reforzar los aspectos más demandantes en cuanto a consumo de energía dentro de la planta. Al respecto, cuando se destina la energía renovable a procesos críticos, se logra maximizar el impacto técnico y económico que su implementación genera, consiguiendo una acertada alineación con las mejores prácticas internacionales en materia de eficiencia energética para EDARs.

7. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON OTROS ESTUDIOS O REFERENCIAS SIMILARES

Tras la evaluación de la autosuficiencia energética en la EDAR del Prat Llobregat, a través de la integración de biogás, energía solar fotovoltaica y minieólica, podemos permitirnos confirmar que resultados se alinean con las tendencias observadas en otras EDARS, cuyo ejemplo hemos compartido en apartados anteriores. Dicha tendencia se ha observado a nivel internacional y también nacional. Por tal motivo, en este apartado vamos a presentar una comparación donde se muestran estudios y casos de referencia que fundamentan nuestra propuesta:

a) Relación de Cobertura Energética

De acuerdo con los datos observados, y la propuesta energética mediante tecnologías alternativas ubicaría a la EDAR del Prat Llobregat en una posición intermedia en cuanto a la búsqueda del máximo autoconsumo. Si bien a través de estas novedosas incorporaciones tecnológicas y procesos destacados no alcanza aún la autosuficiencia total como es el caso de Sant Feliu o Ischia, es conveniente resaltar que la estrategia de mix energético y cogeneración podrían situarla por encima de instalaciones que hasta el momento solo han incorporado una fuente renovable.

Tabla 20. Comparativa de Ahorro energético

Planta / Estudio	Fuente Renovable Principal	Cobertura Energética (%)	Observaciones Relevantes
EDAR Prat Llobregat (este estudio)	Biogás + FV + Minieólica	44%	Codigestión + FV estimada en 1,7 MWp
EDAR Sant Feliu (AQUALITRANS, 2017)	Biogás (codigestión) + regeneración de agua	100%	Produce de 13.160 kWh/día
EDAR Nerja (Zacchei & Colacicco, 2022)	Fotovoltaica	20%	100 kWp instalada, ahorro de 60 tCO ₂ /año
EDAR del Freixo (Portugal) (AQUALITRANS, 2017)	Fotovoltaica	15%	450 kWp, producción estimada anual de 618.339 kWh
EDAR de Murcia Este (AQUALITRANS, 2017)	Fotovoltaica	15%	520 kWp, producción 5.700 MWh/año
EDAR Torremayor (AQUALITRANS, 2017)	Fotovoltaica	15%	11,96 kWp instalada en cubierta. Genera 18.861 kWh al año.
EDAR Centralna (Tomczyk et al., 2023)	Microhidráulica	12%	Instalación de turbina Francis de 55 kW, 150 MWh/año
EDAR Ischia (Di Fraia et al., 2019)	Geotérmica + ORC	100%	Reducción del 73% en lodos, vende el excedente

La comparación de la cobertura energética entre distintas EDARs en este estudio deja ver una variedad de funciones y tecnologías implementadas que revelan el enfoque estratégico adoptado en cada planta. Por ejemplo, plantas como Sant Feliu o Ischia estarían alcanzando la autosuficiencia energética por medio de procesos como la cogeneración y el aprovechamiento geotérmico, no obstante, otras como Nerja o Torremayor consiguen coberturas parciales mediante la instalación de sistemas fotovoltaicos de menor escala. Por tal motivo, al analizar la estrategia planteada para la EDAR del Prat Llobregat donde se ofrece una cobertura del 44% gracias a la

combinación de biogás, energía solar y minieólica, resulta gratificante reconocer una ubicación intermedia, que podría elevarla por encima de instalaciones monofocales, poniendo en evidencia el potencial del mix renovable propuesto para avanzar la autosuficiencia.

b) Relación del ahorro ambiental

Luego de la implementación de las energías renovables, hemos calculado un ahorro de unas 4 tCO₂/año en la EDAR Prat Llobregat, lo cual representa una reducción de más del 55% respecto a sus emisiones totales. Podemos observar que dicho valor es coherente con otros resultados obtenidos en diversas plantas similares, por ejemplo:

- En Nerja, se reporta una significativa reducción de 60 tCO₂/año esto con solo un 20% de cobertura energética.
- En Ischia, por su parte, la integración geotérmica contribuyó a evitar más de 600 tCO₂/año.

De manera que, los datos anteriores sugieren que el impacto ambiental de la EDAR Prat Llobregat si se optimiza el aprovechamiento del biogás excedente y se amplía la capacidad fotovoltaica podría incrementarse significativamente.

c) Comparativa de Ahorro Económico

El ahorro económico es un aspecto evidente cuando se integran estas tecnologías limpias, por ejemplo, se estima ahorrar anualmente unos 2,5 millones de euros en la EDAR Prat Llobregat, lo que podemos comparar directamente con otros estudios de referencia tales como:

- En Atlantic City (EPA, 2013), se conoció que el uso de energía eólica permitió ahorrar \$350.000 USD/año unos 320.000 €.
- En Ischia, el retorno de inversión logró ubicarse en 5 años, con un VAN de 1,459 k/€.

Por todo esto, la EDAR Prat Llobregat podría destacar como un caso de éxito de implementarse la integración de energías renovables, elevando su rentabilidad potencial, especialmente considerando la escala de la planta y su capacidad anual de tratamiento.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La obtención de los resultados de este estudio nos permite evaluar con mayor acierto el potencial de autosuficiencia energética de la EDAR El Prat de Llobregat a través de la oportuna integración de tecnologías renovables. De manera que, a partir del análisis del consumo energético, logramos identificar un déficit anual en la planta, para el año 2022, de **34.122.097 kWh**, lo cual estaría representando aproximadamente el 72% del consumo total de la EDAR. Dicho déficit se estaba cubriendo en ese entonces mediante energía adquirida de la red eléctrica nacional, lo cual es indicativo de elevados costes de operación y, además, de una significativa huella de carbono.

En este sentido, nuestra propuesta de integración de energías renovables se estructuró en tres ejes principales que son:

- Optimización del biogás mediante codigestión y cogeneración.
- Incorporación de energía solar fotovoltaica
- Implementación de energía minieólica.

Para ello, hemos adoptado el modelo de mix energético donde proponemos calcular una producción renovable total de **20.961.475 kWh/año**, lo que vendría a representar una cobertura del 61% del déficit energético y una reducción del 44,4% del consumo total. Este resultado nos permite situar a la EDAR en estudio dentro de una posición intermedia entre las plantas que han alcanzado la autosuficiencia, tales como Sant Feliu o Ischia, mencionadas anteriormente, entre aquellas que han implementado soluciones parciales.

Por otro lado, desde el punto de vista económico, se estima un ahorro anual de 2.539.918 €, valor que representa una mejora significativa en la eficiencia operativa de la planta. Además, este ahorro permitiría amortizar la inversión en tecnologías renovables, que sería posible en menos de una década, considerando los costes actuales de instalación y operación.

Por su parte, el impacto ambiental también se ve afectado en este estudio. Se calcula una reducción de 3.951,58 tCO₂/año, lo cual es equivalente al 55,26% de las emisiones totales de la planta. Como podemos ver, este dato refuerza el valor estratégico de la propuesta, la cual se alinea con los objetivos de descarbonización y sostenibilidad establecidos por la Unión Europea y el PNIEC.

Igualmente, hemos podido demostrar que la energía renovable puede ser asignada de forma inteligente a los procesos más críticos de la EDAR tales como:

- El Biogás producido podría invertirse en procesos de aireación, calentamiento de digestores y cogeneración.
- La Energía Fotovoltaica sería de provecho en el bombeo, la automatización y la deshidratación de lodos.
- La Energía Minieólica, es apropiada para la iluminación perimetral y sistemas auxiliares.

Finalmente, tras comparar estos resultados con estudios similares, hemos logrado confirmar la viabilidad técnica y económica de la propuesta. Por lo tanto, La EDAR del Prat de Llobregat podría convertirse en un referente regional de eficiencia energética y de sostenibilidad, todo esto posible tras la optimización del aprovechamiento del biogás excedente y la ampliación de la capacidad fotovoltaica.

9. CONCLUSIONES

Como hemos visto hasta ahora, el estudio demuestra que la EDAR El Prat de Llobregat, se halla adquiriendo de la red eléctrica más del 70% de su consumo anual, es decir, unos 47,3 GWh, este factor representa una considerable pérdida económica y un alto impacto ambiental por causa las emisiones de carbono. En tal sentido, es déficit energético de 34,1 GWh que actualmente presenta es la razón de nuestra propuesta. La integración de energías renovables se proyecta como una solución viable para avanzar hacia la eficiencia energética. Por ejemplo, con el aumento de la producción de biogás a través de la codigestión que genere unos 5 GWh/año; la instalación de 1,706 MWp fotovoltaicos capaces de producir 2,05 GWh/año y la instalación de cuatro aerogeneradores de 100 kW que se espera contribuyan con 0,68 GWh/año; la planta estaría en capacidad de generar 20,96 GWh al año, a través de tecnologías limpias que cubrirían el 61 % del déficit y el 44 % del consumo total. Del mismo modo, esta medida se traduce en un ahorro de 2,54 M € anuales en energía eléctrica y una reducción de emisiones de 3.95 kt CO₂ al año.

De manera que, los datos mencionados son el resultado de una serie de aportes que se describen en este TFM, de los cuales, destacamos los siguientes:

- Diseño de un mix renovable que es escalable y adaptado al contexto real de la EDAR, donde se combinan biogás, energía solar y energía minieólica.
- Cuantificación detallada de un potencial ahorro energético, económico y ambiental. Para expresarlo se describen cálculos de capacidad instalada, producción anual y costes.
- Metodología de análisis replicable en otras EDARs, lo cual incluye identificación de puntos críticos de consumo, así como el modelado de escenarios y estudio de viabilidad técnica y económica.

Entre las sugerencias para trabajos relacionados en el futuro, subrayamos los siguientes:

- Realizar campañas de medición de recursos naturales necesarios para poner en práctica los supuestos de este trabajo, tales como viento, radiación, disposición de materia orgánica y optimización de la infraestructura y equipos de la planta, además, validar in situ los rendimientos a largo plazo.
- Explorar la posible incorporación de otras fuentes renovables, por ejemplo, la mini-hidráulica, la geotermia y la energía azul, así como los sistemas de almacenamiento eléctrico o térmico.
- Desarrollar un análisis de ciclo de vida (LCA), el cual incluya emisiones de fabricación, de instalación y mantenimiento de equipos.
- Realizar una evaluación de estrategias de control inteligente y optimización en tiempo real, con el fin de maximizar el autoconsumo y el rendimiento de los motores de cogeneración.
- Adaptar el modelo económico a diversos flujos de precios variables de energía y algunas subvenciones. También conviene hacer un estudio que permita establecer cuan replicabilidad es este modelo en EDARs de distinta escala o ubicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abad Castelos, M. (2017). *La cuenca del Mar Negro y la energía azul: oportunidades y desafíos para la estrategia de la UE*. Revista General de Derecho Europeo, (41), 15-37. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/10016/34984>
2. Aguiló P.; Martínez, T.; Curto, J. (2013). Optimización del consumo energético en reactores biológicos de fangos activos. Caso de la EDAR Baix Llobregat. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4453865>
3. Aguiló Martos, P. (2018). *Producción y utilización del gas combustible de digestión. XXXVI Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras*. Tomo III. CEDEX. Madrid, 2018.
Aigües de Barcelona. (2021). *Memoria de explotación 2021*. Aigües de Barcelona, Empresa Metropolitana de Gestió del Cicle Integral de l'Aigua, S.A. Recuperado de: www.aiguesdebarcelona.cat
4. Angulo Capel, A. (2020). *Sistema de microdepuración alimentado por energías renovables*. Repositorio UCPT. Trabajo fin de grado. Grado en ingeniería eléctrica. Recuperado de: <https://repositorio.upct.es/entities/publication/7e742ebb-261a-4e6b-9dcf-927b862542b2>
5. Albaladejo Ruiz, A. & Albadalejo Falcó, A. (2016). *Parametrización del consumo energético de las depuradoras de aguas residuales (levante español)*. Dyna Vol. 91 nº1, Enero Febrero 2016, 82-87.
6. Almazán Lope, J. (2014). *Análisis de la mejora de la eficiencia energética de los procesos de una EDAR*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/47433>.
7. AQUALITRANS. (2017). *Guía de soluciones tecnológicas para la eficiencia de las EDAR* (Versión 4). Proyecto AQUALITRANS. http://blogs.xunta.gal/aqualitrans/wp-content/uploads/sites/14/2018/06/Actividade-1.3_final_ES.pdf
8. Área Metropolitana de Barcelona (AMB) (2024). *EDAR de El Prat de Llobregat*. <https://www.amb.cat/web/medi-ambient/aigua/instalacions-i-equipaments/detall/-/equipament/edar-del-prat-de-llobregat/276285/11818>
9. Área Metropolitana de Barcelona. (2010). *ACV de los tratamientos terciarios de la EDAR de El Prat para la reutilización del agua*. Àrea Metropolitana de Barcelona. Recuperado de: <https://share.google/1mXj9L76uPmZnRloP>
10. Arnold, M. E., & Merta, E. S. (2011). *Towards energy self-sufficiency in wastewater treatment by optimized sludge treatment*. Water Practice and Technology, 6(4), wpt20110069.
11. Arroyo, J. L., & Rodríguez-Izquierdo Serrano, E. (2011). *Hacia un "mix" energético sostenible*. Ambienta: la revista del Ministerio de Medio Ambiente, (96), 96-105.
12. Aymamí, J., García, A., Lacave, O., Lledó, L., Mayo, M. y Parés, S. (2011). *Análisis del recurso. Atlas eólico de España. Estudio Técnico PER*

- 2011-2020. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Recuperado de <http://www.idae.es>
13. Babiker, D., & Ciucci, M. (2025). *Fichas temáticas: La energía renovable. Parlamento Europeo*. Recuperado de: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/70/la-energia-renovable>
 14. Bodik, I., & Kubaska, M. (2013). *Energy and sustainability of operation of a wastewater treatment plant. Environment Protection Engineering*, 39(2), 15-24.
 15. Busti, N. D., Monteiro, D. da S., & Honnicke, M. G. (2014). *Energía azul: Proyecto y construcción de un prototipo para extraer energía eléctrica usando la diferencia de salinidad entre el agua del mar y el agua de los ríos*. En Anais do III Encontro de Iniciação Científica da Unila (pp. 1-2). Unila-PTI, Foz do Iguaçu, Estado do Paraná. Recuperado de: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/1042>
 16. Calaff, S., Aguirrezabal, I. L., Iturrate, E. A., Cabrejas, J. G., Conde, F. O., de la Sota, A., & del Casal, J. M. V. (2014). *Estimación del potencial de ahorro en los sistemas de aireación de las EDAR mediante la medición de la transferencia de oxígeno. Tecnoaqua*, (9), 64-72.
 17. Calise, F., Di Fraia, S., Macaluso, A., Massarotti, N., & Vanoli, L. (2018). *A geothermal energy system for wastewater sludge drying and electricity production in a small island. Energy*, 165, 1533–1547. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.062>
 18. Lazcano Carreño, C. (año). *Biotecnología ambiental de aguas y aguas residuales* (2ª ed.). Ecoe Ediciones. ISBN 978-958-771-344-2. Recuperado de: <http://www.ecoediciones.com/>
 19. Collado Alonso, S., Oulego Blanco, P. y Díaz Fernández, J.M. (2019) *Eficiencia Energética*. En Díaz Fernández, J. M. (coord.) Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas (pp. 547-555), Madrid : Ediciones Paraninfo
 20. Collazos, C. (2008). *Tratamiento de aguas residuales domesticas e industriales. Universidad Nacional de Colombia*. Bogotá, Colombia.
 21. Conesa Martínez, F. (2018). *Análisis técnico-económico de implementación de mejoras tecnológicas en una EDAR para la consecución de la autosuficiencia energética* (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
 22. DepurPrat, S.A. (2002, abril). *Sistema de saneamiento y depuración del Prat Llobregat*. Ambienta. Recuperado de <http://www.depurPrat.com>
 23. Di Fraia, S., Macaluso, A., Massarotti, N., & Vanoli, L. (2019). *Energy, exergy and economic analysis of a novel geothermal energy system for wastewater and sludge treatment. Energy Conversion and Management*, 196, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.035>
 24. Espejo Marín, C. (2004). *La energía eólica en España*. Investigaciones Geográficas, (35), 45-65. Instituto Universitario de Geografía, Universidad de Alicante
 25. Environmental Protection Agency. (2013). *Renewable Energy Fact Sheet: Wind Turbines*. EPA 832-F-13-017. Recuperado de:

- https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/wind_turbines_fact_sheet_p100il8k.pdf
26. European Commission. (2018). Best Available Techniques (BAT) *Reference Document for Waste Treatment*. JRC113018. Joint Research Centre. <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu>
 27. Fernández, B. O. (2019). *Energía hidráulica y energía mareomotriz*. Editorial Elearning, SL.
 28. Ferrer, J., Aguado, D., Barat, R., Serralta, J. y Lapuente, E. (2016). *Huella energética en el ciclo integral del agua en la Comunidad de Madrid*. Fundación Canal.
 29. Gandiglio, M., Lanzini, A., Soto, A., Leone, P., & Santarelli, M. (2017). *Enhancing the energy efficiency of wastewater treatment plants through co-digestion and fuel cell systems*. *Frontiers in Environmental Science*, 5(70). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00070>
 30. García, G. E., Ibáñez, G. M. P. & Mosquera, M. G. (2012). *Análisis crítico de la problemática y las soluciones adoptadas a nivel europeo en la gestión de las aguas pluviales en entornos urbanos. Posibles aplicaciones en España*. Máster en Gestión Fluvial Sostenible y Gestión Integrada de Aguas Universidad de Zaragoza.
 31. García, I. M. (2006). *Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población: Mejora de la calidad de los efluentes*. Instituto Tecnológico de Canarias.
 32. Garriga Castillo, J. A. (2020). *Procesado de potencia y arquitecturas eléctricas adaptadas para aplicaciones de harvesting en baja tensión*. Universitat Rovira i Virgili. Tesis doctoral dirigida por Hugo Valderrama Blavi. Recuperado de: <https://www.tdx.cat/handle/10803/669971>
 33. González González, M. G. (2012). *Ahorro y eficiencia energética en estaciones depuradoras de aguas residuales*.
 34. González, M. (2021). *Análisis técnico-económico de la codigestión de residuos agroindustriales en EDARs* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Cataluña]. Repositorio UPC.
 35. González, P.; Batalla, M. (2023). *Conoce cómo se produce agua regenerada en una EDAR operada por Aigües de Barcelona para combatir la sequía en Catalunya*. Disponible: <https://www.catalunyapress.es/articulo/la-energia-se-transforma/2023-02-04/4160782-conoce-como-produce-agua-regenerada-edar-operada-aigues-barcelona-combatir-sequia-catalunya>
 36. Green, M. A., Hishikawa, Y., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., & Ho-Baillie, A. W. Y. (2020). *Solar cell efficiency tables (Version 56)*. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28(7), 629–638.
 37. Greentech (2024). ¿Qué es la energía mareomotriz? https://www.greentecher.com/blog-energia-mareomotriz/?srltid=AfmBOoqKzWb1zF6bIFhtvWomthed-bS3mpa6B_9JhTMiUqnFqyBFHeZ-&v=eabb18f0a40c
 38. Hardy, L; Garrido, A. & Juana, L. (2012). *Evaluation of Spain's Water-Energy Nexus*. *International Journal of Water Resources Development*, 28(1), Special

Issue: Water Policy and Management in Spain. Taylor & Francis, Leiden, the Netherlands.

39. Hau, E. (2013). *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27151-9>
40. Henriques, J., & Catarino, J. (2017). Sustainable value—An energy efficiency indicator in wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, 142, 323-330.
41. Ibañez Astaburuaga, A. (2016). *Energías renovables en el sistema marítimo portuario: aprovechamiento energético de los molinos de marea* (Doctoral dissertation, Caminos).
42. IDAE (2010). *Estudio de prospectiva. Consumo energético en el sector del agua*. Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE).
43. Instituto para la Diversidad y Ahorro de la Energía (2011) *Plan de Energías Renovables 2011-2020*. Madrid. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/spa214856.pdf>
44. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2006. *Minicentrales hidroeléctricas*
45. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (2024). *Programa Energías Renovables Innovadoras*. Recuperado de: <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/programa-energias-renovables-innovadoras>
46. IDRICA (2024). *Tendencias del agua en aguas residuales para 2024: digitalización de las EDAR*. Recuperado de: <https://www.idrica.com/es/blog/tendencias-del-agua-edar/>
47. Asociación Solar de la Industria Térmica (ASIT); Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (2020). *Guía sobre sistemas de energía solar térmica*. Recuperado de: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/guiasolartermica_idae-asit_v3.0_20210111_nipo.pdf
48. Kneppers, B., Birchfield, D., & Lawton, M. (2009). *Energy-water relationships in reticulated water infrastructure systems*. *Water Supply (kWh/Capita)*, 76(20.86), 75-15.
49. Kurt, M.; Aksoy, A. & Dilek, F. (2015). *Evaluation of solar sludge drying alternatives by costs and area requirements*. *Water Research* Volume 82, 1 October 2015, Pages 47-57 Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.043>
50. López, J. A., & Martínez, R. M. (2020). *Energía solar fotovoltaica: Fundamentos, tecnología y aplicaciones*. Editorial Energía Verde.
51. Martínez-Medina, M. À., Pérez-Martín, M. Á., & Estrela, T. (2024). *Desalination in Spain and the Role of Solar Photovoltaic Energy*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(6), 859. <https://doi.org/10.3390/jmse12060859>
52. Martínez Aneiros, R. (2018). *Estudio de las olas y su aprovechamiento en energía undimotriz*. Trabajo de Fin de Grado, EPSI, Sección de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval, Universidad de Cádiz. Tutor: A. C. Bermejo Díaz.

53. Cerdá Jaén, I. I. (2019). *Consumo de energía para la depuración de agua en España*. Trabajo Fin de Máster, Máster Universitario en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos, Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares.
54. Mendoza Zapata, L. (2022) *Análisis y estimación de los potenciales beneficios ambientales y económicos del acople de energía de gradiente salino con desalinización de agua de mar*. Proyecto de grado para optar por el título de Magíster en Ingeniería Ambiental. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Barranquilla – Atlántico. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10584/10829>
55. Ministerio de Industria, Ingeniería y Turismo (2011). La energía en España. SAFEKAT, S. L.
56. Ministerio de Energía de Chile, 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. <https://www.fao.org>
57. Ministerio de Medio Ambiente. (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*. Agencia Estatal de Evaluación de Tecnologías Ambientales (A2007_0d62926d). <https://www.miteco.gob.es>
58. Ministerio de Energía de Chile, 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. <https://www.fao.org>
59. Molinos-Senante, M., Sala-Garrido, R., & Iftimi, A. (2018). *Energy intensity modeling for wastewater treatment technologies*. *Science of the Total Environment*, 630, 1565-1572.
60. Ocaña Martín, P. (2021). Herramienta para el dimensionamiento de centrales minihidráulicas.
61. Ong, S., Campbell, C., Denholm, P., Margolis, R., & Heath, G. (2013). *Land-use requirements for solar power plants in the United States* (No. NREL/TP-6A20-56290). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
62. Ortega, A. N. (2014). *La ordenación de las energías renovables a la luz de las últimas reformas del sector*. Especial consideración a la energía marina u oceánica. *Revista Vasca de Administración Pública (RVAP)*. *Administrazio Publikoaren Euskal Aldizkaria*, (99), 2129-2155.
63. Pitas, V., Fazekas, B., Banyai, Z., & Karpati, A. (2010). *Energy efficiency of the municipal wastewater treatment*. *Journal of Biotechnology*, 150, 163-164.
64. Planas, O. (2018). *Central minihidráulica*. Recuperado de: <https://solar-energia.net/energias-renovables/energia-hidraulica/central-minihidraulica>

65. Plappally, A. K. (2012). *Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(7), 4818-4848
66. Puig, P. y Ferrer, J. (2016). *Recurs eòlic de Catalunya. Mapa a 500 m de resolució horizontal* (Informe tècnic). VORTEX fDC S.L.
67. Quero García, P. (2021). *Energía renovable marina y ordenación espacial marítima: análisis del contexto europeo y recomendaciones para el caso de España* [Tesis doctoral, Universidad de Cádiz]. TESEO. Recuperado de: <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFichaConsulta.do?idFicha=654133>
68. Red Eléctrica. (2023). *Informe del Sistema Eléctrico: Energías renovables 2023*. Recuperado de <https://www.ree.es>
69. Rodríguez, T., Agua, P. S., González, P., Agua, S. S., Grasman, S. R., Swart, H. R., ... & Agua, D. S. *Aprovechamiento De La Salmuera Para La Generación De Energía Azul: Proyecto Life Hyreward*.
70. Sánchez Barril, J. (2017). *Optimización Energética de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR)* (Bachelor's thesis).
71. Simón P., Lardín C. y Abellán M. (2012). *Optimización energética en EDAR de la Región de Murcia*. Ingeniería Civil, 168, 93-112.
72. Smith, K.A., Brewer, A.J., Crabb, J. & Dauven, A. (2001). *A survey of the production and use of animal manures in England and Wales*. II. Poultry manure. Soil Use and Management, 17(1), 35-43. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2001.tb00007.x>
73. Soriano, F. (2017). *Energía eólica: Tecnología y aprovechamiento* (2.^a ed.). Editorial Paraninfo.
74. Textos Científicos (2009). *Dispositivos de generación de energía a través de las olas*. Recuperado de: <https://www.textoscientificos.com/energia/dispositivos-generacion-energia-olas>
75. Terrero Rodríguez, P., Pastor González, S., Grasman, S., Swart, H., Scheepers, F., Calvo Barahona, C., & Zarzo Martínez, D. (2023). *Aprovechamiento de la salmuera para la generación de energía azul: Proyecto LIFE HyReward*. Proyecto LIFE20 CCA/ES/001783. Sacyr Agua, REDstack, Pure Water Group. Recuperado de: www.daquas.es
76. The New Barcelona Post (2022). *Les depuradores de l'àrea metropolitana instal·laran plaques fotovoltaiques*. Recuperado de: <https://www.thenewbarcelonapost.cat/depuradores-area-metropolitana-instal·laran-plaques-fotovoltaiques/>
77. Tomczyk, P., Mastalerek, K., Wiatkowski, M., Kuriqi, A., & Jurasz, J. (2023). *Assessment of a Francis Micro Hydro Turbine Performance Installed in a Wastewater Treatment Plant*. Energies, 16(20), 7214. <https://doi.org/10.3390/en16207214>
78. Torregrossa, D., Leopold, U., Hernández-Sancho, F., Hansen, J., Cornelissen, A., & Schutz, G. (2017). A tool for energy management and cost assessment of pumps in waste water treatment plants. In *Decision Support Systems VII. Data, Information and Knowledge Visualization in Decision Support Systems: Third*

- International Conference, ICDSST 2017, Namur, Belgium, May 29-31, 2017, Proceedings 3* (pp. 148-161). Springer International Publishing.
79. Treviño Jara, A. (2025). Análisis del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima y propuesta de un mix energético alternativo. <https://hdl.handle.net/11000/36515>
 80. Urrea Vivas, M. A., Seguí-Amórtegui, L., & Guerrero-García-Rojas, H. (2025). Analysis of greenhouse gas production at the El Prat del Llobregat wastewater treatment plant, Spain: the decarbonization challenge. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(10415–10432). <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06338-z>
 81. U.S. Environmental Protection Agency. (2011). *AgSTAR: Anaerobic Digester Operator Guidebook*. EPA-430-B-11-004. <https://www.epa.gov/agstar>
 82. Viola, A., Franzitta, V., Trapanese, M., & Curto, D. (2016). Nexus water & energy: a case study of wave energy converters (WECs) to desalination applications in Sicily. *International Journal of Heat and Technology*, 34(Special Issue 2), S379-S386. <https://doi.org/10.18280/ijht.34S227>
 83. Villanueva, A. A. C., & López, H. E. F. (2014). *Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante plantas macrófitas típicas en Los Altos de Jalisco, México*. Paakat: Revista de Tecnología y Sociedad, 4(7), <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5815442>
 84. Walther, E. (2009). Energy efficiency and GHG reduction in wastewater facilities. *Northern California Chapter Meeting 2009*.
 85. Yang LingBo, Y. L., Zeng SiYu, Z. S., Chen JiNing, C. J., He Miao, H. M., & Yang Wan, Y. W. (2010). *Operational energy performance assessment system of municipal wastewater treatment plants*.
 86. Zacchei, E., & Colacicco, A. (2022). *Direct method to design solar photovoltaics to reduce energy consumption of aeration tanks in wastewater treatment plants*. *Infrastructures*, 7(6), 79. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7060079>