

61. EFICIENCIA ENERGÉTICA

i. Consideraciones teóricas

61. 1. Introducción

Las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) tienen como finalidad obtener un producto de alto valor añadido (agua depurada) a partir de una materia prima (agua residual). Para conseguir este fin, se producen una serie de procesos físicos, químicos y, fundamentalmente, biológicos, en los que se generan una serie de residuos y se consumen recursos (energía eléctrica y reactivos).

La depuración, al igual que cualquier proceso industrial, ha de realizarse siempre con una minimización de costes. Los costes en sistemas de tratamiento de aguas dependen fundamentalmente de las características del agua de entrada, del diseño de la instalación, de las necesidades de calidad del agua de salida y del caudal depurado [1]. La figura 61.1.a muestra una distribución de costes típica en una EDAR (datos suministrados por ACCIONA).

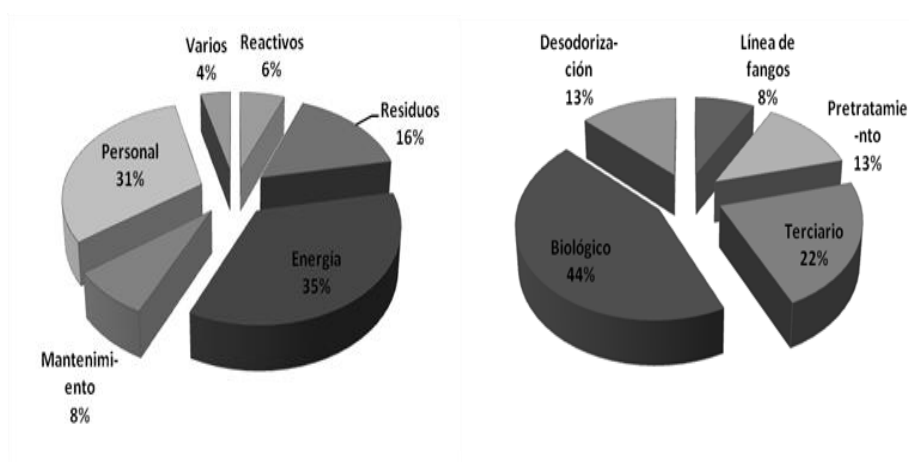


Figura 61.1.- Distribución de costes (a) y de consumos energéticos (b) de la EDAR (datos suministrados por ACCIONA).

Como se aprecia en la figura, los costes energéticos suponen la principal partida de los costes de explotación de una EDAR. Por ello, a la hora de abordar una minimización de costes de explotación, se ha de prestar especial atención a la eficiencia energética. En la figura 61.1.b se muestra la distribución de los costes energéticos entre los distintos procesos de la EDAR. Se puede observar que el mayor consumo energético se produce en el proceso biológico.

A continuación, se detallan las principales acciones de mejora de eficiencia energética de una EDAR:

61. 2. Optimización del sistema de aireación

Los costes de operación asociados a la aireación suponen entre el 15 y el 25% de los costes totales de operación y el 70% de los costes energéticos. El impacto del sistema de aireación en los costes fijos y de operación de una planta de tratamiento biológico es un aspecto de gran importancia. Por lo general, los costes fijos de los sistemas de aireación están entre el 15 y el 25 % de los costes de construcción de la planta de tratamiento. Por lo tanto, todas aquellas acciones de optimización del sistema de aireación repercuten en gran medida en la eficacia energética de la EDAR. Los parámetros más críticos que es necesario controlar en un proceso biológico, cara a optimizar el consumo de energía de la instalación, se presentarán cada una de las fases involucradas en el proceso de aireación de una EDAR:

- I. Necesidades de oxígeno del sistema:
 - Empleo de selectores anóxicos a la entrada del biológico
 - Procesos Anammox para los retornos de la líneas de lodos
 - Empleo de TRS elevados
 - Optimización de los procesos primarios
- II. Eficacias de transferencia de oxígeno desde la fase gaseosa a la líquida
 - Selección de sistemas con elevadas SAE y SOTE
 - Alta densidad de difusores y bajo caudal de aire por difusor
 - Diámetro medio de burbuja en torno a 2.0 mm,
- III. Presiones de suministro de aire
 - Mantenimiento y limpieza de difusores
 - Optimización de la profundidad del difusor
- IV. Estrategia de control.
 - Consigna de oxígeno disuelto de 1.5 ppm
 - Control ADEX

61. 3. Optimización de la línea de fangos

Desde un punto de vista energético, la implantación del tratamiento de digestión anaerobia de los fangos, junto con un sistema de cogeneración, permite recuperar parte de la energía, hasta un 25% del consumo de la planta. Sin embargo, este tipo de tratamiento de fangos activos con digestión anaerobia sólo son económicamente viables a partir de una capacidad de 100.000 he, debido a los elevados costes de inversión. Los altos costes hacen que hasta ahora haya sido un proceso adecuado sólo para medias y grandes instalaciones y, en EDAR de tamaño medio, aunque exista

digestión anaerobia, no siempre se acompaña de sistemas de cogeneración. Modificaciones como el empleo de digestores termófilos, de doble etapa o procesos de codigestión pueden mejorar el balance energético de la planta.

La aplicación de un pretratamiento adicional en parte o todo el caudal de fangos puede aumentar la biodegradabilidad del fango, optimizando la digestión anaerobia e incrementando la producción de biogás. Adicionalmente, este tipo de tratamientos trae otras mejoras operativas como la disminución del tiempo de residencia en el digestor, mejora de la deshidratabilidad y calidad del fango, reducción de la cantidad. Por otro lado, este aumento de biodegradabilidad hace que todos los pretratamientos aumenten en mayor o menor medida la concentración de materia orgánica y nutrientes en los caudales de retorno, lo que supondrá un incremento de energía en la aireación del biológico que deberá ser evaluado. Por lo tanto, desde el punto de vista energético, es necesario realizar el balance energético global de la instalación para conocer con seguridad que se obtiene más energía que la que se gasta.

Dentro de estos pretratamiento, destaca la hidrólisis térmica, que normalmente se emplea en plantas con una población equivalente superior a 100.000 he o para más de 3.000 ton/año de fango, ya que el coste de los equipos es elevado. Además, esta técnica requiere que el fango de alimentación la operación de hi debe tener una sequedad superior al 15% para reducir las necesidades energéticas del proceso, por lo que se requiere una etapa de deshidratación previa, que conlleva un consumo energético extra. Sin embargo, se genera más energía debido al incremento de biogás y se consume menos electricidad en la instalación de tratamiento de fango ya que se reduce el tamaño o el número de equipos (digestores, bombeo...). Además, no se requiere calentar los digestores, ya que el fango se introduce a temperatura.

61. 4. Optimización del decantador primario

En la decantación primaria se reduce al menos un 20 % de DBO y un 50% de sólidos en suspensión del agua residual. El aumento del rendimiento de esta etapa conlleva tres ventajas desde el punto de vista de balance energético. Primero, reduce la carga orgánica del tratamiento secundario, ahorrando por tanto energía en la aireación. Además, reduce la cantidad de fango activo secundario, el cual puede requerir más energía para su tratamiento. Asimismo, aumenta la producción de fango primario, el cual tiene una concentración superior en materia orgánica biodegradable y fácilmente produce el doble de biogás que el fango secundario activado en un digestor anaerobio.

La forma más directa de incrementar el rendimiento de la decantación primaria es dosificar algún coagulante. Sin embargo, una excesiva dosificación causa problemas en

las etapas biológicas posteriores, ya que puede existir déficit de materia carbonosa para la desnitrificación y déficit de P para el crecimiento de microorganismos.

61. 5. Optimización de bombas y compresor

El uso de motores de alta eficiencia reduce su pérdida de energía en más de un 40%. Por ejemplo, los costes de funcionamiento de un turbocompresor de levitación magnética son menores que los de la soplante de émbolos rotativos. La mayor eficiencia energética es debida a que el mayor rango de presión de trabajo del turbocompresor implica que pequeñas variaciones de presión, como las producidas por aperturas y cierres de válvulas motorizadas, no conlleven un aumento de consumo energético tan importante como en las soplantes rotativas. A su vez, la ausencia de rozamientos, gracias al sistema de rodamientos magnéticos y a la ausencia de pérdidas energéticas por correas de transmisión (5%), influye positivamente en una mayor eficiencia.

Muchos bombas y compresores no operan en su punto óptimo de rendimiento. Es frecuente encontrar equipos sobredimensionadas en los que se estrangula la impulsión para adaptarla al caudal demandado del circuito. El estudio de las variaciones de caudal o la selección de una bomba o compresor adaptado a la demanda permite mejorar la eficiencia de la instalación de bombeo.

Además, mediante sistemas de control de frecuencia puede optimizarse la impulsión del fluido función del caudal y presión demandados. Estos dispositivos también eliminan el estrés eléctrico en la instalación, al conseguir arrancar la bomba sin pasar en ningún momento de la intensidad nominal de la misma, y reducen el número de atascos (se puede programar la bomba para que funcione en sentido contrario durante algún tiempo antes de su arranque

Por último, aunque los desniveles a lo largo del proceso de depuración son mínimos, en el desagüe, sí que pueden aparecer saltos de agua de una altura interesante. En estos puntos se puede analizar la viabilidad de instalar una microturbina hidráulica a la salida de agua depurada con el fin de aprovechar el salto y caudal existente para generar energía eléctrica.

61. 6. Optimización de retornos de líneas de fangos

Las aguas de retorno de la línea de fangos constituyen un aporte de nutrientes significativo. Este caudal puede llevar entre el 15-25% de la carga de nitrógeno de la entrada de la EDAR, lo que supone un aumento considerable de nitrógeno que debe ser tratado.

Se han desarrollado varios procesos que actúan de forma eficiente sobre este flujo, reduciendo así el consumo energético global. Por ejemplo, aplicando una nitrificación parcial del amonio junto con el proceso *Anammox*, se puede eliminar el nitrógeno de la corriente de retorno de una forma mucho más eficiente que la nitrificación/desnitrificación convencional. Desde el punto de vista de optimización energética, esta opción reduce el consumo de oxígeno en un 67% y, por lo tanto, el consumo energético asociado. Además, se requiere menos materia orgánica para llevar a cabo la desnitrificación de ese nitrógeno en el reactor biológico, lo que incrementará los fangos en el digestor anaerobio.

61. 7. Optimización de sistemas de desodorización

La mayoría de las depuradoras cuentan con sistemas de tratamiento del aire para el control de olores. Estos sistemas mueven grandes volúmenes de aire. Los sistemas se suelen operar por ventilación fija y sobredimensionada para garantizar la calidad del aire tratada. Se puede ahorrar energía fluctuando el caudal según la concentración de ácido sulfhídrico y/o amonio en el aire extraído. El diseñar las instalaciones de depuración lo más confinadas posible en los focos de olor, que implican un mayor número de renovaciones de aire para cumplir las diferentes normativas de control de olores. De esta forma, las renovaciones de aire de los edificios podrán reducirse, y por lo tanto disminuir la potencia de los ventiladores de la desodorización.

61. 8. Optimización de sistemas de control

Es vital la existencia de un sistema de control avanzado que permita minimizar las desviaciones entre los valores de consigna y los valores reales de los parámetros a controlar. El buen funcionamiento de los sensores es también de suma importancia. Aunque existen sensores para todos los parámetros relevantes, la dificultad de su calibración en un entorno como el de las depuradoras y la comprobación en tiempo real de su buen funcionamiento conllevan la necesidad de mejorar la fiabilidad de los sensores; bien mediante su rediseño o mediante sistemas de limpieza y calibración automática.

ii. Cálculos

61.1. Cálculo de eficacia de aireación. Efecto de valor de consigna

El sistema de aireación de un sistema de fangos activos presenta $EAS = 2 \frac{kg_{O_2}}{kWh}$. La planta opera en estado estacionario tratando un ARU ($\alpha = 0,6$) con una concentración de oxígeno

disuelto de 3 ppm. Se decide reducir el caudal de aire comprimido con el fin de fijar un valor de consigna de 2 ppm. Estimar el efecto sobre la eficacia energética del sistema de aireación

Solución:

A partir de las definiciones de EAS y EA:

$$EA = \alpha EAS \frac{(C_{O_2}^* - C_{O_2})}{C_{O_2}^*}$$

Por tanto: $C_{O_2} = 3 \text{ ppm} \rightarrow EA = 0,79 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kWh}}$ y $C_{O_2} = 2 \text{ ppm} \rightarrow EA = 0,93 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kWh}}$

Se consigue un ahorro del 17,7% en el consumo de energía de la aireación

61.2. Cálculo de eficacia de aireación. Efecto de mantenimiento

Se decide limpiar los difusores de burbuja fina de la balsa aerobia de una EDAR con ácido cítrico, lo que permite aumentar un 15% el valor αFE . Calcular el efecto sobre la eficacia de aireación si se mantiene el nivel de oxígeno disuelto.

Solución:

Si EA_0 y EA_F son las eficacias de aireación antes y después de la limpieza, entonces:

$$\frac{EA_F}{EA_0} = \frac{1,15\alpha FE \left(\frac{(C_{O_2}^* - C_{O_2})}{C_{O_2}^*} \right)}{\alpha FE \left(\frac{(C_{O_2}^* - C_{O_2})}{C_{O_2}^*} \right)} = 1,15$$

Se consigue un ahorro del 15% en el consumo de energía de la aireación.

61.3. Cálculo de eficacia de aireación. Empleo de oxígeno puro

Se plantea emplear oxígeno puro en lugar de aire en la balsa aerobia de una depuradora. Discutir el efecto del precio de la energía sobre la elección de esta opción (no considerar costes fijos). Datos:

	Aire	Oxígeno puro
Precio (€/ ton)	0	100
EA (kg/kWh)	1,5	4,5
ETOE (%)	15	45
α	0,7	1

Solución:

Si C_E es el coste del kWh, entonces el coste de operación C_T de cada opción para disolver 1 kg O_2 serían:

$$(C_T)_{aire} = (1 \text{ kgO}_2)_{dis} \times \frac{1 \text{ kWh}}{(0,7 \text{ 1,5}) \text{ kgO}_2} C_E$$

$$(C_T)_{O_2} = (1 \text{ kgO}_2)_{dis} \frac{1 \text{ kWh}}{(1 \text{ 4,5}) \text{ kgO}_2} C_E + (1 \text{ kgO}_2)_{dis} \frac{1 \text{ kgO}_2, \quad 100 \text{ €}}{(1 \text{ 0,45}) \text{ kgO}_2 \quad 1000 \text{ kgO}_2}$$

Ambas expresiones se igualan para $C_E = 0,30 \text{ €/kWh}$. Para costes de energía superiores a este valor, la aireación con oxígeno puro sería recomendable, frente a la aireación convencional

61.4. Cálculo de ahorro energético con variador de frecuencia

Se instala un variador de frecuencia en una turbosoplante sobredimensionada, con el cual se reduce el caudal de aire un 20% con respecto a la situación inicial. Estimar el consumo energético obtenido.

Solución:

Según las leyes de afinidad:

$$\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 = \left(\frac{\hat{G}_1}{\hat{G}_2}\right)^3 = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

Por tanto si $\hat{G}_2 = 0,80 \hat{G}_1$

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = (0,8)^3 = 0,51$$

El empleo de un variador de frecuencia reduce el consumo de la turbosoplante casi a la mitad

61.5. Evaluación energética de pretratamiento de lodos

Se instala un pretratamiento de ultrasonidos en la línea de fangos previo a la digestión anaerobio en dos depuradoras distintas. Las características de ambos procesos se muestran en la siguiente tabla. ¿Cuál de los dos tratamientos es más eficaz?

Parámetro	EDAR A	EDAR B
% lodos a US	35	55
Caudal lodos a US (m ³ /d)	18	7
Sólidos totales SST (g/L)	55	55
SSV/SST (%)	73	80
Consumo US (kWh/kgSST)	0,3	0,35
Aumento en biogás (L/kg SSV _{aliment})	35	50

Solución:

El consumo diario de energía en US se puede obtener fácilmente. Por ejemplo, para la EDAR A:

$$\frac{0,3 \text{ kWh}}{\text{kg SST}} \frac{55 \text{ kg SST}}{1 \text{ m}^3} \frac{18 \text{ m}^3}{1 \text{ d}} = 297 \frac{\text{kWh}}{\text{d}}$$

Mientras que el incremento de biogás supone:

$$35 \frac{L_{\text{biogas}}}{\text{kg SSV}_{\text{aliment}}} \frac{73 \text{ kg SSV}}{100 \text{ kg SST}} \frac{55 \text{ kg SST}}{1 \text{ m}^3} \frac{100 \text{ m}^3 \text{ aliment.}}{35 \text{ m}^3 \text{ recirc.}} \frac{18 \text{ m}^3 \text{ recirc.}}{\text{d}} = 72270 \frac{L_{\text{biogas}}}{\text{d}}$$

A su vez, la generación extra de energía a partir del incremento de biogás se puede estimar a partir de su composición y del poder calorífico inferior. Suponiendo un 70% (v/v) metano, PCI (metano)= 10 kWh/ m³ y una eficiencia del 60 % del sistema de cogeneración, para la EDAR A:

$$72,27 \frac{\text{m}^3_{\text{biogas}}}{\text{d}} \frac{0,75 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}}{1 \text{ m}^3_{\text{biogas}}} \frac{10 \text{ kWh}}{1 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}} 0,6 = 304 \frac{\text{kWh}}{\text{d}}$$

En resumen:

Parámetro	EDAR A	EDAR B
Consumo C (kWh/ d)	297	135
Biogás (m ³ / d)	72,72	28,00
Generación G (kWh/ d)	304	118
Balance (G-C)	7	-17

Los resultados demuestran que la operación de US en la planta tiene un balance energético positivo (la energía generada con el aumento de producción de biogás es mayor que el consumo energético de la ultrasonicación).

61.6. Evaluación energética de post-tratamiento de lodos

Se coloca una centrífuga al final de la línea de fangos de una EDAR (1000 t/d, 1% MS), lo que permite llegar hasta un 8% de MS. Estimar el ahorro energético y económico de esta modificación. Datos: consumo centrífuga 1.2 kWh/ m³, Tara camión 15 t, consumo medio camión: 35 L gasoil/ 100 km, PCI (gasoil): 10kWh/L, distancia vertedero: 50 km (ida), tarifa vertido: 30 €/m³. Precio gasoil: 1,0 €/L, Precio electricidad: 0.1 €/kWh. Suponer densidades constantes e iguales a 1 ton/ m³.

Solución:

Sin centrifugación, el consumo energético se debe al transporte

$$\frac{1000 \text{ t}}{d} \frac{1 \text{ viaje}}{15 \text{ t}} \frac{100 \text{ km}}{1 \text{ viaje}} \frac{35 \text{ L gasoil}}{100 \text{ km}} \frac{10 \text{ kWh}}{1 \text{ L gasoil}} = 23333 \frac{\text{kWh}}{d}$$

Con centrifugación, se transportan 125 t, pero hay que incluir el consumo de la centrífuga:

$$\frac{125 \text{ t}}{d} \frac{1 \text{ viaje}}{15 \text{ t}} \frac{100 \text{ km}}{1 \text{ viaje}} \frac{35 \text{ L gasoil}}{100 \text{ km}} \frac{10 \text{ kWh}}{1 \text{ L gasoil}} + \frac{1000 \text{ t}}{d} \frac{1,2 \text{ kWh}}{1 \text{ t}} = 4117 \frac{\text{kWh}}{d}$$

Por lo tanto, la centrifugación reduce el consumo energético en la etapa final de la línea de fangos en un 82,3 %

En cuanto a los costes,

$$\text{Sin centrifugación: } \frac{2333 \text{ L gasoil}}{d} \frac{1 \text{ €}}{1 \text{ L}} + \frac{1000 \text{ t}}{d} \frac{30 \text{ €}}{1 \text{ t}} = 32333 \frac{\text{€}}{d}$$

$$\text{Con centrifugación: } \frac{292 \text{ L gasoil}}{d} \frac{1 \text{ €}}{1 \text{ L}} + \frac{125 \text{ t}}{d} \frac{30 \text{ €}}{1 \text{ t}} + \frac{1200 \text{ kWh}}{d} \frac{0,1 \text{ €}}{1 \text{ kWh}} = 4162 \frac{\text{€}}{d}$$

Por tanto, la centrifugación supone un ahorro económico en la gestión del lodo del 87.

61.7. Evaluación energética de iluminación

En una EDAR, se decide modernizar la iluminación interna (50 tubos fluorescentes 30W por tubos LED 9W) y la externa (25 luminarias de vapor de sodio de 120 W por LED 30W). Estimar el ahorro energético anual, asumiendo 8 h de uso diarias.

Solución:

El consumo inicial en iluminación:

$$\left(50 \text{ t. fluoresc.} \frac{30 \text{ W}}{1 \text{ t. fluoresc.}} + 25 \text{ lumin.} \frac{120 \text{ W}}{1 \text{ lumin.}} \right) \frac{8 \text{ h}}{1 \text{ d}} \frac{365 \text{ d}}{1 \text{ año}} \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} = 13140 \frac{\text{kW}}{\text{año}}$$

El consumo tras la modificación

$$\left(50 \text{ t. LED} \frac{9 \text{ W}}{1 \text{ t. LED}} + 25 \text{ LED} \frac{30 \text{ W}}{\text{LED}} \right) \frac{8 \text{ h}}{1 \text{ d}} \frac{365 \text{ d}}{1 \text{ año}} \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} = 3504 \frac{\text{kW}}{\text{año}}$$

Se consigue un ahorro del 73.3% en el consumo energético para iluminación.

Bibliografía

Collado, S.; Laca, A.; Díaz, M.; Simón, P.; Abellan, M.; Polo, M.; Rancaño, A. *Transferencia de oxígeno en sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales: I.- Aspectos básicos*, Tecnología del Agua 336, 78-86, 2011.

Collado, S.; Laca, A.; Díaz, M.; Simón, P.; Abellan, M.; Polo, M.; Rancaño, A. *Transferencia de oxígeno en sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales: II.- Efectos del diseño de planta*, Tecnología del Agua 337, 36-41, 2012.

Collado, S.; Laca, A.; Díaz, M.; Simón, P.; Abellan, M.; Polo, M.; Rancaño, A. *Transferencia de oxígeno en sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales: III.- Efecto de las condiciones ambientales y operacionales*, Tecnología del Agua 339, 42-52, 2012.